

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU TARAYICILAR İLE VERİ
TOPLANMASI VE CAD ORTAMINA
DEĞİŞİK FORMATLARDA AKTARILMASI

GÖKHAN BERBERCUMA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP

GEBZE
2006

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU TARAYICILAR İLE VERİ
TOPLANMASI VE CAD ORTAMINA
DEĞİŞİK FORMATLARDA AKTARILMASI**

**GÖKHAN BERBERCUMA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP**

**GEBZE
2006**

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Üç boyutlu tarayıcılar ile veri toplanması ve CAD ortamına değişik formatlarda aktarılması

YAZAR ADI: Gökhan BERBERCUMA

3 Boyutlu Tarayıcılar (3D Scanner), 3 boyutlu obje geometrik verilerinin alınmasında kullanılmaktadır. Bu toplanan veriler mühendislik amaçlı olarak tekrar CAD yazılımlarında kullanılmaktadır. Bu veriler nokta, eğri veya yüzey verileri olabilmektedir. CAD ortamında önemli olan bu verileri kullanarak en kısa sürede ve kolayca yeni modeli oluşturmaktır.

Bu Yüksek Lisans tezinde imalat teknolojisinde hızlı artan bir ivme ile uygulama alanlarına giren 3 boyutlu tarayıcılar incelenmiş; konu ile direkt bağlantısı olan Tersine Mühendislik prosesi araştırılmış ve Koordinat Ölçme Cihazları (CMM) da dahil edilerek kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonunda 3 boyutlu tarayıcılar ile CMM arasındaki farklar belirtilmiş ve tezin inceleme örneği olan türbin çarkına yer verilmiştir. Türbin çarkı 3 boyutlu tarayıcıda taranmış ve tersine mühendislik prosesi ile nokta bulutundan CAD ortamında Unigraphics NX programı kullanılarak tekrar oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın dünyada yeni bir trend olarak inkişaf eden ve ülkemizde de yavaş yavaş kullanım alanları bulmaya başlayan 3 boyutlu tarayıcılar ve tarama teknolojileri için bir başlangıç unsuru olmasını diliyor ve bu teknolojinin ülkemizde en kısa zamanda çeşitli sahalara girerek kullanılmaya başlamasını umuyorum.

SUMMARY

Title of Thesis: Data capturing with 3D Scanners and transfer of them to CAD environment in various formats

Name of Authors: Gökhan BERBERCUMA

3D Scanners are used in 3 dimensional object geometric data capturing. These captured data which might be point, curve or surface are employed in CAD software for engineering purposes. The important aspect in CAD environment is to create the new model at shortest and easily by using those data.

In this thesis, 3D Scanners that are used in applications in manufacturing technology with an increasing speed are examined, Reverse Engineering process that is directly related with the topic is investigated and by including Coordinate Measuring Machines (CMM), a comprehensive study is done. At the end of the thesis, the differences between 3D Scanners and CMM's are defined and analysis sample of the thesis, Turbine Wheel, is examined. The turbine Wheel was scanned in a 3D Scanner and by using reverse engineering process with Unigraphics NX software the model is created again in CAD environment.

I wish that this thesis becomes a beginning element for 3D Scanners that are developing as a trend in the world and being used gradually in our country and hope that this technology to be used in various fields in our country as soon as possible.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında bana destek olan ve yol gösteren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. A. Zafer Şenalp'e ve Sayın Hocam Doç. Dr. Fehmi Erzincanlı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamda gerek kaynak paylaşımı ile gerek de zaman ayırdıkları için CADEM firmasına ve Teknolojik Ürünler Yöneticisi Sayın Gönenç Uluçay'a, Yıldız Teknik üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin Yurci'ye ve Arş. Gör. Dr. Anıl Nomak Akdoğan'a ve Mega Danışmanlık şirketinden Sayın Murat Çetinel'e teşekkürler ederim.

Bunlardan ayrı olarak, çalışmalarım boyunca bana verdikleri destek ve teşvikleri için tüm aileme de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tersine Mühendislik Kavramı	1
1.2. Bileşik Mühendislik ve Ürün Tasarımı Teknolojileri	2
1.3. Tersine Mühendisliğin Genel Olarak İncelenmesi	5
1.4. Sayısallaştırma ve Tersine Mühendislik	6
1.5. Sayısallaştırma ve Tarama Arasındaki Farklar	11
1.6. Sayısallaştırma Verilerinden 3D-CAD Tekrar Tasarımı	17
1.6.1. Hangi Tip Sensör Kullanılmalıdır	19
1.6.2. Döküm Parçaları ve Takım Rekonstrüksiyonu için Tersine Mühendislik	19
1.6.3. Optik Ölçme Yöntemleri ve Sayısallaştırma	19
1.7. Tersine Mühendislik İçin Kullanılan Yazılımlar	27
1.8. Hızlı Prototipleme Makineleri	28
1.9. Tartışma	29
1.10. Hızlı Prototipleme ve Tersine Mühendislik	30
1.11. Hızlı Prototiplemenin Potansiyel Kullanım Alanları	33
1.12. TRIZ	36
1.13. Potansiyel Araştırma Konu ve Uygulamaları	39
1.14. Tersine Mühendislik ve Veri Elde Etme	40
1.14.1. Veri Elde Etme	40
1.14.2. Veri Elde Etmede Uygulama Problemleri	44
1.14.3. Şeklin Global Karakterizasyonu	47
1.14.4. Parçalara Ayırma ve Basit Yüzey Uydurma	50

1.14.5. Serbest Şekilli Geometri İçin Segmentasyon ve Yüzey Uydurma	56
1.14.6. Çoklu Görünüş Kombinasyonu	62
1.14.7. B-Rep Model Oluşturma	65
1.15. Özellik Tabanlı Tersine Mühendislik Stratejileri	68
1.15.1. Kesit Özelliğine Dayanan Strateji – 2 Boyuttan 3 Boyuta	71
1.15.2. Geometrik Özelliklerin Hakim Olduğu Nokta Bulutu Dilimleme	72
1.15.3. Kesit Eğrisinin Özellik Tanımı	74
1.15.4. Kısıtlamalar ile Tersine Kesit Eğrisi Tasarımı	74
1.15.5. Yüzey Özellik Tabanlı Strateji – 3 Boyuttan 3 Boyuta	75
1.15.6. 4 Boyutlu Yüzeye Dayanan Diferansiyel Geometrik Özellik Tahmini	75
1.15.7. Simetrik Düzlemin Çıkarılması	76
1.15.8. Dörtgen Yüzeylerin Özellik Tanımlaması ve Optimizasyon	76
1.15.9. Temel Yönelim Gaussian Görüntü Tabanlı Çekme ve Döndürme Özelliğinin Çıkartılması	78
2. KOORDİNAT ÖLÇME TEZGAHLARI	79
2.1. Koordinat Ölçme Tezgahları ile İlgili Genel Bilgi	79
2.2. Tezgah	81
2.2.1. Kinematik	81
2.2.2. Fiziksel Prensipler	81
2.3. Ölçüm Probu	81
2.4. CMM Tezgahının Yapısı	82
2.4.1. Tabla	82
2.4.2. Anti titreşim destekleri	83
2.4.2.1. Hareketli parça	83
2.4.2.2. Ana Taşıyıcı	83
2.4.2.3. Merkezi Taşıyıcı	84
2.4.2.4. Z Kolonu ve Ölçme	84
2.4.2.5. Koruyucular ve Panjurlar	84
2.5. Koordinat Ölçme Tezgahı Tipleri	84
2.5.1. Dikey Tip CMM	84

2.5.2. Yatay Tip CMM	85
2.6. Ölçme Kolları	85
2.6.1. Ölçme Kolu Unsurları	86
2.6.2. Ölçme Kolunun Faydaları	87
2.7. Koordinat Ölçme Tezgahlarında Ölçme Tarzları	87
2.8. Prob Tipleri	87
2.8.1. Sert Prob	87
2.8.2. Yumuşak Problar	88
2.9. Kalibrasyon	88
2.10. Koordinat Metrolojisinin Başlıca Prensipleri	89
2.11. On Yıllık Gelişim Sürecine Bir Bakış	92
2.11.1. CAD verilerinin sistemlere dahil edilmesi	94
2.12. Sensör Sistemleri	94
2.12.1. Temaslı Sistemler	95
2.12.2. Ölçüm Sistemleri	96
2.12.3. Otomatik Prob Değiştirme Magazini	98
2.12.4. Çoklu-Sensör Teknolojisi	99
2.13. Kaç Adet Ölçüm Noktası Gerekli?	100
2.14. Yeni Uygulama-Form Ölçümleri	102
2.15. Koordinat Ölçme Tezgahlarının Yetenekleri	106
2.16. Tezgah Sınıfları ve Uygulama Alanları	106
2.16.1. Orta Hassasiyetli Üniversal Ölçümler	106
2.16.2. Yüksek Hassasiyetli Üniversal Ölçümler	108
2.16.3. Referans Ölçümleri ve Kalibrasyonlar	109
2.17. Otomotiv Parçalarının Ölçümleri	111
2.18. Tasarım ve Prototip Alanlarında Ölçüm	113
2.18.1. Ölçüm Sonuçları Ne Kadar Hassas?	114
2.18.2. Sıcaklık ve Ölçüm Belirsizliği	116
2.18.3. Termal Stabilitateye Sahip Koordinat Ölçme Tezgahları	116
2.19. Koordinat Ölçme Tezgahı Yazılımlarının Özellikleri	117
2.20. Koordinat Ölçme Tezgahlarının Geleceğine Genel Bakış	118
3. 3 BOYUTLU TARAYICI	120
3.1. Fonksiyonellik	120

3.2. Teknoloji	121
3.2.1. Temaslı	121
3.2.2. Aktif	122
3.2.3. Uçuş Süreli	122
3.2.4. Üçgenleme	122
3.2.5. Uçuş Süreli ve Üçgenleme Tarayıcılar ile İlgili Notlar	123
3.2.6. Yapısal Işın	124
3.2.7. Modüle Edilmiş Işık	125
3.2.8. Pasif	125
3.2.9. Stereoskopik	126
3.2.10. Kullanıcı Destekli (Görüntüye Dayanan Modelleme)	126
3.2.11. Rekonstrüksiyon	126
3.13. Uygulamalar	127
3.13.1. Malzeme İşleme ve Üretimi	127
3.13.2. Endüstriyel Lazer Tarayıcı Parçalarının Üreticileri	128
3.13.3. Eğlence	128
3.13.4. Tersine Mühendislik	128
3.13.5. Kültürel Miras	129
3.2. 3D Optik Taramanın Temel Prensibi	129
3.2.1. Optik Üçgenleme	129
3.2.2. 3D Tarama Sisteminde Topogrametri	131
3.2.2.1. Metot	131
3.2.2.2. Standart optoTop Sistemi ve Sensorün Geometrik Düzenlemesi	131
3.2.2.3. Projektör ve Izgara Levhası	132
3.3. 3D Tarama Sistemleri ve Kullanım Alanları	132
3.3.1. 3D Sayısallaştırma Sistemleri	132
3.3.2. Kullanım Alanları	136
3.4. 3D Optik Tarama Sistemleri Nasıl Çalışır	138
3.4.1. Fotogrametri	139
3.4.2. Ana Kullanım Alanları	139
3.4.3. Topogrametri	140
3.5. 3D Tarama Cihazları Çeşitleri ve Çalışma Prensipleri	140

3.5.1. Menzil Tarayıcılar	140
3.5.2. Üçgenleme Tarayıcılar	141
3.5.3. Hassasiyet	143
3.5.4. Ek Bilgiler	144
3.5.4.1. Genel	144
3.5.4.2. Hız	145
3.5.4.3. Çözünürlük ve Nokta Boyutu	145
3.5.4.4. Menzil Sınırları ve Karışan Işınımın Etkisi	145
3.5.4.5. Görüş Alanı	146
3.5.4.6. Çakıştırma Cihazları	146
3.5.4.7. Görüntüleme Kameraları	146
3.5.4.8. Taşıma Kolaylığı	147
3.5.4.9. Güç Kaynağı	147
3.5.4.10. Tarama Yazılımı	147
3.6. Mevcut Cihazların Listesi	147
3.7. 3 Boyutlu Tarama Yazılımı	149
3.7.1. Tarayıcı Kontrolü için Yazılım	150
3.7.2. Yerinde Canlandırma ve Çakıştırma	151
3.7.3. Nokta Bulutu İşleme için Yazılım	151
3.7.3.1. Canlandırma	151
3.7.3.2. Tek Nokta Bulutlarında Veri Temizleme	152
3.7.3.3. Veri Filtreleme ve Nokta Seyreltme	153
3.7.3.4. Çakıştırma	154
3.7.3.5. Çakıştırmalı Nokta Bulutlarında Veri Temizleme	154
3.7.3.6. Çakıştırmadan Sonra Nokta Seyreltme	154
3.7.3.7. Nokta Bulutlarından Türetilen Basit Çizimler	155
3.8. Basit Şekillerin Uydurulması için Yazılım	155
3.9. Kompleks Yüzey Modellerinin Oluşturulması için Yazılım	156
3.9.1. Poligonal Ağ Yapısı	156
3.9.2. NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline – Üniform Olmayan Rasyonel B-Eğri)	158
3.9.3. Doku ve Görüntü Eşleme	158
3.10. Veri ve Proje Yönetimi için Yazılım	160

3.10.1. Veri İzleme ve Kalite Kontrol	160
3.11. Mevcut Yazılım Ürünleri	160
3.12. Tersine Mühendislik ve Araştırma için Otomasyon Lazer Tarama Sistemi	161
3.12.1. Arka Plan ve Araştırmanın Kapsamı	162
3.12.1.1. Lazer Tarama Sisteminin Temelleri	162
3.12.1.2. Araştırmanın Kapsamı	165
3.12.2. Tarama Planının Oluşturulması	165
3.12.2.1. Tüm Prosedür	165
3.12.2.2. İlk Tarama Doğrultusunun Belirlenmesi	166
3.12.2.3. Tarama Yolunun Oluşturulması	167
3.12.2.4. DOF Ve Oklüzyon Kontrolü	168
3.12.3. Otomasyonlu Lazer Tarama	169
3.12.3.1. Lazer Tarama Sistemi ve Parça Düzeneği	169
3.12.3.2. Tarama Yollarının Koordinat Dönüşümü	170
3.12.3.3. Otomasyonlu Tarama ve Çakıştırma	171
3.12.3.4. Tarama Verilerinin Analizi	171
3.12.4. Değerlendirme	174
3.13. Bir Video Kameradan Yararlanan Üç Boyutlu Tarayıcı Yazılımı	176
3.13.1. Metodoloji	177
3.13.2. Veri Toplama	178
3.13.3. Sistem Kalibrasyonu	180
3.13.4. Obje Sınırlarının Belirlenmesi	181
3.13.5. Objenin Modellenmesi	184
3.13.6. VRML Çıkış Dosyaları	190
3.13.7. Değerlendirme	192
3.14. GOM Firmasının Ürünlerine Genel Bir Bakış	193
3.14.1. ATOS Sistem Tanıtımı	193
3.14.2. Atos Sistem Tipleri	195
3.14.2.1. ATOS II	195
3.14.2.1.1. ATOS II FireWire	196
3.14.2.2.2. ATOS III	196
3.14.3. Sistem Genel Tanıtımları	199

3.14.3.1. ATOS I Sistemi	199
3.14.3.2. ATOS ile 3 Boyutlu Tarama İş Akışı	200
3.14.3.3. ATOS ile Kalite Kontrol Uygulaması İş Akışı	201
3.14.4. Kalite Kontrol ve Raporlama	202
3.14.5. Saç Metal İşlemede Optik Ölçüm Teknolojileri	204
3.14.5.1. ATOS, Optik 3D Sayısallaştırma	204
3.14.5.2. Preslenmiş Parçaların Doğrulanmasında 3D Sayısallaştırma	207
3.14.6. 3D Tarama Cihazı Kullanarak Sac Kalıp Modifikasyonlarında Sürat ve Ekonomi ve Diğer Faydalar	211
3.14.6.1. Kalıp Deneme	211
3.14.6.2. Kırık Veya Çatlak Kalıp Tamiri	212
3.14.6.3. Kalıp Yüzeylerinin ATOS ile Sayısallaştırılması	213
3.14.6.4. Sayısallaştırma Verisi Üzerinden CAM	213
3.14.6.5. Kalıp Dokümantasyonu ve Aşınma Kontrolü	214
3.14.6.6. Kalıp Dokümantasyonu	214
4. CMM VE OPTİK TARAYICI KARŞILAŞTIRMASI	215
5. TÜRBİN ÇARKININ ATOS I 3D TARAYICI İLE TARANMASI	219
6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	234
KAYNAKLAR	236
ÖZGEÇMİŞ	241

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Mühendislik ürünlerinin imalatı şeması	9
1.2. 3D geometri ve oluşturulan veriler için sayısallaştırma teknikleri	10
1.3. Sayısallaştırma ekipmanları için kullanılan farklı prob sensörleri	12
1.4. Tersine mühendislikte proses sırası	18
1.5. Sayısallaştırma yöntemlerinin sınıflandırılması	20
1.6. Izgara projeksiyonu	20
1.7. Parça CAD verisi ile ölçüm verisinin görüntüleri ve parçanın ağ yapısı ve renkli doku haritası	22
1.8. Lazer tarama mekanizmasının şematik görünümü	23
1.9. Lazer sayısallaştırma yöntemi	23
1.10. Tersine mühendisliğin ürün geliştirmede kullanılması	26
1.11. Kesit görüntüleme ölçüm prensibi	32
1.12. STL dosyasının oluşturulması	33
1.13. Hızlı Prototipleme ile Oluşturulan Ürün	34
1.14. Yüzey hiyerarşisi	41
1.15. Basit bir katı obje ve ölçüm verileri	54
1.16. Global yaklaştırma yüzeyi	58
1.17. Eğri ağı tabanlı yüzey	60
1.18. Keyfi topoloji yüzeyi	61
1.19. Fonksiyonel olarak ayrıştırılmış yüzey	65
1.20. Katı bir piramit modelin sabitlenmesi	67
1.21. Tersine mühendislik stratejileri	70
1.22. Bir düzlemle birlikte dilim nokta bulutu	73
1.23. Dörtgenlerin geometrik gösterimi	77
1.24. Temel yönelim Gaussian görüntü	79
2.1. En sık kullanılan koordinat ölçme tezgahları	90
2.2. Tezgah koordinat sisteminin, parça koordinat sistemine taşınması	91
2.3. Köprü tipi koordinat ölçme tezgahı	92
2.4. Dokunmatik problemlerin çalışma prensibi	95
2.5. Piezo sensör takılmış küçük bir probun kullanıldığı bir sistem	96
2.6. Günümüzde kullanılan gelişmiş hızlı tarama probu	97

2.7.	Otomatik prop değiştirme magazini	98
2.8.	İndekslenabilir prob kafası yerine otomatik prob değiştirme magazininin kullanılması	99
2.9.	Çoklu nokta ölçümü	101
2.10.	Ölçüm ucu çapının hesabı	103
2.11.	Ölçülecek çap ve ölçüm ucu çapı arasındaki bağıntı	104
2.12.	Form ölçümü raporu	105
2.13.	Orta hassasiyetli koordinat ölçme tezgahları	107
2.14.	Kabinli sistemler taşınabilir yapıya sahiptir	108
2.15.	Ultra ölçüm hassasiyetine sahip koordinat ölçme tezgahı	110
2.16.	Otomotiv sektöründe kullanılan, LK Ltd. marka koordinat ölçme tezgahı	112
2.17.	Portatif koordinat ölçme tezgahı	113
2.18.	İzin verilen maksimum hata değeri ile ölçüm uzunluğu arasındaki ilişki	115
2.19.	Lk Ltd. koordinat ölçme yazılımı	118
3.1.	Bir lazer üçgenleme sensörünün çalışma prensibi	123
3.2.	Steinbichler T-SCAN lazer kesitli tarama sistemi	133
3.3.	Steinbichler COMET IV tek kameralı optik tarama sistemi	134
3.4.	Tek kameralı sistem	136
3.5.	Çift kameralı sistem	136
3.6.	Asimetrik yerleştirilmiş çift kameralı sistem	137
3.7.	Breuckmann STEREOSCAN	137
3.8.	Uçuş süreli prensibi	140
3.9.	Üçgenleme prensibi: Tek kameralı çözüm	141
3.10.	Üçgenleme prensibi: Üç kameralı çözüm	142
3.11.	Tarayıcı hassasiyeti	143
3.12.	Lazer tarama mekanizması	163
3.13.	Lazer tarama sistemi	171
3.14.	Test parçası	172
3.15.	Fikstürün ve döner tablanın düzenlenmesi	172
3.16.	Oluşturulan tarama planı	173
3.17.	Çakıştırmalı tarama verisi	174

3.18.	Veri lokalizasyonun sonuçları	174
3.19.	Veri lokalizasyonu	175
3.20.	Motorlu platform	176
3.21.	Büstten modele	178
3.22.	Video çekiminin başlangıcı	179
3.23.	Kontrol noktaları	180
3.24.	Orijinal görüntü	181
3.25.	İkili görüntü	182
3.26.	Obje sınırlarını belirleme aracı	183
3.27.	Sınır noktaları	184
3.28.	Kamera ve obje arasındaki düz çizgiler (üstten görünüş)	185
3.29.	Kamera ve obje arasındaki düz çizgiler (yandan görünüş)	185
3.30.	Kullanılan koordinat sistemleri	186
3.31.	10.000 nokta kullanılarak modellenen büst	187
3.32.	Modelleme aracı	188
3.33.	Bir model noktası tanımlamak için kullanılan düz çizgiler (yanal görünüş)	188
3.34.	Bir model noktasını tanımlamak için kullanılan düz çizgiler (yan görünüş)	189
3.35.	Ağ yapısı modeli (40.000 üçgen)	190
3.36.	Yapısal model (270.000 üçgen)	191
3.37.	ATOS yazılımı ile raporlama	202
3.38.	Geomagic Qualify ile raporlama	202
3.39.	Saçak projeksiyonu ve üçgenleme	203
3.40.	ATOS tarayıcının kullanımı	204
3.41.	Sayısallaştırma sonuçları	205
3.42.	TRITOP ile yan panel için bir referans veri setinin oluşturulması	206
3.43.	Ölçüm verilerinin CAD verileri ile hizalanması	207
3.44.	Notlarla beraber renkli çizim	208
3.45.	Yarıklı deliğin pozisyon kontrolü	208
3.46.	Kesit analizi	209
3.47.	ATOS kafasının robotla entegrasyonu	210
4.1.	ATOS ile taranmış iş parçası	216

4.2.	CMM ile taranmış iş parçası	216
5.1.	Kullanılan ATOS I sisteminin şematik görünümü	223
5.2.	Nokta bulutundan katı modele	224
5.3.	Nokta bulutundan katı modele	225
5.4.	Nokta bulutundan katı modele	226
5.5.	Nokta bulutundan katı modele	227
5.6.	Nokta bulutundan katı modele	228
5.7.	Parçanın teknik resmi	229
5.8.	Türbin çarkı	230
5.9.	Türbin çarkı	231
5.10.	Türbin çarkı	232

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Farklı tarama sistemlerinin avantajları ve dezavantajlarının karşılaştırılması	13
2.1. Menzil olarak sınıflandırılmış mevcut tarayıcıların listesi	147
2.2. Tarama üreticilerinden ayrı olarak sunulan 3 boyutlu tarama yazılımı	196
3.1. ATOS II ve ATOS III Karşılaştırması	215
5.1. ATOS I tarayıcısının teknik parametreleri	

1. GİRİŞ

1.1. Tersine Mühendislik Kavramı

Günümüzde müşteriler daha kişisel ve daha özelleştirilmiş ürünler talep etmektedir. Müşteri ihtiyaçlarındaki bu belirsizlik ve değişkenlik, rekabet güçlerini artırmak isteyen bir çok işletmeyi yeni üretim ve pazarlama stratejileri uygulamaya zorlamaktadır. Bu işletmeler, müşteri ihtiyaçlarını tatmin ederek kâr elde etmek amacıyla geniş bir ürün yelpazesıyla pazara hakim olmaya çalışmanın yanı sıra, pazara sürekli yeni ürünler sunmaktadır. Sunulan bu ürünlerin kaliteli olması ve pazardaki yerlerini en kısa zamanda alması ise işletmelere rekabet açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu koşullar altında varlıklarını sürdürmeye çalışan işletmeler, pazara küçük partiler halinde, özelleştirilmiş, çok kaliteli ürünleri düşük maliyetler ile sunmayı hedeflemektedir. Bu hedefi gerçekleştirmek kolay olmadığı gibi, bu iş için işletmelerin kitlesel üretim ve yalın üretimden çok daha güçlü olan çevik, tepkisel ve bileşik üretim/yönetim felsefelerine ihtiyaçları vardır. Bu yüzden son zamanlarda üretim dünyasında, müşteri isteklerine ve önceden kestirilemeyen pazar değişikliklerine çok çabuk uyum sağlayabilecek; çevik, tepkisel ve esnek üretim ve yönetim stratejileri, yöntemleri ve paradigmaları öne çıkmış bulunmaktadır. Tasarımdan üretime ve üretimden de pazarlamaya değin akıp giden tüm süreçlerin her zaman başlangıç noktası olması nedeniyle, "ürün tasarımı ve geliştirilmesi" alt süreci performansının tüm bu modern yöntemlerin başarılarında en büyük rolü oynadığı anlaşılmış bulunmaktadır. Ürün geliştirme zamanının azaltılması; esnekliğin, çabukluğun, çevikliğin ve tepkiselliğin bir ön şartı durumuna gelmiştir [Fischer, 2000].

TERSİNE MÜHENDİSLİK (Reverse Engineering) yaklaşımı, ürün geliştirme zamanının azaltılması için işletmelere mükemmel bileşik (eş zamanlı) mühendislik (concurrent/simultaneous engineering) fırsatları sunar. Tersine mühendisliğin temel uygulamaları şu şekilde sıralanabilir [Werner et al, 1998];

Yeni bir parçanın tasarımı,

- Var olan bir parçanın kopyalanması,
- Yıpranmış veya hasar görmüş parçaların kurtarılması, düzeltilmesi ve yeniden tasarlanması
- Model hassasiyetinin ve doğruluğunun geliştirilmesi,
- Nümerik modellerin denetlenmesi.

Kavramsal tasarım ile başlayan geleneksel (Düz) mühendislik sürecinin aksine, Tersine Mühendislik (Reverse Engineering) sürecinde ürün tasarımına, gerçekte var olan bir modelin şekil bilgisinin elde edilmesi ile başlanır. Serbest ve karmaşık yüzeylere sahip olan gerçek parçaların geometrik bilgisinin elde edilmesi tersine mühendisliğin en önemli aşamalarından biridir. Yeniden yapılandırılacak parça modelinin kalitesi, başlangıç modelinin üzerine ölçülen noktaların sayısına, ölçüm tipine ve doğruluğuna, ve ölçüm tekniğine (cihazın cinsi vb) bağlı olarak değişebilir [Kusiak, 1993].

Aşağıdaki bölümlerde, mühendislik ve ürün tasarımı dünyasının, TERSİNE MÜHENDİSLİK penceresinden bir fotoğrafı sunulacak, ana elemanları tanıtılacak ve problemleri incelenecektir.

1.2. Bileşik Mühendislik Ve Ürün Tasarımı Teknolojileri

Bileşik (Eşzamanlı) Mühendislik, çeşitli mühendislik süreçlerinin, geleneksel üretim anlayışından farklı olarak, işlemlerin sırayla yapılması yerine, adından da anlaşılacağı gibi, aynı anda, yani eşzamanlı olarak yapılması esasına dayanır. Tüm tasarım aşamaları, üretimin fonksiyonel bir eniyileme elemanı konumundadır. Bu yöntem sayesinde, tasarımcılar ürünün erken üretim aşamalarında görünüş, tasarım ve üretim durumunu göz önünde tutma imkanı bulurlar. Yani tasarım sürecinde tüm mühendislik çalışmalarını aynı anda ve etkili bir şekilde yürütebilirler. Amerikan Savunma Enstitüsü eşzamanlı mühendisliği şöyle tanımlar [Lin et al, 1998]:

"Ürünlerin eşzamanlı ve entegre üretimi sırasında ilgili işlemleri, üretimi ve üretim sonrasında servisi sağlayan bir disiplin."

Bu yaklaşım üretimin her aşamasındaki çalışanları, üretim zincirinin diğer birimlerinin dışında tutmak yerine; kalite, maliyet ve müşteri istekleri unsurlarının tamamını göz önünde tutmaya yönlendirir. Bu üretim felsefesinin en büyük avantajı, problemleri en aza indirmesidir. Tasarım aşamasında eşzamanlı mühendislik prensipleriyle çalışmak, üretilebilirliğe (prodüktivite) katkıda bulunur ve maliyetleri düşürür. Amerika, Avrupa ve Japonya'da yapılan son çalışmalar, fabrikadaki tasarım uygulamaları, araştırma-geliştirme ve üretim zincirinin servis evreleriyle birleştirilmesine yöneliktir. Yani, eşzamanlı mühendisliğin temel mantığı olan "tasarım işlemleri ile üretim planlarını aynı anda uygulama" ilkesi ile, müşteriye yönelik servis imkanını bağlama, amacı güdülmektedir. Genel bir tanımla mühendislik, "Bir şeyin nasıl doğru bir yöntemle yapılabileceğini öğreten ve bütünsel düşünmeyi sağlayan düşünme sistemi" şeklinde tanımlanır ise, eşzamanlı mühendisliğin tasarım ve üretim elemanlarının aynı anda çalıştıkları etkili bir yöntem olduğu rahatlıkla söylenebilir [Mavromihales et al, 2003].

Eş zamanlı üretim felsefesinde genellikle şöyle bir işlem sırası vardır. Başta ihtiyaçlar temin edilir, ürün özellikleri belirlenir ve tasarım mühendisleri üç boyutlu çalışmalara başlar. Hızlı prototipleme teknolojisi de kullanılarak test için prototipler üretilir, istenilen seviyeye ulaşıncaya en son tasarım şekliyle üretim yapılır. Bu aşamada prototiplerin uygun olup olmadığına üretim mühendisleri karar verir. Bilinen bir gerçek şudur ki, üretim; analizler, temel araştırma işlemleri, kontrollü deneyler, cesur kararlar ve birimler arasında iletişimi gerektiren zor bir süreçtir. Bu süreç ancak birkaç şekilde başarıyla tamamlanabilir. Bu başarı ne tasarım ve üretim birimlerinin sorumluluğu tek başına alması; ne de faaliyetlerini birbirlerinin prensiplerine göre yürütmesi ile kazanılabilir. Başarıya en yakın yol ise; birimlerin üretim sürecinde, etkili bir takım çalışması ile oluşturdukları üretim mantığıyla gidilecektir [Benk et al, 2001].

Eşzamanlı mühendislik sistemi, üretim için birimlerin kararlarıyla birlikte beklentilerinin sentezini de ister. Tasarım elemanlarının amaçları üründen bekleneni veren fonksiyonelliği sağlayan özellikleri geliştirmektir. Üretim birimleri ise yapılan

prototipin özelliklerinde üretim için çalışırlar. Bununla beraber üretim safhasında ki uygulamalar, her iki birimin ortak kararıyla alınır.

Özet olarak, eşzamanlı mühendislik, ürün henüz tasarım aşamasında iken devreye girerek üretim problemlerini çözmek, ürün geliştirme ve üretim süresini kısaltmaya yönelik bir üretim felsefesidir. Bu disiplinde iki ana senaryo olduğu düşünülebilir. Biri, ürün oluşturmak için yeni üretim sistemi planlamak, diğeri ise üretim sistemi oluşturmak için bir ürünü tasarlamaktır. Fakat her iki yaklaşım da ürün ve üretim sistemi arasındaki karşılıklı ve eşzamanlı araştırma-geliştirme mantığına dayanır.

Ürün tasarımı aşamasında, ürün fikrini somutlaştırmak için birçok teknik uygulanabilir. Planlanan ürün her açıdan tasarlanır ve ileride oluşabilecek muhtemel tasarım hatalarının önüne geçilmeye çalışılır. Böylece hatalı ürün üretilmesi daha tasarım aşamasında engellenir. Ürün tasarımı için, Tersine Mühendislik teknolojileri kullanılabilir, Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) yazılımlarıyla bilgisayar ortamında görsel olarak çalışmalar yapılabilir ve Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) teknolojisi sayesinde ürün verileri doğrudan üretim ortamına aktarılabilir. Mevcut BDT bilgisinden yararlanarak Hızlı Prototipleme ile kısa zaman içerisinde ürünün üç boyutlu modelleri elde edilebilir. Bu şekilde tasarım daha görsel bir hale getirilir ve ürünün tasarımında yapılan hataların daha kolay farkına varılabilir. Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) teknolojileri ile üretim ve üretim süreçleri benzeştirilerek (simülasyon) üretim esnasında karşılaşılabilecek problemler önceden kestirilebilir [Shum, 1997].

Bir diğr eşzamanlı mühendislik yaklaşımı olan X için Tasarım (Design for X) kullanılarak yeni ürün geliştirme süreciyle ilgili üretilebilirlik, test, servis yeteneği vb. kavramlar tasarımda ön plana çıkarılabilir. Bunların yanı sıra, Tasarım Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect Analysis) kullanılarak tasarımdaki muhtemel hatalar bulunabilir ve hataların nedenlerini ortadan kaldırmak için yapılması gereken önleyici faaliyetlerin tespit edilmesi sağlanabilir. Değer Analizi (Value Analysis) kullanılarak ürünün kendinden bekleneni düşük maliyetle yapmasını sağlayacak malzeme, imal teknikleri ve üretim süreçleri bulunabilir ve tasarımdaki gereksiz unsurlar bu şekilde elenebilir [Motavalli, 1998].

Bütün bu yöntemler ile birlikte, Dağınık Yapay Zeka Uygulamaları ile karmaşık ve dinamik tasarımlar birbirleriyle etkileşimli bileşenler kullanılarak oluşturulabilir. Burada, her bileşen tasarımda üstüne düşeni yapar ve tasarımcıyı optimum tasarıma götürebilir. Tasarım ve üretim arasında çok güçlü bir entegrasyon aracı ve ortak dil olan STEP standardı ise bütün tasarımların ortak bir dille ifade edilmesine olanak sağladığı için ürün tasarımının vazgeçilmezleri arasındaki yerini her geçen gün daha da sağlamlaştırmaktadır.

Günümüz üretim dünyasının yükselen bir değeri olan EŞZAMANLI MÜHENDİSLİK felsefesi çerçevesinde kullanılan ve yukarıda bir kısmına değinilen onlarca yöntem ve teknoloji içerisinde tasarlanan modellerin görselleştirilmesi ve ön modellerini elde edilmesi büyük bir önem arz eder. Bunu sağlayan yetenekleri tasarımcılara sunan TERSİNE MÜHENDİSLİK ve ilgili teknolojilerinin doğru anlaşılması ve kullanılması, tasarımcıların eline bir yol haritası verilmesi gereklidir [Chivate et al, 1995].

1.3. Tersine Mühendisliğin Genel Olarak İncelenmesi

Tersine Mühendislik terimi kolaylıkla anlaşılan anlamlara sahip değildir ve çoğu kez karıştırılır. Örneğin, donanım tersine mühendisliği, bilgisayar parçalarının de-monte edilerek nasıl çalıştığını öğrenilmesi ve aynılarının yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Yazılım tersine mühendisliği ise, bir programın kodlarını çözmek ve programın bazı kısımlarını kopyalamak, programın lisans kodlarını kırmak gibi yasal olmayan amaçlarla da kullanılmaktadır. Bu işlemler pek çok ülkede olduğu gibi, ülkemizde de yasal değildir ve "fikir ve sanat eserlerinin korunması" ile ilgili kanunlar uygulamadaki sorunlarıyla birlikte yürürlüktedir [Peng and Loftus, 2001].

Tersine Mühendislik bir makineyi veya nesneyi, kopyalamak veya geliştirmek amacıyla veya çalışma prensibini belirlemek amacıyla parçalara ayırmak olarak da tarif edilmektedir. Bu tarif, özde yanlış olmamakla birlikte eksiktir. Örneğin otomobil endüstrisindeki bir firmanın, rakip firmanın otomobilini alıp bunu parçalara ayırması, daha sonra her bir parçayı inceleyip test ederek, kendi otomobilini geliştirmek için bu parçalardan faydalanması tersine mühendisliktir ve

yasal olabilir. Ancak, parçaların aynı prensip ve yöntemler kullanılarak taklit edilmesi etik olmadığı gibi, eğer rakip firma tarafından patent ile korunmuş ise hırsızlıkla eş değerdir. Bu nedenle, NEDEN-SONUÇ ilişkisinin çok iyi kurulması gereklidir [Pennell and Winner, 1989].

Vaktiyle ülkemizde takım tezgahları üreten bir fabrika, Uzakdoğu'dan getirdiği bir bilgisayar kontrollü (CNC) torna tezgahını en küçük parçasına kadar sökmüş ve taklit etmeye çalışmıştı. Ancak sonuç hüsrana oldu. Taklit etmeye çalıştıkları tezgahı geliştirmek şöyle dursun, taklit bile edememişler ve iflasın eşiğine doğru sürüklenmişlerdi [Kapucu ve ark, 2001]. Bu sonuç, bu yaklaşımın tek başına yeterli olmadığını, modern teknoloji ve bütünleşik imalat felsefesi olmadan başarıya ulaşamayacağının bir örneği olarak tarih sayfalarındaki yerini almıştır. Siz bir makinenin, tenekelerinin ve dişlilerinin aynısını yapabilirsiniz, ama Murat 124 şasına Mercedes motoru koyamazsınız. Oysa, CNC tezgahların mekanik aksamın dışında bir de kontrol üniteleri vardır. Bedenlerin yanında bir de ruhlar vardır. O ruhu veremezseniz, beden hareketsiz bir kütleden ibaret kalır.

Asıl Tersine Mühendislik, var olan bir nesnenin tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda, nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla, ürünün üç boyutlu uzayda sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesidir. Bu yönüyle, TERSİNE MÜHENDİSLİK uygulamalarının en önemli elemanları şunlardır:

- Sayısallaştırıcı/ tarayıcılar
- Hızlı prototipleme makineleri
- Tersine mühendislik yazılımları

1.4. Sayısallaştırma ve Tersine Mühendislik

Nesnelerin üç boyutlu ölçümleri kalite kontrol uygulamaları için vazgeçilmez bir unsurdur. Parça üzerindeki unsurların paralellliği, dikliği ve boyutsal toleranslarının doğruluğunun kontrol edilmesi bu uygulamalar içerisinde yer alır. Bununla birlikte, bu uygulamalar genellikle geleneksel üretim sürecinin bir parçası olarak ortaya çıkar. TERSİNE MÜHENDİSLİK ise bunun bir adım ötesidir. Aynı

cihazlar üzerinde, sadece ÖLÇÜM değil, tarama ve sayısallaştırma da yapılabilir. Üç boyutlu sayısallaştırma işlemi, var olan fiziksel bir objenin üç boyutlu bilgisayar modelini elde etme yöntemidir. Objeden elde edilen ve henüz işlenmemiş olan bu bilgi, tersine mühendislik yazılımları ve uygulamaları sayesinde ürün geliştirme sürecinin ileriki aşamaları için kullanılabilir hale getirilmektedir. [www.cadem.com.tr, 2005]

Tersine mühendislik, 3 boyutlu sayısallaştırma tekniklerini uygulamak suretiyle bir iş parçasına ait nokta bulutu verilerinin toplanmasına ve dolayısıyla CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modelinin oluşturulmasına imkan tanımaktadır. Tersine Mühendislikte ölçüm ve sayısallaştırma/tarama uygulamaları içerisinde kullanılan cihazları (koordinat ölçme makineleri, sayısallaştırıcı/tarayıcılar vb.) iki ana grupta toplamak mümkündür;

- Temas ederek (Probu) ölçüm ve sayısallaştırma/tarama yapan cihazlar
- Temas etmeden ölçüm ve sayısallaştırma/tarama yapan cihazlar
- Lazerli cihazlar
- Kameralı (Topometrik Görüş) sistemleri

Probu ölçüm cihazlarında, ölçüm kolunun üzerinde elmas sertliğinde bir küre mevcuttur. Bu küre parçanın yüzeyinde, koordinatları belirlenmesi istenen noktaya değdiği anda, kolun üzerindeki koordinat belirleyici sistemi ile, parçanın o noktadaki konumu, iş parçasının geometrik ve boyutsal verileri üç boyutlu uzayda (x, y, z) elde edilmekte ve cihazın üzerinde bulunan bilgisayara aktarılır. Probu sistemin dezavantajı, ölçüm alınabilmesi için probun yüzeye değme zorunluluğunun olmasıdır. Bu zorunluluk parçanın karmaşık şekilli olması durumunda, istenen değerlerin alınamaması sonucunu doğurabilir.

Lazerli sistemlerde, ölçüm/sayısallaştırma/tarama bir lazer hüzmesi kullanılarak gerçekleştirilir. Parçanın ölçüm yapılmak istenen bölgelerine yollanan lazer ışını, kaynaktan gidiş ve dönüş zamanının, ışının hızıyla çarpılması sonucu otomatik olarak hesaplanır. Koordinatlar yine kolun üzerindeki bir adım koordinat belirleyici sayesinde alınır. Lazerin doğrusal hareket ettiği dikkate alındığında düz-yüzey tabir edilen yumuşak yüzeyli (Arabaların kaportaları vb.) yüzeyler için oldukça idealdir.

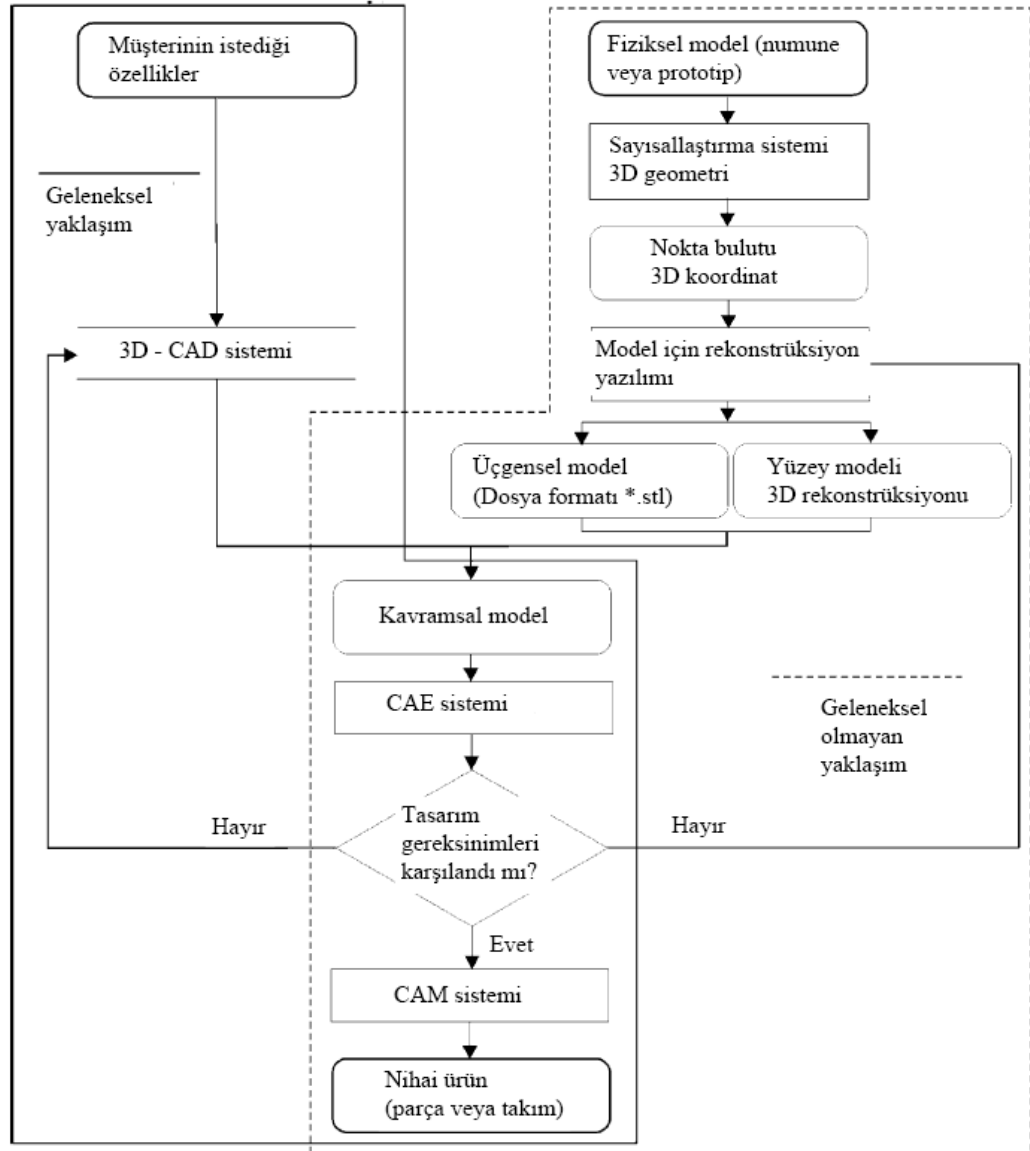
Ancak, karmaşık parçalar için, önerilen bir sistem değildir. Bunun nedeni ise lazer ışınının geri dönmesini söz konusu olamayacağı karmaşık şekilli ve dahili (delik içinde) unsurları bulunan nesnelerin katı modelinin oluşturulması yada ölçümlerinin yapılmasında neden olduğu zorluktur. Bu sistemde veri toplanması, ilerleyen bir lazer ışınının, kusursuz üçgen tekniği olarak adlandırılan bir yöntem ile geri dönmesi sayesinde sağlanabilir [Song and Kim, 1997].

Topometrik (Kameralı) ölçüm/sayısallaştırma/tarama sistemlerinde, bir üç-ayağın üzerine sabitlenmiş olan ölçüm/sayısallaştırma/tarama kafası, hedef parçanın yaklaşık 70-100 cm kadar ön tarafında tutulur. Ölçüm/sayısallaştırma/tarama sırasında parçanın yüzeyine kenar oluşumlarının izdüşümlerinin yansması sağlanır ve bu izdüşümler, ölçüm kafası içerisine sabitlenmiş olan bir kamera tarafından kaydedilir. Dijital görüntü işlemcisinin yardımıyla üç boyutlu koordinatlar yüksek bir hassasiyetle hesaplanır. Nesnenin tamamının sayısallaştırılması/taranması, birçok ayrı ölçümlerin bir araya getirilmesi ile oluşur ve bazen birden fazla görüş açısı veya bir başka deyişle kamera kullanılması gerekebilir. Günümüzde, computer-vision yazılım ve donanım teknolojisinin gelişimi zor (serbest şekilli veya oyulmuş yüzeyler) yüzey ve unsurlara sahip nesnelerin modellerinin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır [Yau, 1997].

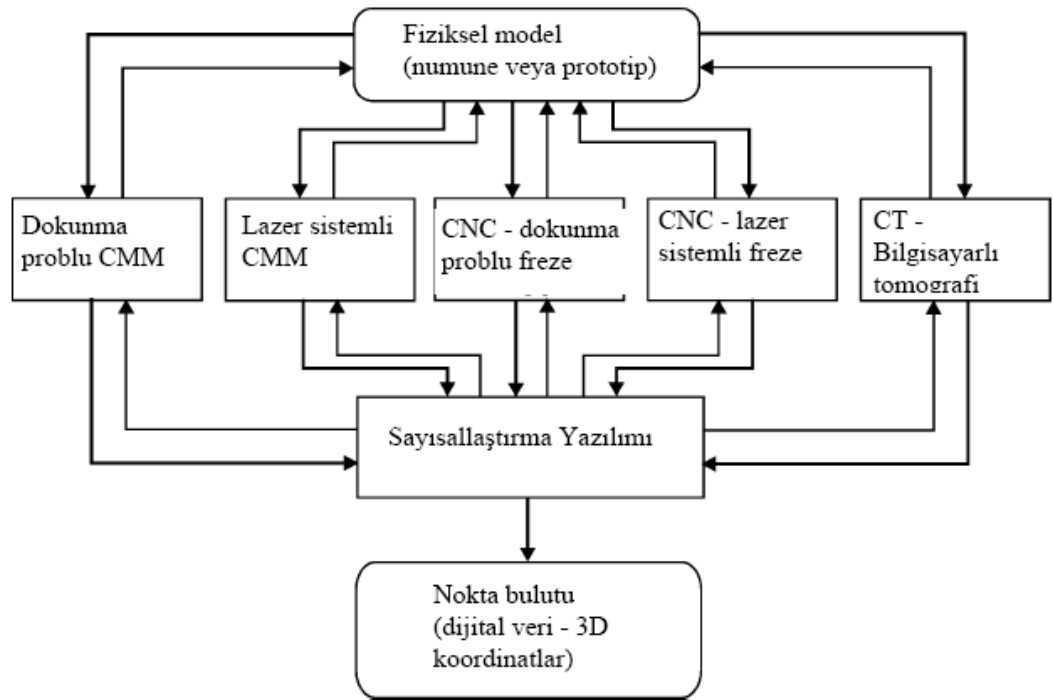
İş parçasına temas etmeden çalışan algılayıcılarla ölçüm/sayısallaştırma/tarama işlemi uzaktan çok kısa bir sürede tamamlanabildiği halde, mekanik problemler gibi iş parçasına temas eden algılayıcılar kullanıldığında işleme çevrimi durdurulup konumlama yapılması gerektiğinden, ihmal edilemeyecek bir zaman kaybına neden olmaktadır. Fiyat bakımından incelendiğinde, iş parçasına temas etmeyen algılayıcıların diğerlerine göre oldukça ucuz olduğu görülecektir [Kruth and Kerstens, 1998].

Temaslı/temassız sistemlerin hepsi de temelde aynı prensiple çalışırlar. Hedef bir NOKTA BULUTU elde etmektir. Daha sonra bu nokta bulutu uygun yazılımlar ile birlikte anlamlandırılır, uygun yüzeyler türetilir ve Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim (BDT/BDÜ) süreçlerinde kullanılabilecek uygun bir formata dönüştürülür. Böylelikle nesnenin model verileri bilgisayar üzerine aktarılmış olur. Elde edilen yüzey veya katı model üzerinde istenilen değişiklik veya geliştirmeler yapılabilir.

Model son halini aldıktan sonra, modelin üretimi için gerekli takım yolları ve CNC parça programı elde edilebilir. Ancak, bu son işlemten önce bilgisayar üzerindeki modellerin HIZLI PROTOTİPLEME makineleri ile ön-gerçek modellerinin oluşturulması önerilir. Şekil 1.1’de mühendislik ürünleri için imalat şeması gösterilmektedir. Şekil 1.2’de ise 3D (üç boyutlu) geometri ve veriler için sayısallaştırma teknikleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.1; Mühendislik ürünlerinin imalatı şeması



Şekil 1.2; 3D geometri ve oluşturulan veriler için sayısallaştırma teknikleri

Tersine mühendislik prosesi üç aşamaya ayrılabilir:

- sayısallaştırma
- veri bölme
- veri uydurma

Tersine mühendislik metodolojisinin ilk gayesi fiziksel bir modelden kavramsal bir model (mesela üçgenlere ayrılmış yüzey) oluşturmaktır: bir numune (parça veya takım) veya prototip. Bu bağlamda model rekonstrüksiyonu için özel yazılım ile desteklenen 3 boyutlu tarama (sayısallaştırma) gereklidir.

3 boyutlu tarama (sayısallaştırma) tanımlanmamış bir üç boyutlu yüzeyden veri toplama prosedir. Tarama prosesi sırasında bilinmeyen yüzey boyunca analog bir tarama probu (temaslı veya temassız) ileri geri kumanda edilir. Bu proses sırasında sistem nümerik veri formunda yüzey ile ilgili bilgileri kaydeder – bir nokta bulutu matrisi oluşturur (3D koordinatlar). Bu veri daha sonra bir kopya veya şeklin

geometrik varyantını makinede işlemek amacıyla bir CNC programı oluşturmak için kullanılabilir [Kopac and Sokovic, 2003].

Alternatif olarak veri bir CAD/CAM sistemine daha fazla prosesleme için muhtelif formatlarda gönderilebilir [Sokovic, 2004].

Bir parça sayısallaştırılırken aşağıdaki faktörler göz önüne alınmalıdır [Herbertson, 2003]:

- Modelden hangi malzemeden imal edilmiştir?
- Modelin fiziksel durumu nedir?
- Fikstür gereksinimi
- Hizalama gereksinimleri
- Sayısallaştırıcı hataları
- Mevcut sayısallaştırıcılar
- Sonuç geometrik modelinin gereken kullanımı nedir?

Bu faktörler arasında en sonuncusu muhtemelen en önemlisidir ve pek çok durumda yeteri kadar dikkate alınmaz.

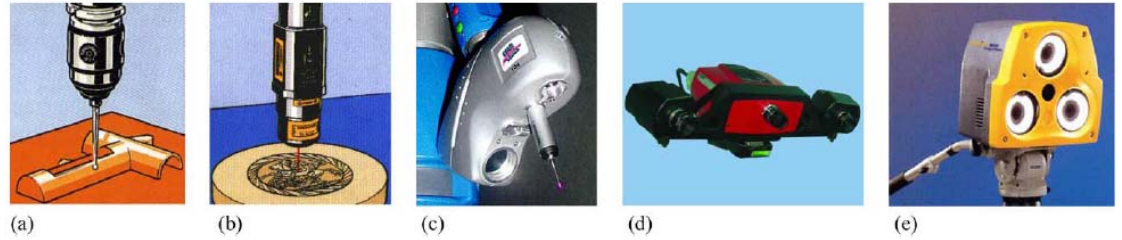
1.5. Sayısallaştırma ve tarama arasındaki farklar

Sayısallaştırma ve tarama terimleri genellikle aynı prosesi tanımlamak için kullanılır. Geleneksel olarak sayısallaştırma terimi dokunma tetikli bir prob kullanılarak bir yüzeyden farklı noktaları toplama prosesi için kullanılır. Bununla beraber veri toplamada lazer, kamera, görüntüleme ve analog prob sistemleri gibi yeni teknolojilerin kullanılmaya başlaması ile sayısallaştırma terimi tanımlanmamış yüzeylerden veri elde etme için jenerik bir tanımlama olarak kullanılmaya başlanmıştır [Renishaw, 2004].

Dijital nokta bulutu farklı sayısallaştırma teknikleri ile elde edilebilir; bunlar iki ana grupta toplanabilir:

- Mekanik teknikler (fiziksel temas sensörleri)
- Optik teknikler (obje ile temas etmeden)

İlk grupta Şekil 1.3b’de gösterildiği gibi normalde bir koordinat ölçüm cihazından (CMM) veya fiziksel dokunma probu sensörü ile donatılmış bir CNC-frezeleme makinesinden (Retroskan veya Renscan – Renishaw, İngiltere); ikinci grupta da Şekil 1.3b’de verilen bir CMM’den veya Renishaw, Metris LC Mitutoyo, Comet T-Scan Steinbichler – Almanya lazer ışını probu veya Şekil 1.3c’de gösterilen temassız koordinat ölçümü için Kreon – Fransa ve Şekil 1.3d’de verilen ATOS II GOM mbH – Almanya, Optigo 200 CogniTens – İsrail optik sensörleri ile donatılmış CNC frezeleme makinelerinden yararlanılır. İkinci grup için obje geometrisinin iç kısmını da görüntüleyen bilgisayarlı tomografiden de yararlanılabilir. [www.renishaw.com,2005].



Şekil 1.3; Sayısallaştırma ekipmanları için kullanılan farklı prob sensörleri:

(a) fiziksel dokunmalı prob sensörü, (b) lazer ışını probu ve (c-e) optik sensörler (CCD kameralar)

Tablo 1.1’de Farklı tarama sistemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 1.1; Farklı tarama sistemlerinin avantajları ve dezavantajlarının karşılaştırılması

Tarama tipi	Avantajları	Dezavantajları
<i>CCD kameraları</i>	Hızlı İki veya üç kameranın eşzamanlı olarak kullanılması mümkün Parçaların renklerine karşı duyarsız (ilave SW-kontrollü ışık) Temassız yöntem; yumuşak malzemelerin de taranması mümkün	Yüksek ekipman fiyatı Hassasiyet kamera uzaklığına bağlı olarak lineer olarak azalır Tarama açısı parça yüzeyinden bağımsız olarak eşittir; çok dik açılarda ölçüm çok bozulur Kamera ile tarayarak görünür resmin oldukça net olması gerekir; yakın ve uzak yüzey detaylarının eşzamanlı olarak taranması farklı odak mesafelerine göre sonuçlarda lineer sapmaya yol açar Islak ve yağlı parçaların taranmasında sonuçlar oldukça bozuk çıkar

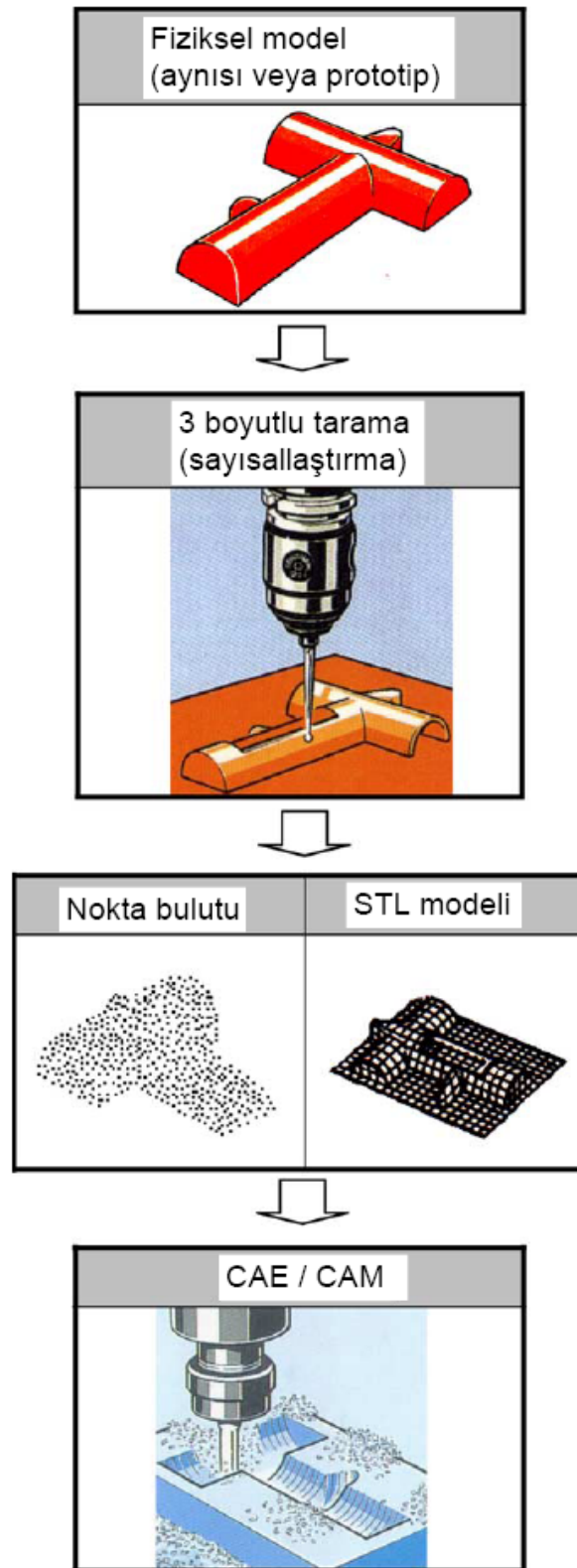
	Özel eşeksenli ışıklandırma durumunda Z ekseninde ufak çapları ve derin bölgeleri taramak mümkündür. 1 mm²'lik oldukça ufak alanları taramak da mümkündür (bir tarama yeterlidir) – hassasiyet birkaç mikrometre mertebesindedir Düz yüzeylerin taranması oldukça hızlıdır (profil projektörü prensibi)	Toz taramada hatalara yol açar
<i>Lazer</i>	Z ekseninde hassas ve hızlı tarama (0.001 mm veya daha iyi) Temassız yöntem Yumuşak malzemelerin taranması mümkündür (ayrıca sıvıların)	Oldukça yüksek ekipman fiyatı Yansıtıcı malzemelerin taranması mümkün değildir X ve Y eksenlerinde tarama oldukça yetersizdir (0.035-0.060 mm) İlave yansıma nedeniyle çentikli

		bölgelerin veya oldukça dik yüzeylerin taranması mümkün değildir Hava akımına veya havadaki toza karşı duyarlıdır
<i>Temaslı (klasik)</i>	Tüm eksenlerde oldukça hassas (tarama ekipmanına bağlıdır) Geometrik olarak bilinen parçaların oldukça hızlı taranması mümkün Koni ve benzeri parçaların çok hassas taranması mümkün Manuel veya otomatik tarama mümkün Elle tarama ekipmanı uçak, gemi, büyük makineler ve cihazlar gibi büyük parçaların taranması için uygun	Yumuşak malzemeler için uygun değil Bilinmeyen yüzeylerin taranması mümkün değil veya tarama prosesi çok yavaş ve hassasiyet düşük
<i>Temaslı (Renishaw Cyclone 2)</i>	Tüm eksenlerde çok hassas (0.001 mm)	İğnenin minimum çapı 0.3 mm değerindedir; yüzey pürüzlülüğünün taranması mümkün

	Nispeten düşük cihaz maliyeti Farklı yüzeyler için farklı stiller kullanmak mümkün Bilinmeyen yüzeyleri bilinenler ile benzer hassasiyetle taramak mümkün Bilinmeyen dik yüzeyleri çok hassas taramak mümkün (açı 90 dereceye çok yakın) Yüzeydeki yağ, sıvı veya toz tarama prosesini engellemez Tarama modülü 3 boyutlu ölçüm gibi çalışır – dik yüzeyleri taramada problem çıkmaz Tarama hızı kendini otomatik olarak yüzey pürüzlülüğüne adapte eder – tarama değerleri (X, Y ve Z eksenlerinde) çok hassastır; CAD çizimleri ile doğrudan, hassas bir karşılaştırma mümkündür (çözünürlük ve hassasiyet 350 mm uzunluğundaki prob ile ± 0.002 mm değerindedir) Uygun bir kontrolör ile birleştirilerek her ölçüm tablasında SW tarama kullanmak mümkündür; tarama hızı klasik konfigürasyona göre 20 kat hızlıdır çünkü ölçüm için ilave bir program yazmaya gerek yoktur	değildir Yumuşak malzemelerin taranması için uygun değildir İğne malzemesi aşınmaya karşı dirençli olsa da iğne yüzeyi zamanla aşınır Tarama hızı düşüktür (temassız tarama sistemlerine kıyasla)
--	---	---

1.6. Sayısallaştırma Verilerinden 3D-CAD Tekrar Tasarımı

X, Y ve Z koordinatlarındaki dijital nokta bulutu verileri gibi 3 boyutlu tarama esnasında oluşturulan veriler, Şekil 1.4’de gösterildiği gibi üçgensel bir yüzey geometrisi veya CAD yüzey verisi tarafından desteklenen kavramsal bir modele dönüştürülmek üzere bir tekrar model oluşturma sistemine gönderilir. Kavramsal modeli tamamlarken sonraki prosedürler geleneksel sıralamaya normalde bir CAD sisteminden yararlanan geometrik modelleme ile başlayan ürün geliştirme açısından benzer.



Şekil 1.4; Tersine mühendislikte proses sırası

1.6.1. Hangi Tip Sensör Kullanılmalıdır

Pek çok uygulama için hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesi bakımından en iyi sonuçlar temas sensörleri kullanılarak elde edilir. Bununla beraber çok yumuşak ve kırılğan malzemelerin (ve yansıtıcı olmayan yüzey) taranması gerektiğinde temassız, lazer veya optik sistemler kullanılabilir (Renishaw, Kreon, ATOS II, Optigo,...).

Temas sistemleri mevcut temassız sistemlerinin pek çoğuna göre pek çok önemli avantaja sahiptir.

İdeal bir tarama cihazı kamera, lazer ve uygun bir kontrolörle desteklenen temas probunun bir kombinasyonu olmalıdır.

1.6.2. Döküm Parçaları ve Takım Rekonstrüksiyonu için Tersine Mühendislik

Otomotiv endüstrisinde döküm parçalarının AR-GE çalışmalarında tersine mühendislik metodolojisinin kullanılması bir döküm parçasının optimize edilmesine ve ilk aşamada kum dökümü için ilgili seri takımların imal edilmesine izin verir. İkinci aşamada mekanik tasarım bilgisini veya tasarıma dayalı değişiklikleri çıkarmak için tersine mühendisliğin kullanılması mümkündür.

1.6.3. Optik Ölçme Yöntemleri ve Sayısallaştırma

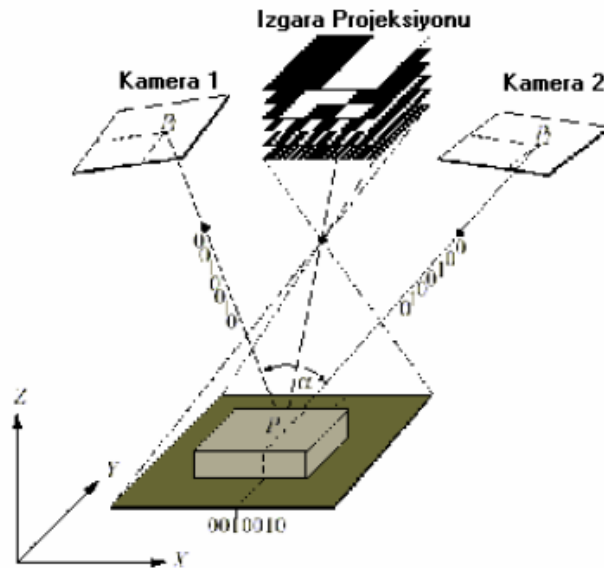
Optik 3D sayısallaştırma işlemleri, genellikle var olan bir objenin 3D modelini oluşturmak, objeyi çok küçük detaylarına kadar modellemek ve gerçek yapıyı 3D modeliyle ilişkili olarak haritalamak gibi amaçlar için uygun düşmektedir.

İş parçalarından sayısal veri toplamak amacıyla uygulanan teknikler dokunmalı ve dokunmasız yöntemler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Dokunmasız yöntemlerden ızgara projeksiyonu ve lazer ölçme yöntemi Şekil 1.5’de verildiği üzere en çok kullanılan optik veri toplama teknikleri olarak tanınmaktadır.



Şekil 1.5; Sayısallaştırma yöntemlerinin sınıflandırılması

Izgara projeksiyon yöntemi, siyah ve beyaz şerit halindeki desenlerin ölçülecek yüzey üzerine bir sıra halinde projeksiyonu prensibine dayanmaktadır. Bu desenler Şekil 1.6’da gösterildiği gibi bir LCD projektörü vasıtasıyla mümkün olduğunca eşit iki parçaya bölünen siyah ve beyaz çizgilerden oluşmaktadır [Broggiato et.al, 2001].



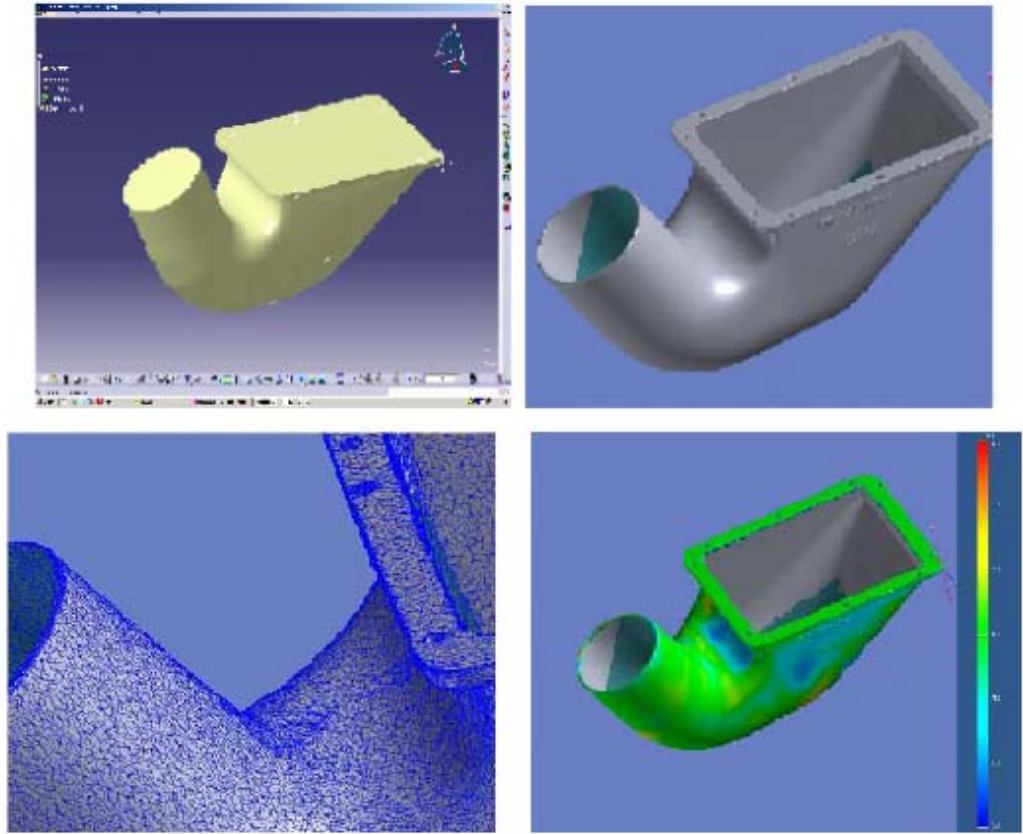
Şekil 1.6; Izgara projeksiyonu

3D sayısallaştırma çözümlerinde iş parçasının yüksek çözünürlükteki CCD kameralar vasıtasıyla çeşitli açılardan elde edilen görüntüleri gelişmiş fotogrametri tekniklerini kullanan bir yazılım ile IGES ve STL gibi üç boyutlu standart veri formatlarına dönüştürülmektedir. Bu sistemler, yüksek hassasiyet, kullanım kolaylığı ve hızı ile dünya çapında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [www.cadem.com.tr, 2005].

CCD kameralar bir video kamera türüdür. Film yerine lensler arkasına ışık yoğunluğunu elektronik sinyallere dönüştüren ve bunu direkt bilgisayara aktaran bir CCD (Charge Coupled Device) çip yerleştirilmiş bulunmaktadır. CCD kamera, küçüklüğü, hassasiyeti, sabitliği, düşük fiyatı ve uzun servis ömrü ile tercih edilen bir donanımdır [www.optpn.co.jp, 2006].

Basit bir kullanım özelliğine sahip olan optik ölçme sistemleri, az yer kaplamakta ve ölçme kafası ile birlikte oturaklı bir yapı şekli göstermektedir. Yalnızca saniyeler süren bir tarama işleminin ardından hassas bir veri kalitesi elde edilebilmektedir. Özellikle son zamanlarda sağlanan gelişmeler sayesinde söz konusu hassasiyet derecesi giderek artış göstermektedir. Elde edilen tarama verisi bütünüyle ve verimli olarak işlenebilmektedir. Her bir ölçüm işlemini sonunda veri bütünlüğü açısından geri bildirim alınabilmekte ve geometrik özellik tespiti gerçekleştirilebilmektedir. Çevrim içi görüntüleme yapılmak suretiyle çekim sırasında parça veya kameranın titremesinden oluşan hatalar anında tespit edilerek yazılım tarafından ölçümün tekrarlanması tesviye edilmektedir [www.gom.com, 2005].

Yapılan ızgara projeksiyonu uygulamasında elde edilen sayısallaştırma verisi iş parçasının daha önceden çizilmiş CAD verisi, nokta bulutunun ağ yapısına dönüştürülmüş hali ve renkli doku haritasının gösterildiği görüntüler Şekil 1.7’de verilmiştir.

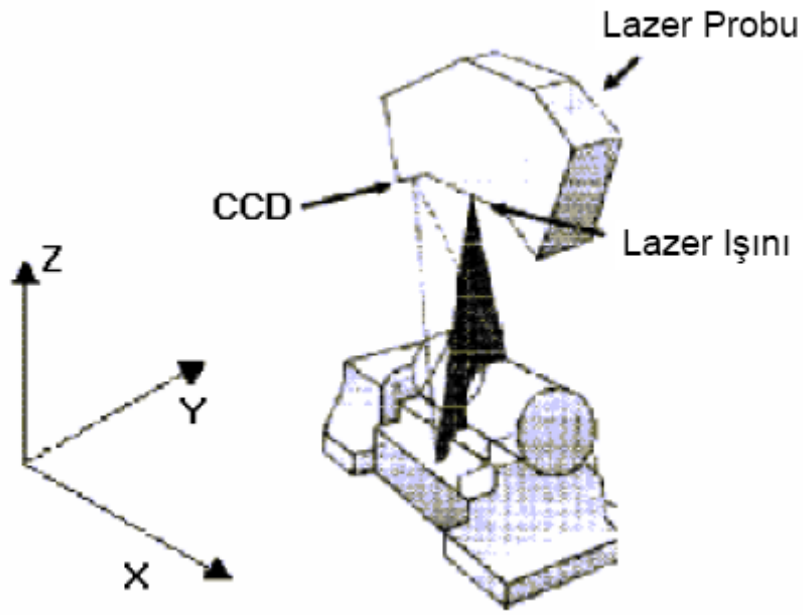


Şekil 1.7; Parça CAD verisi ile ölçüm verisinin görüntüleri ve parçanın ağ yapısı ve renkli doku haritası

Dokunmasız lazer tarama yöntemi, lazer üçgenleme prosesi ile çalışmaktadır. Bu proseste lazer çizgisi sayısallaştırılacak yüzey üzerine lazer kafasından yaklaşık 63.5 mm uzunluğunda yansıtılmaktadır.

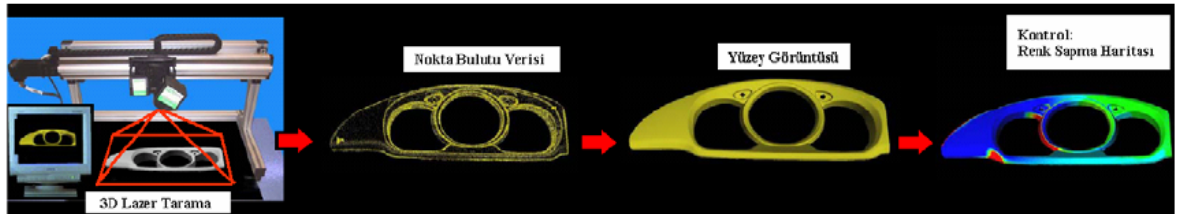
CCD kameraları lazerden belli uzaklıkta olan parça üzerinden yansıyan lazer ışığını yakalamaktadır. Lazer çizgisinin X, Y, Z koordinatları trigonometrik olarak hesaplanabilmektedir.

Şekil 1.8’de lazer tarama mekanizmasının şematik görünümü verilirken Şekil 1.9’da lazer sayısallaştırma yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil.1.8; Lazer tarama mekanizmasının şematik görünümü

Kullanılan sensöre ve yazılım ayarlarına bağlı olarak, 650'den fazla ve birbirinden bağımsız veri noktası tek bir lazer çizgisinde toplanabilmektedir. Taranmış obje bundan böyle birkaç yüz noktadan milyonlarca noktaya varan ve genellikle nokta bulutu olarak tarif edilen söz konusu veri noktaları ile temsil edilmektedir.



Şekil.1.9; Lazer sayısallaştırma yöntemi

Parça üzerinde taranan noktaların sayısı parçanın büyüklüğüne ve detaylarına bağlıdır. Çok detaylı parçaları tarif etmek için daha fazla noktaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Lazer tarama teknikleri geleneksel tekniklerden daha hızlı veri toplayarak sayısallaştırma proseslerini kısaltmaktadır. Lazerle tarama, kosinüs hatalarından, mekanik prob ötelemelerinden ve prob büyüklüğü ve şeklinden kaynaklanan sorunları bertaraf etmektedir.

Lazer ile tarama yapmanın birinci avantajı prosesin dokunmasız, hızlı ve koordinat yerlerinin direkt olarak taranan obje geometrisi üzerine düşen ışıktan alınması şeklinde özetlenebilir. Bu özellik, hassas ve kırılgan parçaların ölçülmesi ve özellikle taranan koordinat yerlerinin yüzey koordinatları boyunca eğrilerin ve yüzeyin oluşturulmasında CAD/CAM uygulamaları için kullanışlı olmasını sağlamaktadır [www.laserdesign.com, 2005].

Lazer ışınının yüksek çözünürlüğü ve inceliği sayesinde aynı zamanda mekanik problemlerin giremeyeceği detaylı yüzey geometrilerinden istenilen hassasiyette veri alınması sağlanmaktadır. Bu sebeple otomotiv, uzay, tıp, spor ekipmanları ile oyuncak, elektronik ve mücevher sanayinde sıkça kullanılmaktadır.

Tüm lazer tarama tekniklerinde ışık kaynağı olarak birer lazer ışını kullanılmaktadır. Ancak bu tür ışık kaynakları bazı objeleri sayısallaştırmada her zaman için uygun düşmemektedir. Projeksiyon yönteminde ise ışık kaynağı olarak kesinlikle güvenli olan sıradan halojen beyaz ışık kullanılmaktadır.

Lazer tarama teknikleri kullanılarak elde edilen ilk veri bir nokta veya bölge profili olabilmektedir. Bir nesnenin tüm yüzeyini kaplamak için mekanik ve optik tarayıcılar birlikte kullanılabilir. Bu ardışık veri toplama yönteminde genelde düşük veri toplama hızları söz konusudur.

3D sayısallaştırma tekniğinde ışık projeksiyonu ile saniyede 300.000 (1 milyona kadar çıkabilir) nokta verisinin elde edilmesini sağlayan paralel veri toplama tekniği kullanılmaktadır.

Lazer yoğunlaştırılmış tek renkli ışık kaynağıdır. Lazer tarama tekniği benekler yüzünden problem oluşturmaktadır. Benekler, hatalı verinin temel kaynağı olup lazer kaynağına rasgele karışmasıyla probleme neden olmaktadır. Bunlara

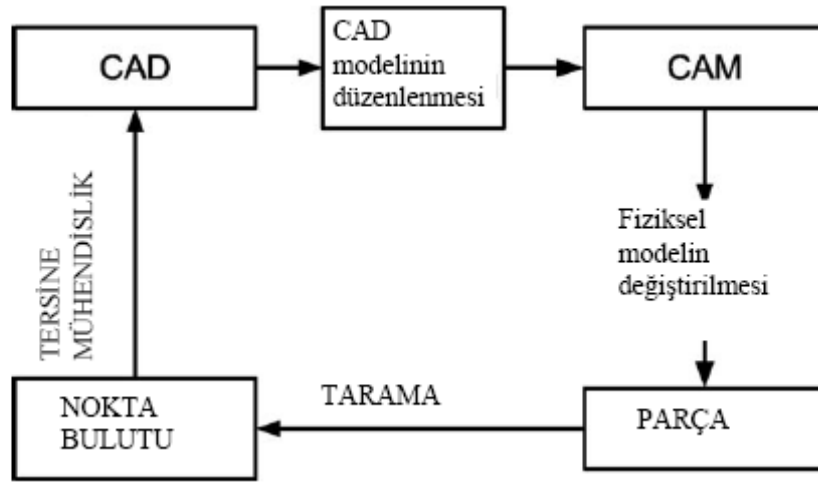
ilaveten, tek bir lazer kaynağı kullanılarak renkli doku verisinin oluşturulması olanaksızdır. Lazer tarama tekniğinde ikinci bir kamera kullanılmasının nedeni söz konusu renkli doku verisinin oluşturulma isteğine dayanmaktadır.

Izgara projeksiyonu 3D sayısallaştırma yönteminde 3D geometrik ve renkli dolu verisi için bir tek kamera kullanmaktadır. Buradaki çift kameralı veri toplama yöntemi doğru bir şekilde 3D geometrisiyle ilişkili renkli doku haritasını oluşturmayı mümkün kılmaktadır.

Optik ölçme göz önüne alındığında çözünürlük ve hassasiyet arasındaki farkın tanımlanması gerekmektedir. Çözünürlük sensörün algılayabildiği mesafedeki en küçük değişiktir. Hassasiyet ise taranan objenin optik kalitesinin bir fonksiyonudur. Eğer obje mat bir yüzeye sahipse hassasiyet ve çözünürlük hemen hemen aynı olacaktır. Eğer obje parlak bir yüzeye sahipse lazer ışını CCD üzerinde parlayıp titreme oluşturmaktadır. Bu da günümüzde lazer verisinde kullanılan gelişmiş yazılımlarla artık filtre edilebilmekte ve oluşan parazitler azaltılabilmektedir. Diğer taraftan parça ışığı emen çok koyu renkte bir yüzeye de sahip olabilir. Bu durumda sensöre yeterli miktarda ışık dönemeyecektir. Bu dezavantajın ortadan kaldırılması için tarama işlemlerinden önce objelerin yüzeyleri spreylere boyanarak açık gri tonlarda ve ince tabakalar halinde boyanmalıdır [www.laserdesign.com, 2005].

İmalat sırasındaki muayene işlemleri göz önüne alındığında optik ölçme cihazları için zaman döngüsünün kısa ve dolayısıyla işlemin hızlı olmasından dolayı imalat hatlarındaki çevrim içi ölçümler için kullanılmaktadır. Optik ölçme cihazları ile kaporta tetkiklerinde parça yüzeyinin tümü taranmakta; böylelikle alt ve ana montaj işlemleri daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, halen sanayimizde gerçekleştirilen İPK çalışmaları (istatistiksel proses kontrol) için yaygın bir şekilde koordinat ölçme tezgahları kullanılmaktadır. Çünkü bunların ölçme prensibi alınan vektörel ölçme verisinin sağladığı hassasiyete dayanmaktadır. Burada optik ölçme cihazlarının kullanımından kaynaklanan başlıca kaygı ise sağlayabilecekleri hassasiyet ve ölçme tesirleri yönünden olmaktadır.

Tersine mühendislik uygulamaları ile parça geliştirme ve tasarım faaliyetleri yönünden bakıldığında iş parçalarının kameralar aracılığıyla görüntülenmesi suretiyle elde edilen sayısal verilerin siz konusu işlemlerde pratik bir şekilde ve başarıyla kullanıldığı görülmektedir. Ancak sanayimizde bu tür ölçme cihazlarının kullanımı henüz gereken ölçüde yaygınlaşmamıştır [Broggiato et al, 2001]. Aşağıdaki şekilde tersine mühendisliğin ürün geliştirmede kullanılması esnasında uygulanan aşamalar gösterilmektedir.



Şekil.1.10; Tersine mühendisliğin ürün geliştirmede kullanılması

Hassas ve etkili bir 3 boyutlu ölçüm sağlamak için lazer ışın problemleri [Fan, 1997; Wang et.al, 2002] ve yapısal ışın sensörleri [Zhang and Wei, 2002; Zhang and Djordjevic, 1999] gibi temassız sensörler geliştirilmiştir. Lazer ışın sensörü sıfır okuma noktasından bir uzaklık değeri veren 1 boyutlu sensör olarak sınıflandırılabilirken yapısal ışın sensörü lazer düzleminde 2 boyutlu koordinat sistemine sahip olan ve toplanan verilerin iki koordinata sahip olduğu 2 boyutlu bir sensördür. Bununla beraber bu sensörler temassız 3 boyutlu taramayı sağlamak için koordinat ölçüm cihazlarına veya CNC tezgahlarına monte edilmelidir [Son et.al, 2002; Valkenburg and Mcivor, 1998]. Bu sensörler aracılığı ile toplanan veriler tersine mühendislik için yeterince hassastır ancak ölçüm aralığı tarama makinelerinin hareketli aralığı nedeniyle kısıtlanır.

Optik tarama projeksiyonu [Wang et.al, 1999; Zhang et.al, 2004] taşınabilir ve etkin bir tarama yöntemidir. Bir seferde bir parçanın alanını ölçebilir. Ölçümden önce bir parça üzerinde pek çok alan çizilmeli ve her alan ayrı ayrı ölçülmelidir. Her alandan toplanan veriler özel algoritmalar [Fitzgibbon, 2003; Liu, 2004] veya Rapidform ve Polyworks gibi CAD sistemleri ile birleştirilebilir. Bu metot için aralık kısıtlaması yoktur. Araba ve motosiklet basit yapılı büyük parçaları ölçmek için kullanılır. Bu metodun çalışma prensibine göre optik tarayıcı parça üzerine yansıtınca CCD kamera değiştirilmiş görüntüyü yakalar ve bu alandaki tüm veriler iki veya üç görüntüden hesaplanır. Sonuçta bu metodun hassasiyeti lazer ışını sensörleri ve yapısal ışın sensörlerine göre daha düşüktür. Öte yandan bir parça üzerindeki iyi yapıları belirgin bir biçimde ayırt edemez. Halbuki büyük bir parçanın bazı iyi yapıları üzerindeki veriler genellikle CAD modelini tekrar yapılandırmak için esastır.

1.7. Tersine Mühendislik İçin Kullanılan Yazılımlar

Tersine Mühendislik, aslında ülkemizde yıllardır uygulanan bir yöntemdir. Ancak bugüne kadar körü-körüne ve tamamen insan gücü ve beyninin bazı kabiliyetlerine dayanarak yapılan uygulamalarda, uygun tersine mühendislik yazılımlarının kullanılması da zorunlu hale gelmeye başlamıştır. Piyasada bazı güçlü-ticari tersine mühendislik yazılımları bulmak mümkündür. *CappsNT*, *Geomagic Studio*, *RapidForm*, *CopyCAD*, *Imageware* ve *CATIA* bunlardan bazıları olup, Tersine Mühendislik ve kitlesel özel üretim konusunda dünyanın en çok tavsiye edilen yazılım paketleri arasındadır. Bu yazılımlar ile fiziksel bir nesnenin üç boyutlu tarama verisi işlenerek üretim için gerekli yüksek hassasiyet ve kalitede BDT modeli elde edilebilir. Yazılımlar, ayrıca daha ileri düzeyde çözümler elde etmek için sayısallaştırma sistemleri ile birlikte kullanılabilir.

Üç boyutlu tarama ve algılama cihazları ile elde edilen NOKTA BULUTLARI, bu yazılımlar ile birlikte anlamlandırılır; taranmış nokta verilerden aralıksız üçgen hücrelerden oluşan modeller elde edilir (üçgenleme/poligonlama) ve daha sonra uygun yüzeyler giydirilir. Doğrulama aşamasından sonra, BDT/BDÜ süreçlerinde kullanılabilecek uygun bir formatta kaydedilir.

1.8. Hızlı Prototipleme Makineleri

Üç boyutlu yazıcı/model makineleri günümüzde HIZLI PROTOTİPLEME (Rapid Prototyping) makinesi olarak da adlandırılmaktadır. Hızlı prototipleme makineleri TERSİNE MÜHENDİSLİĞİN olmazsa olmazlarından sayılabilir. Bu makineler üzerinde üç boyutlu nesneler elde edilmekte olup, bunlar yeni ürün geliştirme (YÜG) süreçlerinde kullanılmaktadır. Ancak, normal yazıcılardan farklı olarak, dünyada bu cihazları üreten belli başlı birkaç firma bulunmaktadır; 3D Systems, Stratasys, Z Corp. vb. gibi.

Bu firmaların ürettiği makinelerin en iyisi şudur ya da en kötüsü budur demek mümkün değildir. Her bir makinenin (teknolojinin) kendine has avantajları ya da dezavantajları bulunabilir. Fiyat-performans ilişkisi, bütçe olanakları ve makinenin kullanım amacı göz önünde bulundurularak optimum bir seçim yapılması gerekir. Yukarıda adı geçen firmaların her biri farklı teknolojileri kullanan Üç Boyutlu Yazıcı/Model makineleri üretmektedir.

Örneğin, Stratasys firması, FDM (Fused Deposition Modelling) metodu ile üretim yapan ve ABS malzemelerden modeller üretebilen makineleri üretmektedir. Bu makinenin sarf malzeme fiyatları diğer makinelerinki ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır. Bu da model fiyatlarına yansımaktadır. Ancak, hassas modeller bu makine ile rahatlıkla üretebilmektedir, ancak model üretebilmek için zaman gereksinimi hayli fazladır. Destek malzemelerinin çıkarılması zaman almakta ve çevreye zararlı kimyasal kullanımı gerektirmektedir. Z Corp. firması ise, püskürtme (jet) teknolojisi ile üretim yapabilen, normal hassasiyetteki modelleri, kısa bir sürede ve destek malzemesi kullanmadan yapabilen 3 Boyutlu Yazıcı/Model makineleri üretmektedir.

Bu makineler, plaster, elastik malzeme, hassas döküm malzemesi, nişasta bazlı malzemeler, seramik, ABS vb gibi çok çeşitli malzemelerden modeller oluşturabilmektedir. Kullandığı hammaddelerin içerisinde mm^3 fiyatı çok uygun olan malzemeler de mevcuttur. Bu yüzden, özellikle öğrencilerin, bilgisayarda çizdikleri modelleri görsel olarak üretmeleri söz konusu olduğunda, bu büyük bir maliyet avantajı sağlamaktadır. Eğitimde kullanımının yanı sıra, sanayi'de de başarılı

uygulamaları mevcuttur. Hızlı prototipleme teknolojisine yatırım yapmak isteyen işletmeler, kendi gereksinimlerini göz önünde bulundurarak bir seçim yapmak zorundadır.

1.9. Tartışma

Yeni teknolojiler bir taraftan önemli ölçüde insan kaynağı ve finansman gereksinimi, diğer taraftan bilimsel ve teknolojik altyapı gerektirmektedir. Bu bağlamda, gelişmiş ülkelerle aralarında önemli bir teknolojik açığın bulunduğu gelişmekte olan ülkelere, başarılı bir teknoloji politikasının anahtar unsurlarından birisi, en azından başlangıçta dışarıdan elde edilen teknolojiye etkin bir biçimde sahip olabilmek ve bunu yerel koşullara uyarlayıp, daha sonra ilerletmektir. Bu da, teknolojik yetenek birikiminin ilk aşamalarında yenilikçi Ar-Ge faaliyetlerinden çok, ithal edilen teknolojinin uyarlanması ve ilerletilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetleri, TERSİNE MÜHENDİSLİK, taklit, teknolojik yazını izleme gibi yasal ve yasal olmayan çabaları kapsayacaktır.

Dolayısıyla, gelişmekte olan ülkelere yönelik teknoloji politikası başlangıçta yeni teknolojiler geliştirmeye yönelik faaliyetlerden ziyade, en azından teknolojik açıdan lider ülkelerle olan açık kapanana kadar, teknolojinin uyarlanması ve etkin kullanımı çabalarına odaklanmayı hedeflemeli, bu doğrultudaki bir teknolojik sistemin oluşturulması ve etkin çalıştırılması üzerine kurulmalıdır. Yeni sanayileşen bazı Doğu Asya ülkelerinde olduğu gibi özellikle stratejik bazı sektörleri desteklemek üzerine kurulu bir teknoloji politikası yoluyla aradaki teknolojik açık kapatıldığında, sınai yapı zaten yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve yenilikçi Ar-Ge faaliyetlerini zorlamaya başlayacak ve uzun dönemli teknoloji politikası çerçevesinde bu tür faaliyetlerin yönlendirilmesine yönelik stratejiler de hayata geçirilebilecektir.

1.10. Hızlı Prototipleme ve Tersine Mühendislik

Hızlı prototipleme (RP) tabakalı imalat teknolojileri ile ilgilidir [Yan and Gu, 1996]. Geleneksel malzeme giderme proseslerinin aksine RP teknikleri tabaka tabaka malzeme ekleyerek kademe kademe bir objeyi oluşturur. Proses tam otomatiktir ve geleneksel imalat proseslerine göre pek çok avantaja sahiptir. Makine işlemleri ile imalatı çok zor veya imkansız olan kompleks özelliklerin üretilmesini sağlar.

Bu bağlamda fiziksel bir objenin tersine mühendisliği tekrar üretim veya tekrar tasarım gibi belirli bir amaç için yeterli olan bilginin objeden çıkarılmasıdır. Tersine mühendislik prosesi geometrik bilgisini kurtarmak için fiziksel bir objenin boyut ölçümünden başlar. En popüler teknikler mekanik temas ve temassız optik yaklaşımlardır [Varady et.al, 1997; Wohlers, 1995]. Dokunma tetikli problu bir koordinat ölçüm cihazı (CMM) gibi mekanik temas ölçüm ekipmanı genellikle 10 µm veya daha hassas sonuçlar üretir. Bununla birlikte ölçüm hızı temassız optik ölçüm sistemlerine göre yavaştır. Aynı zamanda ölçülen noktalara prob yarıçap kompanzasyonu uygulaması gerektirir. Temas kuvveti nedeniyle yumuşak ve kırılgan objeler dokunma probu ile ölçülemez. Alternatif olarak fiziksel bir objenin yüzeyi üzerinde ölçüm noktalarını direkt olarak elde etmek için yüksek hızlı temassız optik ölçüm teknikleri kullanılır. Boyut hassasiyeti genellikle tersine mühendislik uygulamaları için milimetrenin onda biri ile yüzde biri mertebesinde. Parlak objeler optik ölçüm sistemleri ile ölçülemez. Yukarıda sözü edilen özelliklere ilaveten hem mekanik temas hem de temassız optik ölçüm teknikleri gizli ve içte kalan özelliklerin ölçülmesi için uygun değildir. Üstelik pek çok obje birkaç adımda ölçülmelidir ve sonuçta tüm ölçüm verimliliği düşüktür. Hem dış hem de iç (gizli) özelliklere erişmek için bilgisayarlı tomografi (CT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi kesit görüntü tabanlı teknikler uygundur [Lee and Woo, 2000].

Tersine mühendislik ve hızlı prototipleme entegrasyonu üzerine yapılan önceki çalışmalar, RE verilerinin RP ile ilişkileri üç farklı yaklaşım şeklinde sınıflandırılabilir [Lee and Woo, 2000]. İlk yaklaşıma göre fiziksel bir objeden 3 boyutlu bir CAD modeli oluşturulur ve daha sonra RP oluşturma için bir dizi tabaka

meydana getirmek üzere dilimlere ayrılabilen bir STL dosyasına çevrilir. İkinci yaklaşıma göre ise bir STL dosyası direkt olarak RE ölçüm verilerinden üretilir. Son yaklaşım da bir RP dilim dosyasını oluşturmak için RE ölçüm verileri direkt olarak dilimlenir.

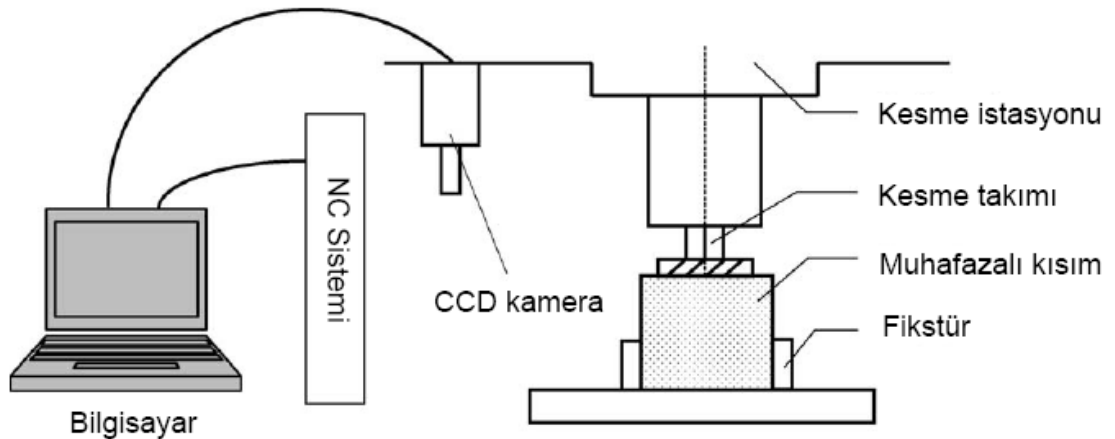
Li ve arkadaşları kompleks objelerin hızlı prototiplemesi için bir tersine mühendislik sistemi önermiştir [Li et al, 2002]. Bu sistemde verilen bir objenin ölçümü için 3 boyutlu temassız optik bir sistem kullanılırken 3 boyutlu yüzey modelini ve objeyi oluşturmak için bir yüzey tekrar oluşturma yazılımı ve bir RP cihazı seçilmiştir. 3 boyutlu modelin oluşturulmasının ardından bu model STL formatına dönüştürülür ve ardından seri prototipleme için dilimlenir.

CMM verilerini elde etmek için Chen ve arkadaşları veri indirgemedi yüzde ve hata sınırı belirleyerek STL dosyasının oluşturulmasına odaklanmıştır [Chen et al, 1999]. Üçgenlere ayrılacak bölge bir üçgenin ve çevresindekilerin türetilmesi ile seçilir ve üçgenlere ayırma bölgedeki noktalar arasındaki uzaklık baz alınarak gerçekleştirilir. Lazer tarama durumunda Lee ve arkadaşları parçalara ayırma ve Delaunay üçgenleme yöntemleri ile ölçüm nokta verilerinden STL dosyası oluşturmak amaçlı bir yaklaşım önermiştir. Parçalara ayırma üçgenler arasındaki lokal ve global eğriliklere dayanarak gerçekleştirilir ve parçalar düzlem, düzgün ve kaba bölgeler olarak sınıflandırılır. Delaunay üçgenleme yöntemi parça sınırları korunarak gerçekleştirilir, bu sayede orijinal geometrik karakteristikleri korunurken taranan verilerin boyutu indirgenebilir [Lee et al, 2000]. Chen ve Wang STL verilerini minimize etmek üzere tarama verilerinin üçgenlenmesini yerine getirmek için genetik bir algoritma kullanmıştır. Tüm üçgenleri bir öncelik sırasına göre düzenlemek için bir ağırlık şeması sunulmuştur ve kullanıcı çıkarılacak üçgen sayısını belirleyebilir. Genetik algoritmanın uydurma fonksiyonunda hem üçgensel görünümün şekli ve düzgünlüğü hem de süreklilik değerlendirmesi kullanılır [Chen and Wang, 1999].

STL dosyasını direkt olarak ölçüm verilerinden oluşturmak yüzey modelleme prosesi ile ilişkili zamanı ve hatayı azaltsa da STL dosyası pek çok sakınca içerir. Bazı araştırmacılar bu nedenle ölçüm verilerinden direkt olarak bir RP dilimleme dosyası oluşturulmasını önermiştir. Lee ve Woo RP bölümlerinin direkt olarak RE

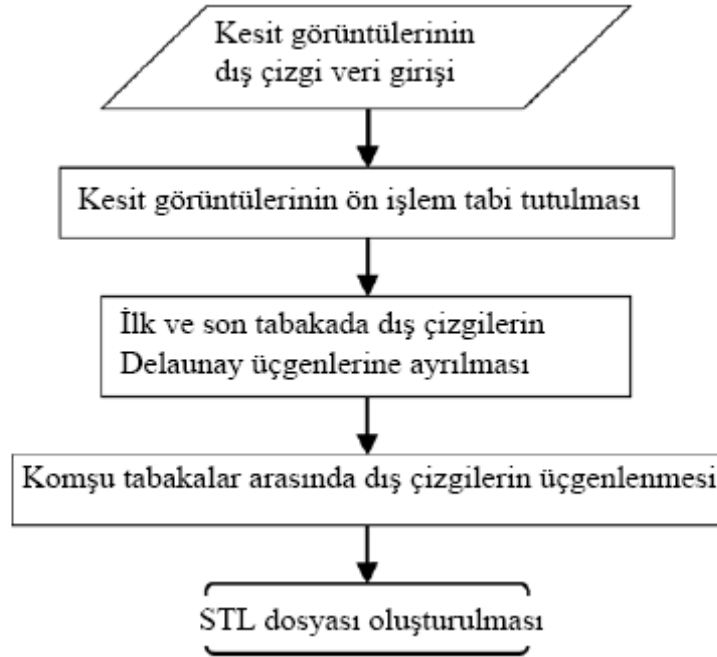
ölçüm verilerinden oluşturulmasına imkan veren bir prosedür önermiştir. Tarama verilerinden oluşturulan dış çizgi modeli kullanmışlardır. Önerdikleri prosedürde bir nokta veri indirgeme metodu nokta bulutundan çıkarılan eğrilik bilgisini kullanır. Fazla nokta verilerini gidermek için düz çizgi homotopi metodunu da kullanmışlardır. Bu prosedürün tamamlanmasının ardından ölçülen objenin şeklini gösteren minimum dış çizgi sayısı belirlenir ve oluşturma için gereken dilimler bu verilerden elde edilir [Lee and Woo, 2000]. Liu'nun araştırmasına göre dilimleme, projeksiyon, sıkıştırma ve kesiştirme yöntemleri ile tabakalı bir RP modeli direkt olarak bulut verisinden çıkarılır. Bununla beraber bu metot sadece delikleri ve lobları olmayan bulut verilerinde kullanılabilir [Liu et al, 2004]. Zhang ve arkadaşları nokta bulutu verilerini modellemek için uyumlu bir dilimleme metodu önermişlerdir. Bu metotta bulut verileri RP oluşturma doğrultusu boyunca pek çok tabakaya ayrılır. Her tabakadaki noktalar düzlemsel bir veri olarak alınır ve noktaları en iyi biçimde uydurmak için bir poligon oluşturulur. Her tabakanın kalınlığı yüzey hatasının verilen bir hata sınırı içinde kalmasını sağlayacak biçimde belirlenir [Zhang et al, 2003].

Her ne kadar CT ve MRI hem dış hem de iç gizli yapıların tahribatsız ölçümlerine uygulanabilse de bunların ölçüm hassasiyeti düşüktür ve maliyet çok yüksektir. Aşağıdaki şekilde kesit görüntüleme için ölçüm prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.11; Kesit görüntüleme ölçüm prensibi

STL (Stereo Lithography) dosya formatı CAD ile RP sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılan veri formatıdır. STL oluşturma için gerekli aşamalar Şekil 1.12’de gösterilmiştir.

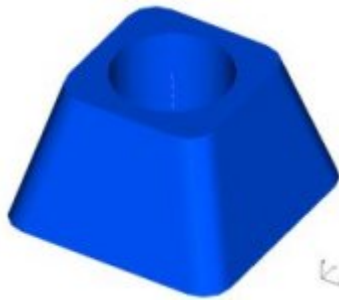


Şekil 1.12; STL dosyasının oluşturulması

1.11. Hızlı Prototiplemenin Potansiyel Kullanım Alanları

- Mimari uygulamalar
- Otomotiv
- Eğitim
- Her nevi araç ve gereç üretimi
- Kuyumculuk
- Ayakkabıcılık
- Medikal uygulamalar
- Moleküler Modelleme
- Ambalaj sektörü
- Kalıpcılık

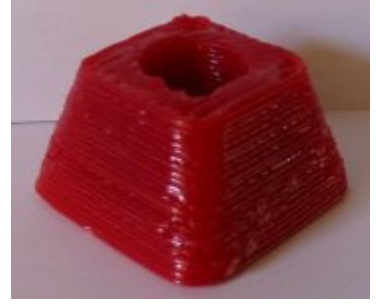
Başta Amerika olma üzere gelişmiş ülkeler, gelişmekte olan ülkelerin ekonomilerini serbestleşme, yabancı yatırımlara ve ticarete açma konusunda önemli baskılar yaparken, fikri ve sınai mülkiyet hakları konusunda sıkılaştırma ve uyum sağlama yönünde küresel uygulamaları dayatmaktadır. Bunda özellikle 1970 ve 1980'li yıllarda bir grup Doğu Asya ülkesinin TERSİNE MÜHENDİSLİK, taklit ve uyarlama yoluyla teknolojik yeteneklerini yükseltmeleri ve bu durumun merkez ülkelerin yüksek nitelikli sanayilere dayalı karşılaştırmalı üstünlüklerini onarmaya yönelik baskılara neden olmasının büyük payı vardır. Sanayileşmiş merkez ülkeler, yeni sanayileşen ülkeler kervanına başkalarının katılmasını istememekte ve patentlerin teknolojik imtiyaz ve tekel yaratma işlevinden sonuna kadar yararlanmayı arzu etmektedir. Şekil 1.13'de hızlı prototipleme ile oluşan nihai ürün gösterilmektedir.



3D CAD modeli



Hızlı Prototipleme Cihazı



Oluşturulan numune

Şekil 1.13; Hızlı Prototipleme ile Oluşturulan Ürün

Son yıllarda, patent kanununun süreç (üretim usulleri) patentleri kadar ürün patentlerini de kapsayacak biçimde düzenlenmesi sağlanarak, gelişmekte olan ülkelerin tersine mühendislik yoluyla rekabet gücünün artırmasının bir nebze önleneceği düşünüldü. Çünkü, gelişmekte olan ülkelere bazıları geçmişte, bazı sektörlerde ürün patenti korumasını yasaklamıştı. Bunun temel nedeni, ürün patentlerinin çok daha kısıtlayıcı olarak yorumlanmasıydı. Gerçekten de, eğer belirli bir süreç patentli bir ürünü üretmek için kullanılıyorsa, benzer ürünü üretmek için geliştirilmiş alternatif bir süreç, mevcut patenti ihlal etmiyordu. Ancak ürünün kendisi patentliyse, ürünü üretmek için kullanılan yeni süreç mevcut patenti ihlal edecekti. Amerika, belirli bir ürünün (özellikle ilaç sektöründe) tersine mühendislik

yoluyla taklidini önlemek ve benzer ürünlerin alternatif üretimine olanak tanıyan süreç patentlerini sınırlandırmak amacıyla ürün patentlerini de bu düzenleme içine dahil ettirdi. Bu düzenleme özellikle ilaç ve kimya sektörleri açısından Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin sanayilerini zorlayabilecek bir durum arz etmektedir. Bu nedenle, TRIPS (Ticarette Bağlantılı Fikri Sınai Haklar Anlaşması) anlaşmasının gerçekleştirilmesi ve küresel ölçekte sınai mülkiyet haklarının sıkılaştırılmasının ardında Amerika gibi gelişmiş ülkelerin baskısının olduğunu belirtmek gerekir. Özellikle Doğu Asya ülkelerinin taklit, uyarlama ve tersine mühendislik kanallarını etkin kullanıp, Ar-Ge faaliyetlerine görece olarak daha az yatırımda bulunarak, daha düşük olan üretim maliyetlerini biraz artırmaları ve 1970-1980'ler boyunca oldukça yüksek bir rekabet düzeyine ulaşmaları, sonuçta Amerika'nın fikri ve sınai mülkiyet haklarına yönelik kanunların değiştirilmesine yönelik baskısının artmasına yol açmıştır. Türkiye de TRIPS anlaşmasını imzalayan ülkeler arasındadır [Dereli ve Baykasoğlu, 2004].

Şunu da burada belirtmekte fayda var ki, dünyadaki mevcut PATENT ve LİSANS müessesesinin iyi işleyen ve adaletli bir mekanizma olmadığı yönündeki görüşler ağırlık kazanmaktadır. Öncelikle, patentleme süreçlerinin çok uzun olması bir yana patentleme için istenen ücretlerin yüksekliği, insanları canından bezdirmiş durumdadır. Üstelik, mevcut dünya patentleme mekanizması sanılanın aksine çok basit ve ciddi olmayan yöntemlerle yürütülmektedir. Çok önemli bir buluş için bile iki-üç sayfalık, ayrıntı ve detay içermeyen evrak istenmekte, görsellikten uzak ve kelime oyunlarına dayalı bir araştırma ve karşılaştırma sistemi ile sonradan büyük anlaşmazlıklara ve paraya dönüşebilecek patentler verile gelmektedir. "Erken başvuran alır, ilk gelen oturur, ilk vuran avcıdır..." anlayışlarıyla bir yere varılamayacağı açıktır. Daha dün, Karaman'da yeni açılan bir fabrikanın ÜLKER'in o meşhur TAÇ krakerinin isim hakkına sahip çıktığı ve kullandığı, ÜLKER firmasının ise yirmi senedir bu ürünü yalnızca kendisi üretmesine rağmen mamulün ismini değiştirmek zorunda kaldığı, henüz hafızalardan silinmemiştir. Oysa, gerçek hak, hukuk ve adalet uygulansaydı, böyle mi olması gerekirdi. Karaman'daki yeni kurulan bir bisküvi fabrikası ÜLKER'in gafletinden yararlanmış ve kanunlar ve PATENT HAKLARI (!) buna müsaade etmiştir. Ancak, o fabrikanın artık şu günlerde ÜLKER'e satıldığı ve/veya ÜLKER'e fason üretim yaptığı da konuşulmaktadır. Buradan, şu sonucu rahatlıkla çıkarabiliriz... Ar-Ge olmadan, yenilikçilik olmadan,

cingözlük yapmakla, taklitçilikle bir yere kadar... Sonrası meçhul... O yüzden TERSİNE MÜHENDİSLİK ile Ar-Ge arasındaki dengenin çok iyi kurulması gerekir [Dereli ve Baykasoğlu, 2004].

Dünya patent mekanizmasını bir SÖMÜRÜ ARACI olarak kullananlara karşı kullanılabilecek iki yöntem var... Bunlardan birincisi, Ar-Ge... Bu şimdilik zor gözüküyor. Çünkü Ar-Ge'ye ayıracak bütçemiz yok... O zaman tek yol kalıyor... TRIZ destekli TERSİNE MÜHENDİSLİK... TRIZ ile patentleri kırmak, boyunduruklardan ve prangalardan kurtulmak çok kolay... [Dereli ve Baykasoğlu, 2001]

1.12 TRIZ

- TRIZ; Yenilikçi, Problem Çözme Teorisidir. Rusça'daki orijinal isminin kısaltılmışıdır.
- Metodoloji, 1946 yılında ilk kez G. Altshuller tarafından eski Sovyetler Birliğinde geliştirilmiştir.
- Soğuk savaşın sona ermesiyle birlikte, ABD, Japonya ve Avrupa'da tanınmaya ve kullanılmaya başlanmıştır.
- Teknolojik Ar-Ge'de yaratıcılığı destekler.
- Yenilikçi teknolojilerin incelenmesinden çıkarılan "Buluş Prensiplerini" temel almaktadır.
- Probleminizi çözerken, tüm dünya bilim ve teknolojisinin girdilerini kullanabilme imkanı sağlar.
- Ticari değeri olan yenilikler yapmaya yönlendirir.
- Mekanik, kimya, elektrik ve diğer alanlarda yenilikler için kullanılabilmektedir.

Başta Japonya, Singapur, Güney Kore, Tayvan ve Çin olmak üzere birçok Uzak Doğu ülkesinin TERSİNE MÜHENDİSLİK uygulamaları ile büyük mesafeler kat ettiği düşünüldüğünde, bu uygulamanın özellikle, var olan silâh sistemleri ve bunlara ait destek teçhizatlarının parçalarını imal eden savunma endüstrisi kuruluşları için gerekli olduğu düşünülmektedir. Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde bulunan

ve değeri milyarlarca dolarla ölçülebilen yüksek teknolojik sistemlerin bakım, onarım ve modernizasyonu, bu konularda bilgi birikimi ve TERSİNE MÜHENDİSLİK kanalıyla teknoloji yeteneğini geliştirmek için önemli bir fırsat oluşturmaktadır. Ülkemizde, makine imalatı sektöründeki şirketlerin ürettikleri yeni ürünlerin tasarım bilgilerinin elde edilme yöntemlerinin çok büyük oranda, TERSİNE MÜHENDİSLİK ve müşteri tarafından verilmesi şeklinde olduğu bilinmektedir. Bu şekilde hem yeni ürün geliştirme maliyeti hem de imalata geçişe kadar olan süre azaltılmaktadır. Sektör, büyük oranda bir mühendislik sektörü olmasına rağmen yeni ürün tasarımında henüz fazla bir mesafe kat edilmemiş olduğu görülmektedir. Ürün bazında üretim hacminin küçüklüğü, yeni ürün geliştirme giderleri üzerine de bir kısıtlama getirmektedir. Daha geniş pazarlara erişim ve daha büyük üretim hacimlerine ulaşma yeni ürün ve teknoloji yatırımlarının da önünü açabilecektir.

Üretilirliği (prodüktivite) artırmak, mühendislerin ve yöneticilerin en büyük hedeflerinden bir tanesidir. Biz gitmesek de, duymasak da, kullanmasak da; orada esnekliği ve tepkiselliği artıran bir EŞ ZAMANLI MÜHENDİSLİK diye bir felsefe vardır. Bu felsefe ile kavramsal tasarımdan gerçek üretime değin geçen süre azaltılır. Eş zamanlı mühendisliğin en büyük silahlarından biri ise TERSİNE MÜHENDİSLİK'tir. Tersine mühendislik silahının mermisi ise HIZLI PROTOTİPLEME cihazlarıdır. Bu felsefeyi kullanmamak, bu silahı taşımamak ve bu silahın mermilerini TEPKİSEL ÜRETİM HEDEFİNE göndermemek, hızın en önemli rekabet unsuru olduğu şu dönemde ciddi rekabet sorunlarına yol açabilir.

Yıllar önce satın alınan bir türbinin kanatçığı bir gün kırılabilir. Ambarda hiç yedek kanatçığınız olmayabilir, kalmamış olabilir. Türbini veya makineyi satın almış olduğunuz firma kapanmış olabilir, iflas etmiş olabilir. Bunlar olmayacak şeyler değildir. Bu durumda ne yapılacak? Üretimi durduracak mısınız? Yapılacak en kestirme iş, sağlam kanatçıklardan birini sökmek ve bir TERSİNE MÜHENDİSLİK işlemine tabii tutmak olacaktır. Taradınız, sayısallaştırdınız, modeli elde ettiniz ve bir prototipini inşa ettiniz... Geliştirdiniz, uyarladınız, projeksiyonlar uyguladınız... Tekrar... Sonra, elinizle tuttunuz.. Ve her şey tamamsa, bu modeli üretecek NC kodu ürettiniz, yada modeli üretecek kalıp sistemlerini yeniden tasarladınız, ürettiniz... CNC makineniz, bu kodları aldı ve sizin için kanatçığınızı üretti. Kalıplar size

modeli verdi. Pek de zor değil, öyle değil mi? Evet, bugün Avrupa'da böyle yapılıyor, Rolls-Royce böyle yapıyor. Avustralya'da nükleer santrallerin türbin kanatçıkları Sonlu Elemanlar Yöntemi ile birlikte böyle geliştiriliyor, yeniden yapılıyor. Tersine Mühendislik, üretimdeki ve tasarımdaki hata ve eksikliklerin bulunmasında ve düzeltilmesine mühendislere yardımcı olmak için müthiş fırsatlar sunuyor.

Hızlı prototiplemeyi veya tersine mühendisliği "KOPYACILIK" olarak algılamayalım, yalnızca "kopyalama" amacı ile kullanmayalım. Tersine mühendisliğin yeteneklerini doğru ve yerinde kullanarak ürün tasarım zamanlarını kısaltalım, daha çabuk tasarlayalım, daha çabuk üretelim, üretilebilirliği artıralım ve de en önemlisi TEKNOLOJİ GELİŞTİRMEK için bir fırsat kollayalım. Bakınız bir örnek verelim burada... Hani meşhur bir anektod vardır. Almanlar mikroskopta bile görünmeyen bir tel üretmişler ve Japonlara göndermişler. Japonlar almışlar bakmışlar. Önce aynısını yapmışlar. Sonra da, telin tam ortasına bir delik delmişler ve Almanlara geri postalamışlar. Sonuçta, Almanlar rezil olmuş. Hem ellerindeki teknolojiyi kaptırmışlar, hem de doksandan bir gol yiyerek geriye düşmüşler. İşte, Japonların o gün yaptığı ve bugün de yaptığı, uzak doğuluların hepsinin yaptığı TERSİNE MÜHENDİSLİK değil de nedir? Yapılacak iş çok basit. Parçayı ölç ve tara. Veriyi elde et. Veriyi işle. Modeli elde et. Modeli üret. Modelden gerçek üretime geç. Bu kadar basit... TERSİNE MÜHENDİSLİK, teknoloji transferinden teknoloji geliştirmeye geçişte en önemli araç...

Biz ise hep tersine gideriz... Ama bu sefer durum değişik. Murphy, "Eğer her şey yolundaysa, mutlaka bir şeylerde terslik vardır" demiş. Biz de, diyoruz ki; "Eğer mühendisliğin tersine ise, işler yoluna girer ve çabuk gider."

Hâlâ, METAL (TENEKE) KOLA KUTUSU'nu üretemiyoruz. Hâlâ, PASTORİZE SÜT KUTUSU'nu üretemiyoruz... İstedğin kadar KOLA üret, istediğin kadar SÜT üret. Fayda yok. Ambalajlama teknolojimiz yok. Onlarda var... Nanconco'da, TETRA PAK'da... Ve onlar bizim için ambalajlıyorlar... Biz kutuları üretemiyoruz. Üretecek bilgi var. Örneğin, metal teneke kutunun ana işlemi "derin çekme"... Peki o zaman eksik olan ne?... Uzaklarda insanlar, 20 - 30 senedir TERSİNE MÜHENDİSLİK felsefesini ve

teknolojisini sonuna kadar kullanıyorlar. Kullandılar, faydalandılar. Şimdilerde, kullanılan plastik tabanlı sarf malzemeleri çevreye zarar veriyor diye, buzdan model üreten (RAPID FREEZE PROTOTYPING) makineler icat ettiler, Nobel ödülleri aldılar... Bize ise, bunlar ancak bir "FANTAZİ" olarak geliyor. Biz hep tersine gideriz... Ama, bu sefer de DÜZ gitmeye çalışmayalım, TERSİNE gidelim. Tersine giden ve TERSİNE MÜHENDİSLİĞİ kullanarak belli açınımlar yapan Doğu Asya ülkeleri gibi, merdivenleri onar onar çıkalım ve gelişmiş ülkeler ile aramızdaki farkı kapatmaya çalışalım... Çalmadan çırpmadan... Ar-Ge'yi ihmal etmeden, TERSİNE MÜHENDİSLİĞİN nimetlerinden faydalanalım... Matbaa bize 200 sene gecikmeli geldi... Bari, TERSİNE MÜHENDİSLİĞİ, hiç olmazsa HIZLI PROTOTİPLEME teknolojisini hemen getirelim...

1.13. Potansiyel Araştırma Konu Ve Uygulamaları

- Bilgisayar görüş sistemleri ile hızlı tersine mühendislik
- Eski makine parçalarının yeniden tasarımı ve geliştirilmesi için bir tersine mühendislik sistemi geliştirilmesi
- Genetik programlama ve veri madenciliği ile nokta bulutlarının anlamlandırılması
- Hızlı Prototipleme ve Tersine Mühendislik sistemlerinin doğrudan entegrasyonu
- Koordinat ölçüm ve tarama için süreç planlama
- Medikal görüntüleme sistemleri ile hızlı prototipleme sistemlerinin entegrasyonu
- Ortopedide, protez ve plastik cerrahide hızlı prototipleme uygulamaları
- Serbest ve karmaşık yüzeyli nesnelerin modellenmesi ve işlenmesi
- Sonlu elemanlar ile tersine mühendislik
- Tersine mühendislik için akıllı sezgiseller ile bir imaj işleme sistemi geliştirilmesi
- Tersine mühendislik için unsur algılama
- Tersine mühendislik ile geri dönüşüm ve sürdürülebilir üretim
- Unsur tabanlı tersine mühendislik

1.14. Tersine Mühendislik ve Veri Elde Etme

Tersine mühendisliğin kritik kısımlarından biri de veri elde etmedir. Genellikle tersine mühendislik yöntemleri sadece simüle edilmiş veri elde etmeye dayanır.

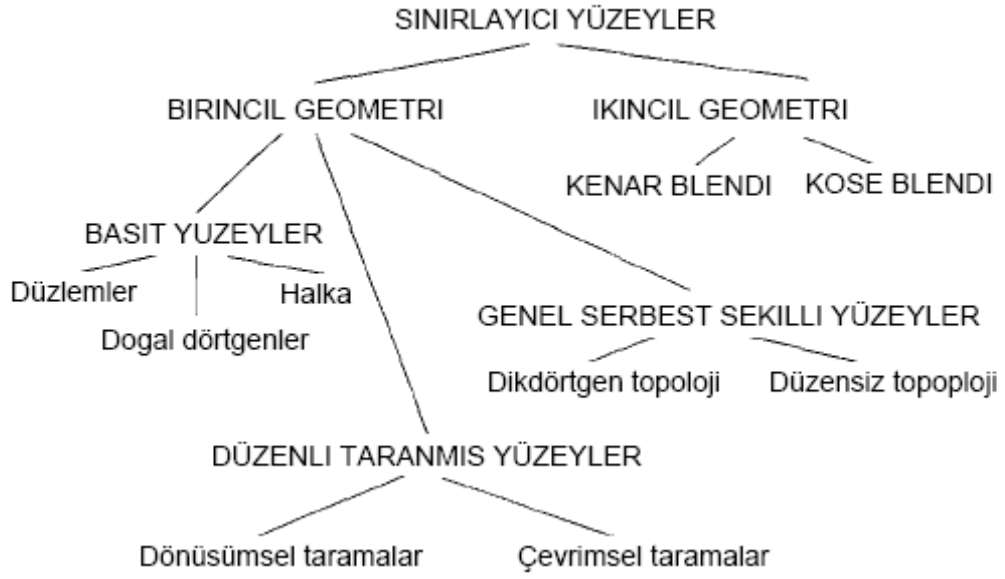
Tersine mühendisliğin en kritik kısımları ise parçalara ayırma ve yüzey uydurmaktır. Bu prosesler aracılığı ile veri noktaları uygun tek bir yüzeyin uydurulabileceği takımlar halinde gruplanabilir. Parçalara ayırma ve yüzey uydurma yöntemlerinin birbirlerine dikkatli bir biçimde eşlenmesi gerekir.

Veri elde etme sistemleri veriyi bir objenin sınırlı bir yüzey bölgesinden elde etmek için fiziksel kavramlarla sınırlanmıştır. Bu nedenle bir parçayı tamamen ölçmek için birden fazla tarama yapılmalıdır.

CAD söz konusu olduğunda bunlar yeterli olmayacaktır. Keskin kenarları belirlemek, karışım eklemek, düzgün bağlantıların gerektiği yerlerde uygun süreklilik sağlamak, modeli düzenlemek ve kısıtlamaları zorlamak problemin parçalarıdır.

1.14.1. Veri Elde Etme

Şekil 1.14’de de gösterildiği gibi şekil verisini elde etmek için pek çok farklı yöntem mevcuttur. Her yöntem söz konusu objenin yüzeyi veya hacmi ile etkileşime geçmek için bazı mekanizmalar veya fenomenlerden yararlanır. Işık, ses veya manyetik alanların kullanıldığı temassız yöntemlerin yanı sıra bir kolun ucundaki mekanik probalar ile yüzeye temas edildiği diğer yöntemler de vardır. Her durumda elde edilen fiziksel okumalardan objenin yüzeyi üzerindeki noktaların konumlarını belirlemek için uygun bir analiz yapılmalıdır. Örneğin, lazer menzil bulucularında kat edilen mesafeyi belirlemek için uçuş süresi kullanılır ve görüntü analizinde birden fazla görüntüde sınır işaretlerinin rölatif konumları pozisyon ile ilişkilendirilir. Her yöntemin güçlü ve zayıf yönleri vardır ve bu nedenle istenen şekil yakalama fonksiyonelliği için veri elde etme sistemi dikkatli bir biçimde seçilmelidir.



Şekil 1.14; Yüzey hiyerarşisi

Optik yöntemler en yaygın olarak kullanılan ve en popüler yöntemlerdir ve rölatif olarak hızlı elde etme oranlarına sahiptirler. Optik yöntemlerin beş önemli kategorisi mevcuttur: üçgenlere ayırma, menzilleme, interferometre, yapısal ışıklandırma ve görüntü analizi.

Üçgenlere ayırma bir pozisyonu çıkarmak için ışık kaynakları ile foto hassas cihazlar arasındaki konum ve açıları kullanan bir yöntemdir. Yüksek enerjili bir ışık kaynağı söz konusu yüzeye belirli bir açıda odaklanır ve yansıtılır. Foto hassas bir cihaz, genellikle bir video kamera, yüzeydeki yansımayı fark eder ve sonra bilinen açı ve uzaklık değerleri ile geometrik üçgenlere ayırmayı kullanılarak bir yüzey noktasının bir referans düzlemine göre konumu hesaplanır. Işık kaynağı ve kamera hareketli bir platforma monte edilerek yüzeyin birden fazla taraması yapılabilir. Bu taramalar bu nedenle söz konusu yüzeyin rölatif ölçümleridir. Muhtelif yüksek enerji ışık kaynakları kullanılır ancak lazerler bunların en yaygın olanlarıdır. Üçgenlere ayırma veriyi oldukça hızlı oranlarda elde edebilir. Hassasiyet foto hassas cihazın çözünürlüğü ve yüzey ile tarayıcı arasındaki uzaklık ile belirlenir. Motavalli ve Bidanda lazer üçgenlere ayırma yöntemini kullanarak bir tersine mühendislik stratejisi sunmuşlardır [Motavalli and Bidanda, 1991]. Moss ve arkadaşları

yüzeylerden şekil verisini toplamak için klasik bir lazer üçgenlere ayırma ile ilgili detaylı bir tartışma sunmuştur. Hassasiyet ve uygulamalar ile ilgili bir tartışma da yapılmıştır [Moss et al, 1989]. Bir koordinat ölçme cihazında lazer üçgenlere ayırmanın kullanımı Modjarrad tarafından takdim edilmiştir [Modjarrad, 1988].

Menzilleme yöntemleri ışınların uçuş sürelerini algılayarak uzaklıkları ölçer; pratik yöntemler genellikle lazerlere ve darbeli ışınlara dayanır. İnterferometre yöntemleri uzaklıkları ara yüz örnekleri kullanarak dalga boyu olarak ölçer. Pek çok tersine mühendislik uygulaması mesafeleri santimetre ile metre aralığında iken görünür ışığın yüzlerce nanometre mertebesinde dalga boyuna sahip olması nedeniyle bu işlem çok hassas bir ölçüm yöntemi olabilir. Prensipinde elektromanyetik spektrumun diğer bölümleri de kullanılabilir. Pratikte hem objeyi incelemek amacıyla monokromatik ışıklı bir ışın hem de yansıtılan ışıkla karşılaştırma yapmak amacıyla bir referans ışını sağlamak için yüksek enerjili bir ışık kaynağı kullanılır. Moring ve arkadaşları uçuş süresi hesaplamalarına dayalı bir menzil bulucu tanımlamıştır [Moring et al, 1989]. Jarvis detaylı sonuçlar ve analizler vererek uçuş süreli menzil bulucular ile ilgili derinlemesine bir makale sunmuştur [Jarvis, 1983].

Yapısal ışıklandırma söz konusu yüzey üzerine ışık örnekleri yansıtmayı ve yüzey tarafından yansıtıldığı şekliyle sonuç örneğinin bir görüntüsünü yakalamayı içerir. Görüntü bundan sonra yüzey üzerindeki veri noktalarını belirlemek için analiz edilmelidir. Bir girişim örneğinin ışıklı dış çizgiler oluşturan bir yüzeye yansıtıldığı yapısal ışığın popüler bir yöntemi de gölge Moire'dir. Bu dış çizgiler bir görüntüde toplanır ve çizgiler arasındaki uzaklığı belirlemek için analiz edilir. Bu uzaklık söz konusu noktada yüzeyin yüksekliği ile orantılıdır ve bu sayede yüzey noktalarının koordinatları çıkarılabilir. Yapısal ışık tek bir görüntü karesi ile büyük miktarda veri elde edebilir ancak verinin pozisyonlarını belirlemek amacıyla yapılan analizler nispeten kompleks olabilir. Will ve Pennington nokta konumlarını belirlemek için obje yüzeylerine yansıtılmış ızgaraları kullanmıştır [Will and Pennington, 1972]. Wang ve Aggarwal benzer bir yaklaşımdan yararlanmıştır ancak ışık şeritleri ve birden fazla görüntü kullanmışlardır [Wang and Aggarwal, 1987].

Nihai optik şekil toplama yöntemi görüntü analizidir. Bu yöntem, koordinat verilerini belirlemek için karelerin analiz edilmesi açısından yapısal ışık ile benzerlik

gösterir. Bununla birlikte, analiz yansıtılan örneklerle dayanmaz. Bunun yerine yüksekliği ve koordinat pozisyonunu belirlemek amacıyla yeterli bilgi sağlamak için stereo çiftler kullanılır. Hiçbir yapısal ışık kullanılmadığı için bu yönteme pasif yöntem adı verilir. Aktif yöntemler verilerin elde edilmesinde yapay ışığın kullanılması bakımından pasif yöntemlerden ayrılır. Görüntü çiftleri ve görüntüler dahilindeki sınır işaretlerinin korelasyonu bu yöntemde oldukça zordur ve bu nedenle aktif yöntemler tercih edilir. Diğer bir görüntü analizi yaklaşımı da bir görüntünün 3 boyutlu bir modelle karşılaştırıldığı ışıklandırma modelleri ile ilgilidir. Gölge görüntüler objenin gerçek görüntüleri ile eşleşene dek model değiştirilir. En sonunda görüntülerdeki yoğunluk örnekleri koordinat bilgisini belirlemek için kullanılır. Nishihara hızlı menzil ölçümleri yapmak için gerçek zamanlı çift okülerli stereo eşleme algoritmasından yararlanmıştır [Nishihara, 1984]. Posdamer ve Altschuler stereo yöntemler kullanarak yüzey verisinin gerçek zamanlı ölçümü için bir yöntem tasvir etmişlerdir [Posdamer and Altschuler, 1982].

Temaslı yöntemler şekil yakalama ile ilgili başka bir popüler yaklaşım sunmaktadır. Temaslı yöntemler mekanik kollar kullanarak bir yüzeye dokunur. Kolun mafsallarındaki algılama cihazları rölatif koordinat konumlarını belirler. Bu yöntemler en çok ölçüm cihazı sınırlamaları ile kısıtlanmıştır. Örneğin 3 eksenli bir frezeleme makinesi bir dokunma probu ile donatılabilir ve temaslı bir ölçüm sistemi olarak kullanılabilir. Ancak bu yöntem konkav yüzeyler için etkili değildir. Temaslı ölçümler için kullanılan pek çok farklı robot cihaz vardır. Bu yöntemler diğerleri arasında en sağlam olanlarıdır (daha az parazit, daha fazla hassasiyet, daha fazla tekrarlanabilirlik, v.s.) ancak bunlar veri elde etme için en yavaş yöntemlerdir.

Muhtemelen en popüler yöntem koordinat ölçme tezgahlarının (CMM) kullanılmasıdır. Bu cihazlar bir yüzey boyunca yolları izlemek için programlanabilir ve oldukça hassas, parazitsiz veri toplayabilir.

Diğer veri elde etme yöntemleri de sesin bir yüzeyden yansıtıldığı akustik ve manyetik bir alanın yüzeye dokunduğu yöntemlerdir. Akustik yöntemler uzaklık ölçümü için yüzyıllardır kullanılmaktadır. Bu amaçla sonar sıkça kullanılmaktadır. Otomatik odaklı kameralar menzili belirlemek için genellikle akustik yöntemlerden yararlanır. Yöntem esasında uçuş süresi ile aynıdır; bir ses kaynağı bir yüzeyden

yansıtılır ve sesin hızı bilindiğinden kaynak ile yüzey arasındaki uzaklık hesaplanabilir. Hem akustik karışma ve parazit hem de odaklı nokta konumlarını belirlemek belli başlı problemlerdir. Bir objenin içindeki malzeme verilerini toplamak için obje boyunca bir dönüştürücünün bir kesiti taradığı dinamik görüntüleme, ses ötesi cihazlarda yaygın bir biçimde kullanılır.

Manyetik alan ölçümü manyetik bir alan kaynağının mukavemetinin algılanması ile ilgilidir. Alan dahilinde iğnenin konumunu ve yönelimini algılayan manyetik dokunma problemleri kullanılır. Tetikleyici iğne bir noktada konumlanınca kullanıcının sadece spesifik noktayı kaydetmesini sağlar. İç malzeme özelliklerinin ölçülmesi gerektiğinde manyetik rezonans kullanılır. Manyetik rezonans (MRI) ölçülecek malzemedeki atomları aktive eder ve tepkiyi ölçer.

Tüm ölçüm yöntemleri yüzey veya içteki malzeme ile ışık, ses, manyetizma veya fiziksel temas sayesinde etkileşim içinde olmalıdır. Kullanılan yöntemlerin ve sensörün hızı veri elde etmenin de hızını belirler. Ölçülen verileri ve hassasiyeti hesaplamak için gereken analiz miktarı seçilen sensör tipi ile belirlenir.

1.14.2. Veri Elde Etmede Uygulama Problemleri

Kullanılabilir veriyi elde etmede pek çok uygulamaya dayalı problemle karşılaşılır; bunlar:

- kalibrasyon
- hassasiyet
- erişebilirlik
- oklüzyon
- boyutlama
- çoklu görünüş
- parazit ve eksik veri
- parçaların istatistiksel dağılımları
- yüzey bitirme

olarak sıralanabilir. Kalibrasyon, bir konum ölçme cihazının tertip edilmesi ve çalıştırılması açısından önemli bir aşamadır. Sistemik algılama hataları lens bozulmaları, kameralarda lineer olmayan elektronik ve benzeri kaynaklarda dolayı oluşabilir. Herhangi bir algılama kamera noktaları ve yönelimleri hassas bir biçimde belirlemek ve sistemik hata kaynaklarını mümkün olduğu kadar hassas bir biçimde modellemek için kalibre edilmelidir. Pek çok çalışma muhtelif tarayıcı tipleri için hassasiyet aralıkları konusunu masaya yatırmıştır ancak tüm veri elde etme yöntemleri hassas kalibrasyon gerektirir. Optik tarayıcıların hassasiyetleri tipik olarak kullanılan video sisteminin çözünürlüğüne bağlıdır. Ölçülen yüzeyden uzaklık ve tarama sisteminin hareketli parçalarının hassasiyeti ölçüm hatasına etki eder [Besl and Jain, 1992].

Erişebilirlik parçanın konfigürasyonu veya topolojisi nedeniyle kolayca elde edilemeyen tarama verileri ile ilgili bir hadisedir. Bu genellikle birden fazla tarama gerektirir ancak belirli yöntemlerle bazı verilerin elde edilmesini de olanaksız kılabilir. Delik içleri erişilemeyen yüzeylere örnektir.

Oklüzyon gölgeleme veya engelleme nedeniyle tarama ortamının bloke edilmesidir. Bu problem genellikle optik tarayıcılarda yaygındır. Bununla beraber, akustik ve manyetik tarayıcılarda da bu probleme rastlanabilir. Bu problemi çözenin bir yolu birden fazla tarama cihazlarıdır. Kendi kendine oklüzyon kadar bilhassa taramadan önce parçaların tespit edilmesi gerektiğinde sabitlemeden dolayı da oklüzyon oluşabilir. Fikstürlerin geometrisi tarama verisinin bir parçası haline gelir. Fikstür verilerinin yok edilmesi güçtür ve genellikle birden fazla görünüş gerektirir. Birden fazla görünüş çakıştırma problemlerinden dolayı elde edilen veride hatalara yol açar.

Veri örneklerindeki parazit in önlenmesi de ayrı bir problemdir. Parazit, alakasız titreşimler, ayna yansımaları, v.s. gibi nedenlerden dolayı pek çok şekilde ortaya çıkabilir. Kullanılabilecek pek çok farklı filtreleme yaklaşımı mevcuttur. En önemli soru paraziti model oluşturma aşamasından önce mi, sonra mı yoksa bu aşama sırasında mı oluşturmak gerektiğidir. Parazitin giderilmemesi gereken zamanlar da olacaktır. Buna karşın parazit filtreleme tersine mühendislikte genellikle kaçınılmaz bir adımdır ancak bunun verilerin netliğini de tahrip edeceğ i

unutulmamalıdır; sözgelimi keskin kenarlar tipik olarak yok olur ve düzgün karışımlarla değiştirilir.

Benzer bir problem de kaybolan verilerin tekrar geri getirilmesidir. Bu durum, yukarıda bahsedilen erişme ve oklüzyon problemlerinden ötürü kısmen gereklidir. Üstelik, optik ve hatta temaslı taramanın doğasından dolayı keskin kenarlara yakın veriler de güvenilmez durumdadır. Sadece belirli bir yüzeyin ölçülebileceği durumlar da mevcuttur, eksik parçalar veya diğer elemanlar tarafından engellenen parçalar da vardır ancak sadece görünen kısımlardan tüm yüzeyi tekrar oluşturulmak durumundadır.

Tersine mühendislik yöntemlerinin verilen bir şekli tekrar oluşturmaya çalışması durumunda taranan parçanın tolerans dağılımı göz önüne alınmalıdır. Bu durum çoklu parça taramalarına ve sonuç verilerinin ortalanmasına yol açar.

Son madde de ölçülen parçanın yüzey bitirmesi ile ilgilidir. Düzgünlük ve malzeme kaplama veri elde etme prosesini ciddi biçimde etkileyebilir. Temaslı veya optik yöntemler pürüzlü bir yüzeyde pürüzsüze oranla daha fazla parazite neden olur. Yansıtıcı kaplama da optik yöntemleri etkileyebilir. İnsan yüzlerini tararken ışık gözden veya gözlüklerden yansıyınca sıklıkla parazit oluşur. Saç, tarama sırasında çok fazla problem çıkaran kaba bir yüzeydir.

İdeal bir tarayıcıda obje 3D uzayda yüzmektedir, bu sayede tüm doğrultulardan erişime açıktır. Veriler, bir koordinat sisteminde parazit filtreleme ve çakıştırmaya gerek duymadan yüksek hassasiyetle toplanabilir. Muhtemelen ölçüm uyarlanabilir biçimdedir, yani yüksek eğrilğe sahip yüzey kısımlarında daha fazla nokta toplanabilir. Ne yazık ki günümüzde böyle bir cihaz mevcut değildir. Ancak uygulama problemlerinden ötürü açıklanan yöntemleri kullanarak bugün bile kısa sürelerde büyük miktarda veri toplamak mümkündür. Ölçüm verileri elde edilince tanıma ve model oluşturma prosesleri başlatılabilir.

1.14.3. Şeklin Global Karakterizasyonu

Tersine mühendisliğin esas gayesi ayırık veri takımını parçalı düzgün, sürekli bir modele dönüştürmektir. Ayırık veri takımı ölçülen veri noktalarının (x, y, z) koordinat değerlerini içerir. Verilerin organizasyonunu göz önüne alınarak nokta takımını dağınık veya düzenli olarak sınıflandırılabilir. Dağınık durumda noktalar rasgele veya manuel noktasal örneklemeden gelir. Düzenli durumda ise ölçümler tarama çizgileri dizisi şeklinde sonuçlanan dış çizgiler veya dilimleme düzlemleri boyunca meydana gelebilir; her bir tarama çizgisi dahilinde bir nokta dizisi mevcuttur. Alternatif olarak ölçümler menzil bulucuların ızgara yapısında olduğu gibi iki boyutta düzenli olarak organize edilen noktalar sağlayabilir [Hoppe et al, 1993].

Diğer önemli bir konu da komşuluk bilgisidir. Örneğin, düzenli bir ızgara adım süreksizlikleri haricinde bağlantı oluşturan tam komşuluk bilgisi sağlar. Dağınık bir veri takımında spesifik bir üçgenlere ayırma da veri noktaları ile ilişkilendirilmediği sürece komşuluk bilgisi genellikle boş olacaktır.

Üçgenlere ayrılmış modeller bilgisayar grafikleri ve animasyon alanlarında büyük önem kazanır.

Oluşturulan modelin tam şekli model için tasavvur edilen kullanıma bağlıdır. Bir alternatif de yüzlerin bir koleksiyonunu oluşturmaktır; mesela komşu elemanlar arasında bağlantıyı veya sürekliliği zorlamadan veya topolojik ilişkileri açık bir biçimde saklamadan düzlemsel görünümler veya yüksek dereceden yüzey yamaları buna örnek olarak gösterilebilir. Bu durumda veri noktaları yığınının yoğun biçimde kaplandığı varsayılarak ve daha fazla hesaplama için komşuluk bilgisinin gerekmemesi koşuluyla elemanlar arasındaki küçük boşluklar problem oluşturmayacaktır. Buna verilebilecek tipik örnekler pek çok bilgisayar görüntüleme işi veya tıbbi uygulamalarda kullanılan yüzeyler için yeterli olan kuadratikleri veya $z = f(x,y)$ yüzeylerinden yararlanan gösterimleri içerir.

CAD/CAM uygulamalarının büyük kısmında veri yapısındaki bağlanabilme özelliği ve süreklilik çok önemlidir. Örneğin ilgili ver takımının mükemmel bir gösterimini gerektiren imalat yöntemlerinin bir çoğu büyük ölçüde yüzey tipine bağlıdır. Sonuçta bunlar tahminen perdahlama veya delme ile imal edilen fonksiyonel yüzler olabileceğinden kesimleri yaklaştırarak bir düzlemi veya silindirik bir deliği göstermek yeterli olmayacaktır. Makinede işlenen yüzeyde gereğinden fazla malzeme birikintisi kalabileceğinden verilen toleranstan daha büyük boşluklar da problemlere yol açabilir. Üstelik araba gövdesi panelleri gibi estetik parçalar da yüzey elemanları arasında en azından ikinci dereceden süreklilik gerektirir ki bu da yine oluşturulan matematiksel model ile sağlanmalıdır [Schroeder et al, 1992].

Bu daha yüksek dereceden geometrik modellerde bir sınır gösterimi (B-rep) modeli varsayılır. Bu modelde objenin yüzeyi her biri bir veya daha fazla kenar döngüsü ile sınırlanmış bir yüz seti ile gösterilir. B-rep'ler ile kısmi modellerle tam modeller birbirlerinden ayırt edilebilir. Kısmi modellerde tersine mühendislik prosedürünün sonucu objenin sadece bazı parçalarından oluşan bir model olacaktır; örneğin bir panelin görünür kısmı veya iyi tanımlanmış fonksiyonel bir detay gibi. Birden fazla görünümün birleştirilmesi ile oluşan tam modellerde ise objenin tüm sınır elemanlarını içeren tam bir katı model oluşturulur.

İdealde herhangi bir kullanıcı etkileşimine gerek duymadan kararlar alabilen ve sınıflandırma yapabilen tam otomatik bir tersine mühendislik sistemine sahip olmak tercih unsudur. Tersine mühendislik proseslerini yerine getiren bir insan için bir objenin düzlemsel yüzlere sahip olup olmadığını veya tüm objenin her yerinin düzgün olup olmadığını anlamak kolaydır. Oluşturulacak nihai modeli belirleyeceğinden ve hesaplamalar etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olacağından bir bilgisayar için bu tip bir bilgi kritiktir. Burada gereken bilgi objede hangi çeşit yüzey elemanlarının olacağını – global karakterizasyonu – belirleyebilir ve belirli eşik değerleri oluşturabilir. Örneğin, silindirik bir yüzeyden bir dizi ölçüm noktası alalım (bu veriler parazitlidir ve hassas değildir). Silindirik yüzeylerin var olabileceği kabullenilirse, ölçüm toleranslarını doğru biçimde belirleyerek daha genel yüzey tiplerini göz önüne almadan önce veriye bir silindir tam olarak yerleştirilebilir. Bununla beraber, silindir aranmıyorsa veya toleranslar hatalı biçimde belirlenmişse

bu özelliğin tanınması olanaksızlaşır ve alan bazı serbest şekilli yüzey elemanı ile gösterilir [Rossignac and Borrel, 1993].

Yukarıdaki örnekleme geometrik komplekslik mertebesinde Şekil 1.14’de gösterilen yüzey tipi hiyerarşisi belirlemenin önemini gösterir. Basit tiplerin kompleks tiplerden daha güvenilir biçimde çıkarılabileceği unutulmamalıdır, yani bir düzlemin bulunduğu düşünülüyorsa, muhtemelen bu konuda herhangi bir yanılgı yok demektir.

Bu hiyerarşi kompleks objeleri tanımlarken şu kullanışlı çıkarım ile birleştirilebilir. Objelerin göreceli olarak büyük birincil veya fonksiyonel yüzeyler tarafından sınırlandırılmışı söylenebilir. Birincil yüzeyler keskin kenarlar boyunca birbirleri ile karşılaşabilir veya bunlar arasında pürüzsüz geçişler sağlayan ikincil veya blend yüzeyleri olabilir. Ayrıca keskin kenar kavramı da bir çıkarımdır: fiziksel deyişle keskin bir kenar yoktur ancak eğrilik yarıçapının çok küçük bir değerden daha düşük olması durumunda tüm kenarlar için bu kavram kullanılabilir ve bu bağlamda model de keskin kenarları içermelidir (Bu eşik değeri tahminen ölçümlerin çözünürlüğünden düşük olacaktır). Alternatif olarak kullanıcı ölçüm verilerinin süreksizlikler boyunca güvenilir olmamasından ötürü komşu yüzler arasına her zaman küçük blendler yerleştirme ihtiyacı duyulabilir.

Birincil yüzey elemanlarının hiyerarşisine geri dönülürse, ilgi pek çok CAD/CAM sisteminde standart gösterim olarak kullanılan yüzey tipleri ile sınırlanmak durumundadır. Hem basit açık hem de parametrik gösterimlere sahip basit yüzeylerle başlanır ve daha genel parçalı parametrik yüzey gösterimleri ile sonuçlandırılır. Düzlem, doğal dörtgenler ve halkalar gibi basit yüzeylerin avantajı birkaç - geometrik olarak anlamlı - parametre ile basit bir gösterimlerinin olmasıdır. Bu durum parçalara ayırmayı ve yüzey uydurmayı nispeten kolay hale getirir. Makine mühendisliğinde en fazla öneme sahip oldukları için doğal dörtgenlerin alt sınıfının (küre, silindir ve koni) ele alınması tercih edilir. Doğal dörtgenlerden farklı olarak genel dörtgenler çok az sayıda bulunur. Ayrıca bunlar doğrudan geometrik tanımlama yerine cebirsel katsayılar ile belirtilir ki bu da parçalara ayrılma durumunu daha da güç hale getirir.

Daha genel serbest şekilli yüzey elemanlarını ele alınırsa, sırasıyla profil eğrisi ve bir tarama doğrultusu veya bir dönme eksenini ile karakterize edilen basit iletimsel ve döner taramaları da göz önüne almak gerekir. Bu sınıflandırma daha genel taramalar tanımlanarak genişletilebilir. En sonunda en genel yüzey sınıfı herhangi bir geometrik veya topolojik düzenin tanımlanamayacağı kompozit yüzey elemanlarıdır. Bu kompozit yüzey elemanı bir yamalar topluluğu veya kırılmış yamalar olabilir.

Blendler sadece fonksiyonel bakış açısı ile değil aynı zamanda komşu yüzey elemanları arasındaki boşlukların dikilmesi veya iyileştirilmesi bakımından da önemli bir rol oynamakta ve bu sayede geometrik modelin tam olarak tutarlılığını sağlamaktadır [Hermann et al, 1996].

Gösterim açısından ise yüzeyler arasındaki kenarlar boyunca ilerleyen kenar blendleri ile pek çok kenar blendlerinin bulunduğu bağlantı yerlerinde de pürüzsüz geçiş yüzeyleri sunan köşe blendlerini birbirinden ayırt etmek gerekir.

Yukarıdaki sınıflandırma doğal hareketlerin düzlemsel kesmeler (bir frezede yüz kesme) veya yüksek hassasiyetle döner kesmeler (torna) ve geri kalan çoğunlukla serbest şekilli elemanların daha az hassasiyetle 3 ve 5 eksenli frezelerde işlenmesi gibi geleneksel makinede işleme operasyonları ile de bağlantılıdır.

1.14.4. Parçalara Ayırma ve Basit Yüzey Uydurma

Başlangıç verilerinin objenin yüzeyinden örneklenen yoğun bir nokta takımı şeklinde olduğu kabul edilir; noktalar objenin yüzeyi üzerindeki belirli anahtar eğriler boyunca sayısallaştırıldığında daha farklı yöntemlere gereksinim duyulacaktır (anahtar eğrileri seçmek için insan etkileşimi gerekeceğinden tam otomatik bir yöntem yoğun bir veri oluşturmaya eğilimlidir). Amaç objenin şeklinin bir yüzey takımı formunda daha yüksek seviyede bir gösterimini oluşturmaktır. Muhtemelen bunların sınır eğrileri de bu aşamada oluşturulacaktır ancak her bir yüzeyin komşularına her bir yüzey boyunca uzanan bir sınır eğrisi ile gerektiği gibi

bağlandığından emin olmak için daha sonraki aşamalarda ilave proseslerin uygulanması da mümkündür.

Obje yüzeyinin keskin veya düzgün kenarlar boyunca karşılaşılan muhtelif bileşen yüzeylerine doğal olarak ayrılabilceği varsayıldığında bunlardan bazıları düzlemsel veya silindirik yüzeyler gibi basit yüzeyler olurken diğerleri daha genel serbest şekilli yüzeylerle gösterilecektir. Bu aşamada çözümlenecek şekil rekonstrüksiyonları şöyle sıralanabilir:

segmentasyon: orijinal nokta takımını bir tanesi her doğal yüzeye tekabül edecek şekilde alt gruplara bölmek; bu sayede her alt grup sadece belirli bir doğal yüzeyden örneklenen bu noktaları içerir.

sınıflandırma: her bir alt nokta takımının hangi tip yüzeye ait olduğuna karar verir (mesela düzlemsel, silindirik).

uydurma: verilen yüzey tipinin verilen alt takımdaki hangi noktalara en iyi uyduğunu bulur.

Bu işlevlerin pratikte yukarıda verilen sırada uygulanamayacağı unutulmamalıdır; mesela bir noktanın verilen bir alt takıma ait olup olmadığına karar vermek bu noktanın alt takımda noktaların gösterdiği alttaki yüzeye ne kadar uyduğunun ölçülmesini gerektirir. Bu sayede pratikte bu problemlerden her birinin eşzamanlı olarak çözüldüğü bir yaklaşıma gerek duyulur ve tutarlı bir cevaba yaklaşmak için gerileme, tekrarlı yöntemler veya olasılık yöntemleri kullanılır. Bu kontrol problemlerine makul bir yaklaşım Leonardis ve arkadaşları tarafından verilmiştir; bu yaklaşımda birkaç olasılık paralel olarak ele alınmış ve bir optimizasyon problemi çözülerek nihai cevap bulunmuştur [Leonardis et al, 1995].

Segmentasyona iki farklı yaklaşım söz konusudur; kenar-tabanlı ve yüz-tabanlı yöntemler. Kenar-tabanlı yaklaşım yüzeyler arasındaki kenarları temsil eden nokta verilerindeki sınırları bulmaya çalışır. Şayet keskin kenarlar aranacaksa nokta bulutundan tahmin edilen yüzey normallerinin aniden yön değiştirdiği konumlar bulunmalıdır, eğer düzgün (teğet-sürekli) kenarlar da mümkünse yüzey eğriliklerinin

veya diğer yüksek türevlerin süreksizliğe sahip olduğu konumlara bakılmak zorundadır. Bu teknik verideki kenar eğrilerini bulmaya çalışır ve kenar eğrileri ile sağlanan açık segmentasyondan yüzeyleri çıkarır. Bu yaklaşımın temsili bir örneği Smith ve Kanade tarafından açıklanmıştır [Smith and Kanade, 1985]. Diğer bir kenar-tabanlı segmentasyon tekniği de Milroy ve arkadaşları tarafından sunulmuştur; burada sarımlı objeler parçalara bölünür. Bu yaklaşıma göre yüzlerin kenar döngülerini elde etmek için pek çok kullanıcı tanımlı “çekirdek döngüler” arttırılır [Milroy et al, 1997].

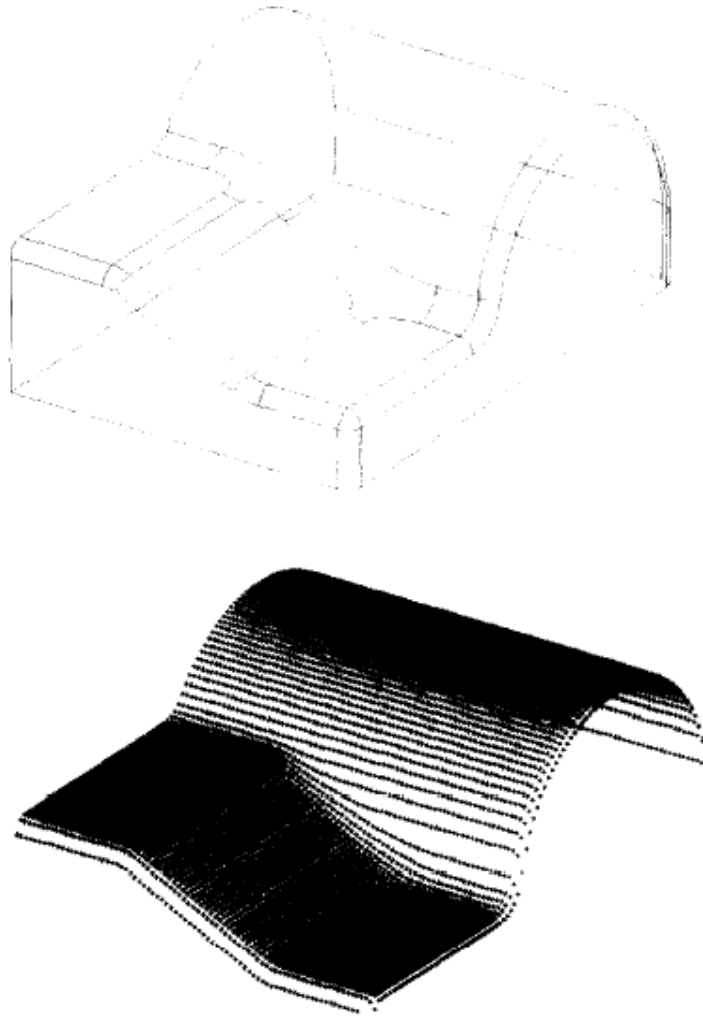
İkinci teknik tersine bir yol izler ve noktaların bağlantılı bölgelerini aynı yüzeye ait olacak şekilde benzer özellikler ile çıkarmaya çalışır (mesela aynı düzlemdeki aynı normale sahip nokta grupları), kenarlar yüzeyden kesişme veya diğer hesaplamalar ile türetilir.

Bu iki yaklaşımı karşılaştırılarak şu gözlemlerde bulunulabilir. Kenar-tabanlı teknikler şu problemleri içerir. Bilhassa lazer tabanlı tarayıcılardan kaynaklanan sensör verisi keskin kenarların civarında düzgün yansımada dolayı sağlıklıdır. Veriyi parçalara bölmek için kullanılan nokta sayısı azdır, sadece kenarların yakınındaki noktalar kullanılır; bunun anlamı sağlıklı bir segmentasyona yardımcı olmak için veriden gelen bilgilerin çoğunun kullanılmadığı anlamına gelir. Bu da tesadüfi gerçek olmayan veri noktalarında göreceli olarak yüksek duyarlılık demektir. Parazitli nokta verilerinin türevlerinin hesaplanması hata eğilimli olduğundan teğet-sürekli ve hatta daha yüksek sürekliliğe sahip olan düzgün kenarları bulmak oldukça sağlıklıdır. Öte yandan şayet ilk önce hataları azaltmak için veriye düzeltme uygulanırsa gereken türevlerin tahminleri bozulur. Böylece keskin kenarlar kenar bulma prosesini zorlaştıran küçük yarıçaplı blendler ile değiştirilir; ayrıca parazitli filtreleme ile özelliklerin pozisyonları da değişebilir.

Diğer taraftan yüze-dayalı tekniklerin şu avantajları vardır. Bunlar mevcut tüm verileri kullanarak daha fazla sayıda nokta üzerinde çalışır. Hangi noktaların hangi yüzeye ait olduğuna karar vermek bu yöntemler tarafından sağlanabilir, kenar-tabanlı yöntemlerle bir kenar takımını bulduktan sonra bile verilen bir noktanın hangi yüzeye ait olduğunu açıkça bulmak kolay olmayabilir (3D kenarlar bir uzay alanı çevrelemez). Bu tip yaklaşım bir yan mamul olarak noktaların yüzeye en iyi biçimde

uydurulmasını sağlar. Buna göre yüz-tabanlı yaklaşım kenar-tabanlıya göre tercih edilir [Vida et al, 1994].

Gerçekte segmentasyon ve yüzey uydurma “tavuk ve yumurta” problemine benzer. Şayet uydurulacak yüzeyi bilinseydi, derhal yüzeye kısa bir mesafede bulunan bu noktaları seçerek bu yüzeye ait örnek noktaları belirlenebilirdi. Şayet yüzeye ait olan nokta takımları tam olarak bilinseydi en iyi yüzey sınıfı ve bu sınıf dahilindeki en iyi uydurma yüzeyi bulunabilirdi. Ne yazık ki bunların hiç biri gerçekte mümkün değildir. Otomatik segmentasyonun güçlükleri Şekil 1.15’de de görüldüğü gibi basit objelerden veri noktalarını işlerken bile görülebilir. Bu problemin üstesinden gelmek için tekrarlanan yöntemler uygulanabilir [Besl and Jain, 1988].



Şekil 1.15; Basit bir katı obje ve ölçüm verileri

Segmentasyona yüz-tabanlı bir yaklaşım adapte ettiğimizi varsayalım. Aşağıdan yukarı yöntemler ilk olarak çekirdek noktalarından başlar. Bunların etrafındaki sürekli olarak tek bir yüzeye ait olduğu varsayılan küçük başlangıç komşulukları veya noktalar oluşturulur. Aynı yüzeye ait olarak sınıflandırılan lokal diferansiyel geometrik ve diğer teknikler ilave noktaları eklemek için sonradan kullanılır. Mevcut bölgenin yakınında daha fazla ‘sürekli’ nokta kalmayınca büyüme durur. Tipik olarak bu tip pek çok bölge paralel olarak büyüyebilir ve temas edene dek büyüyen bölgeleri birleştirmek için fazladan bir adım gerekebilir ve aynı yüzeyi işaret ettikleri için uyumlu oldukları görülür.

Pratikte büyüme aşaması sırasında bölgenin hangi yüzeyi temsil ettiği konusu değişkenlik gösterebilir. Örneğin bir nokta takımı başlangıçta bir düzlem ile oldukça iyi biçimde temsil edilebilir ancak ilave noktalar eklendikçe bölgedeki noktaların büyük yarıçaplı bir silindire ait olduğunu varsaymak gerekebilir. Bölge korunur ancak bölgenin hangi taban yüzeyine ait olduğuna dair fikrimiz çeşit ve parametre bazında değişebilir. Bölgenin büyümesi ile ilgili son teknoloji örnekler Leonardis ve arkadaşları ve Sapidis ve Besl tarafından yapılan araştırmalarda bulunabilir [Leonardis et al, 1995; Sapidis and Besl, 1995]. Fitzgibbon ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada düzlemsel ve dörtgen yüzeylerin bölünmesinden sonra komşuluk bilgisinin de elde edildiği ve özel bir B-rep veri yapısına dönüştürüldüğü görülür [Fitzgibbon et al, 1994].

Öte yandan yukarıdan aşağıya yöntemler tüm noktaların tek bir yüzeye ait olduğu önermesi ile başlar ve ardından bu hipotezin gerçekliğini test eder. Şayet noktalar uyumlu ise yöntem gerçekleştirilir, yoksa noktalar iki veya daha fazla yeni gruba ayrılır ve tek bir yüzey hipotezi bu alt gruplara tekrarlı olarak uygulanır. Proses oluşturulan tüm alt gruplar hipotezi gerçekleyene kadar devam eder. Yüzey segmentasyonu ile ilgili tüm yaklaşımlar aşağıdan yukarı yaklaşımını benimsemiş gibi görünmektedir [Besl and Jain, 1988]. Yukarıdan aşağı yaklaşımı ise görüntünün segmentasyonu yaklaşımında oldukça başarılı sonuçlar verir, bu yöntemin yüzey segmentasyonunda kullanımı nadirdir [Pietikainen et.al, 1982].

Ancak her iki yaklaşımda beraberinde muhtelif sorunları getirir. Aşağıdan yukarı yaklaşımda şu noktalar söz konusudur: yüzeyi büyötmeye başlatan iyi çekirdek noktalarının seçimi güç olabilir; açıkçası bir kenarın üzerinde bulunan bir çekirdek nokta uygun olmayacaktır. Çekirdek noktaların üniform olarak dağıtılıp dağıtılmayacağına karar verilmelidir. Şayet bir tip yüzeyden fazlası göz önüne alınacaksa bir bölge için hangi yüzey tipinin kullanılacağına seçilmesi ve bölge büyödükçe bu yüzey tipinin değıştirilmesi dikkatli bir hesaplama gerektirir. Ayrıca, halihazırda bölgeye ait noktalara dayana hipotezin güncellenmesi dikkatli bir biçimde yapılmalıdır; şayet kötü noktalar yanlışlıkla bölgeye eklenirse bu durumda o yüzeyin tabiatı ile ilgili mevcut tahminler bozulmaya uğrayacaktır. Tesadüfi bir kötü nokta ile karşılaşıldığında bölgenin büyümesinin vakitsiz bir biçimde durması istenmez. Bölgeye nokta eklenip eklenmeyeceğı kararını vermek de güç olabilir zira karar parazite karşı hassas olan lokal geometriye bağılı olarak verilir.

Yukarıdan aşağı yaklaşımla ilgili önemli bir problem de nerede ve nasıl alt bölümlere ayırma işleminin yapılacağıdır. Genellikle alt bölümlere ayırma doğal bir sınır yerine düz bir çizgi boyunca yapılır ve pratikte parçaları tekrar birleştirmek için adımların birleştirilmesi de gerekir. Bunun sonucu çentikli kenarlar oluşabilir. Yüzeyler birbirlerine yavaşça ve pürüzsüz bir biçimde eklenince seçilen alt bölümlere ayırma prosesi gerçek sınırdan bir miktar uzakta kalabilir ve yanlış yerde alt bölümlere ayırma sonucu bir hayli ekstra çalışma gerekebilir. Yukarıdan aşağı yaklaşımla ilgili diğeri bir önemli sorun da bölme işleminden sonra yüzey parametre tahminleri en baştan hesaplanmalıdır; aşağıdan yukarı yaklaşımda bölgeye yeni noktalar eklendikçe parametre tahminleri artan bir biçimde güncellenebilir ve sonuçta daha az sayıda hesaplama işlemine başvurulur. En iyi durumda bu problem zaman kaybına neden olacak ve en kötü şartlar altında da başarısız segmentasyon ile neticelenecektir. Nihayetinde dikkatli bir biçimde kontrol edilmedikçe her iki yaklaşım da düzlemsel veya dörtgen yüzeylerin pek çok küçük parçası biçiminde modele dahil edilmeyen kompleks bir serbest şekilli yüzeyi gösterecek şekilde sonuçlanmaya yatkındır ki bu da istediğimiz bir sonuç değildir.

Basit yüzey tipleri için yüzey uydurma genellikle segmentasyon prosesi sırasında uygulanır çünkü bir yüzey için hem çeşit hem de bazı yüzey parametrelerini tahminini içeren bir taban modeline sahipsek sadece tüm nokta alt takımlarının aynı

yüzeye ait olup olmadığını belirleyebiliriz. En küçük kareler yöntemini kullanarak düzlemleri nokta verilerine uydurmak istikrarlı ve oldukça güvenilir bir prosestir. Genel bir dörtgen pek çok parametreye sahiptir ve uydurma problemi nümerik olarak başarısızlığa uğrayabilir. Pratikte genel bir dörtgeni parazitli, gerçek bir veriye uydurmaya çalışmak bilhassa segmentasyon bağlamında kötü sonuçlara neden olabilir. İlgiyi sadece doğal dörtgenler ile sınırlayarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir – daha önce de belirtildiği gibi bu taramaların her biri daha az sayıda parametre ile temsil edilebilir [Marshall and Martin, 1992].

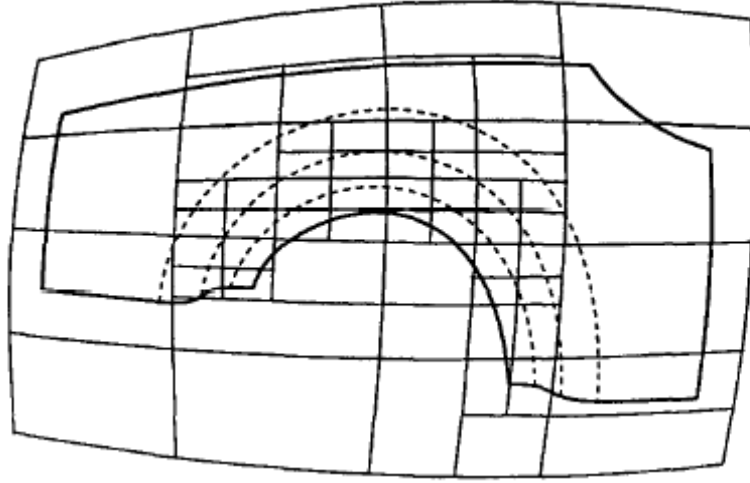
1.14.5. Serbest Şekilli Geometri İçin Segmentasyon ve Yüzey Uydurma

Düzlem ve silindir gibi basit yüzeyler için segmentasyonu gerçekleştirmek kolay olmadığı gibi serbest şekilleri bölmeye çalışırken ilave güçlükler çıkar. İç kısımları pürüzsüz olan ve kenar döngüleri ile sınırlanmış kompozit serbest şekilli bir yüzeye sahip olduğumuzu varsayalım. Bu kenarlar bazı taban yamalarının kısmen veya tamamen sınırları veya yama yapısını boylu boyunca kesen kırpma eğrileri olabilir. Bu tip kırpma eğrileri kesişim, Boolean işlemleri veya blend gibi operasyonlarla belirlenebilir. Örneğin büyük, tek bir yüzeyi yüksek geometri kompleksliği ile tekrar oluşturmak veya katı bir objenin kalanından ayrılmış olan kompozit bir serbest şekilli yüzey ile ilgilenilebilir.

Bezier yamaları ve NURBS yüzeyleri gibi en sık kullanılan parametrik yüzeyler, yüzey yamalarında dört sınır eğrisi ile sonuçlanacak şekilde dikdörtgen parametrik bir etki alanını 3 boyuta eşleyebilir. Tamamlayıcı elemanlar arasında uygun sürekliliği korumak için pek çok yüzey parçasının bir birleşimi gereklidir. Burada anahtar nokta bu ilave serbest şekilli segmentasyonun nasıl yapılacağıdır; mesela bu tip lokal bölgeleri tasvir eden ve tek bir yüzey yaması ile gösterilen uygun iç sınırların nasıl bulunacağı gibi..

Serbest şekilli segmentasyon ile ilgili dört önemli yaklaşım mevcuttur: bunlar global yaklaştırma yüzeyleri, eğri ağı tabanlı yüzeyler, keyfi topoloji yüzeyleri ve fonksiyonellik ayrıştırma yüzeyleridir.

İlk yaklaşımda büyük, kabaca yaklaştırılan dört yüzlü bir yüzey seçilir. Hareketli sınırları ve köşe noktaları tüm veri noktaları yüzey sınırı dahilinde olacak şekilde seçilir (nokta verisinin burada tüm objenin sadece bazı kısımlarını gösterdiği ve tüm kapalı yüzeyi temsil etmediği varsayılmaktadır). Yaklaştırma yüzeyinin üzerindeki denk noktaları seçtikten sonra yüzey noktaları ve ölçülen veri noktaları arasındaki uzaklıklar en küçük kareler yöntemi ile minimize edilebilir [Hoschek and Lasser, 1993]. Bu prosedürler sayesinde yüzeyin serbest parametreleri hesaplanabilir. En iyi uyan yüzeyi bulduktan sonra ölçülen noktaların yüzeyden olan gerçek uzaklıkları değerlendirilebilir. Şayet bunlar çok büyükse parametrizasyonu ve tekrar uydurmayı tekrarlı olarak geliştirme denenebilir. Eğer sonuç çok kötü ise daha iyi bir uydurma sağlamak üzere daha fazla serbest parametreye sahip yeni bir yaklaştırma yüzeyine ihtiyaç vardır. Bu yüzey önceden elde edilen yüzeyi alt bölümlere ayırarak veya lokal iyileştirmeler ile oluşturulabilir. Dışarıda pozisyonel kısıtlamalar olmadığı için yaklaştırma yüzeyinin dış kısımları kontrolsüz bir şekilde davranacaktır. Bununla beraber bu önemli değildir çünkü dahili olarak iyi bir uydurmaya ulaşılmıştır ve ölçülen veri noktalarının etrafında oluşturulan kırpma eğrileri kullanışlı yüzeyi geri kalandan ayırmaya yardımcı olacaktır. Bu çeşit bir yüzey gösterimi Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16; Global yaklaştırma yüzeyi [Varady et al, 1997]

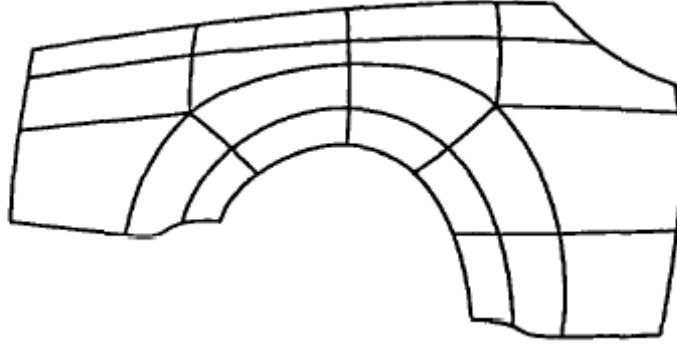
Bu tekniğin temel avantajı göreceli olarak basitliğidir ancak açıklandığı gibi sonradan iyileştirilebilecek yeterince iyi bir başlangıç yüzeyini açık bir biçimde oluşturma gereği yoktur. Tekrarlı en küçük kareler uydurma ve alt bölümlere ayırma ile sonunda bir yüzey modeli elde edilir ve uygulamada herhangi bir kullanıcı etkileşimine gerek duyulmaz. Mühendislik bakış açısından bunun temel dezavantajı şeklin taban yapısını yorumlamak için herhangi bir girişimde bulunulmaz. Örneğin tek bir yüzey biçiminde doğal bir yolla gösterilebilen oluklar veya serbest şekilli cepler başlangıç yüzeyinin nasıl yöneldiği ve alt bölümlenmenin nasıl yapıldığına bağlı olarak pek çok ayrı küçük yüzey elemanlarına ait olabilir.

İkinci bir yaklaşım sınırın keskin kenarları, ekstremum eğriliklerin çizgileri, simetri çizgileri olabilen karakteristik eğri dizisi ile yüzeyi bölen bir eğri ağına dayalıdır. Eğri ağını oluşturmak zor ve potansiyel olarak sağlıksızdır. Evvela eğri ağını belirlemek için farklı özelliklerin parazit açısından oldukça şüpheli olmaları tahmini ile sadece lokal eğri ağı belirlenmelidir. Bu tip ağların otomatik yaması bu yüzden genellikle yapılamaz ancak bunun yerine kullanıcının eğri ağını belirlenmesine yardımcı olduğu interaktif çözümler kullanılır. İlaveten, hangi karakteristik eğrilerin mühendislik açısından önem taşıdığı ve kullanışlı olduğu açık değildir. Kullanıcı karakteristik köşeleri seçmeli ve bağlayıcı kenar eğrilerini tanımlamalıdır, bu sayede iç yüz yapısı Şekil 1.16'da gösterildiği gibi açık bir

biçimde tanımlanır. İlave yamalar uygulanır ve sonuçta tüm yüzey dört yüzlü yamalarla kaplanır. Kompozit serbest şekilli yüzeyin sınırları açık bir biçimde eğri ağına dahil edildiğinden bu gösterim iç kırpma gerektirmez.

Yüzleri bölgelerin sınırları boyunca uydurmak nispeten kolaydır. n -yüzlü bölgelerin dört yüzlülere nasıl bölüneceği, T-düğümeleri oluştuğunda eğrinin nasıl tekrar oluşturulacağı ve sınırlar boyunca komşu parametrik yamaların pürüzsüzce birleştirileceği ile ilgili birçok yayın mevcuttur [Farin, 1980; Hoschek and Lasser, 1993]. Her bir eğri parçasına uygun kesit-türevli fonksiyonlar atanır ve son aşamada sınırlar boyunca önceden belirlenmiş pozisyonel ve teğetsel kısıtlamaları sağlayan yamalar lokal olarak oluşturulur. Bu yaklaşımın avantajı yama yapısının kullanıcının yüzey yapısı ile ilgili konseptini yansıtmasıdır ve bu teknik tüm yüzey için G^1 veya G^2 sürekliliğini garanti eder. Aynı zamanda bir eğri ağının dört yüzlü yamalarla uygulanması yapay sınırlar da oluşturur, söz gelimi doğal olarak beraber ait olan parçalar ayrılabilir. Bu, örneğin global bir yüzey kaplama gerektiğinde kritik bir olgudur ancak yapay iç segmentasyon fonksiyonel olarak bağlı parçaları ayırır. Taban geometrisinde ufak bir değişiklik eğri ağının yapısında nispeten daha büyük değişimlere yol açabilir. İlaveten, bazen kırpma eğrilerini ağına doğal bir biçimde dahil etmek güç olabilir.

Üçüncü yaklaşım – keyfi topoloji yüzeyleri – Şekil 1.17’de verildiği gibi önceki iki yaklaşımın bir kombinasyonunu temsil eder. Burada keyfi bir topoloji ile otomatik olarak global bir yaklaştırma yüzeyi oluşturulur. Yama yapısı taban üçgenlere ayırma basitleştirilerek oluşturulur ve bu, nihai yüzey için özel bir parametrisasyon sağlar. Buna dayanarak önce parçalı polinom yüzeyleri ile ara değeri bulunan genel bir topoloji serbest şekilli eğri ağı oluşturulur. Tüm sınırlarda sürekliliği sağlamak için özek konstrüksiyonlar uygulanır. Bu yaklaşım için tipik gösterimler Eck, Hoppe ve Guo tarafından yayınlanmıştır [Eck et al, 1995]. Keyfi topoloji yüzeylerinin avantajları ve dezavantajları ayrıca önceki iki yaklaşımı da birleştirir. Bu durumda şeklin topolojik yapısını yansıtan pürüzsüz bir biçimde bağlanmış, kırılmamış yamalar topluluğu elde edilir. Aynı zamanda bu yöntemlerin temeli şeklin nasıl alt bölümlere ayrılacağı ile ilgili bilgi taşımayan üçgensel veri yapısına dayandığı için bu topluluk şeklin fonksiyonel yapısını yansıtamaz.



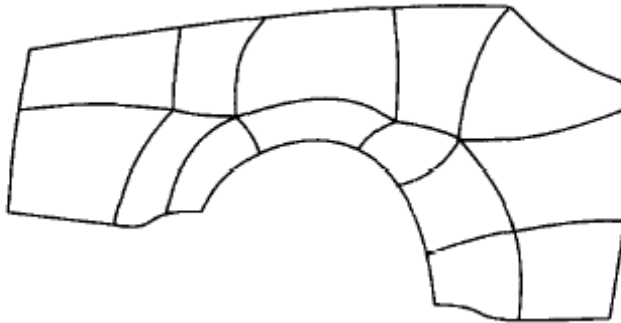
Şekil 1.17; Eğri ağı tabanlı yüzey [Varady et al, 1997]

Tabi ki fonksiyonel ayrıştırmaya dayalı bu dördüncü yöntemin de güçlükleri vardır. Buradaki temel fikir bir şekilde verilen bir şeklin ardındaki tasarım fikrini keşfetmektir. Şayet orijinal fonksiyonel yüzey elemanlarının ne olduğu ve nihai şekli elde etmek için hangi modelleme işlemlerinin gerçekleştirildiği gibi şeklin nasıl oluşturulduğu ile ilgili bilgi varsa orijinal yüzeyi bulmak ve münferit yeniden yapılandırılmış yüzeyleri kullanarak işlemleri tekrarlamak mümkündür. Tüm şekil, Şekil 1.17'deki gibi ötelemeli bir yüzey ile üçüncü bir blend yüzeyi ile perdelanmış döner bir simetriye sahip başka bir yüzey arasındaki bir kesişimdir. Bu tip bir gösterim mühendislik bakış açısından ideal görünmektedir ancak pek çok problem çıkabilir. Öncelikle şu anki bilgiyle verilen modelin CAD tarihçesini açıklayan bir bilgi olmadıkça kullanıcı etkileşimi olmadan genel fonksiyonel elemanları bulmak oldukça zordur. Üstelik tüm bir yüzeyi uydurmak zorunda olduğumuzdan yüzey uydurma problemi de vardır; ancak sadece bunun iyi tanımlanmış bir parçası ölçüm verileri ile gösterilebilir. Örnekte kesişim ve blend işlemleri esnasında kaybolan kısımlar mevcuttur. Bu yöntemin en önemli avantajı şeklin uygun bir mühendislik ayrıştırmasını sağlamasıdır. Dezavantajı ise parça ile ilgili oldukça yüksek miktarda etkileşim veya detaylı bir önsel bilgi gerektirmesidir. Önceki yöntemlerle kıyasla burada yüzey elemanları iç kırpma eğrileri boyunca birbirlerine bağlanmasıdır, bu sayede tam matematiksel sürekliliğin temini güçtür. Yüzey elemanları nümerik süreklilik ile birleşecek ve bağlantıların eşleşme pozisyonları ve teğet düzlemlere ilişkin öngörülen sistem toleransları dahilinde kalması için özel dikkat gösterilmelidir [Fisher, 1994].

Prensipte iyi bir sistemin yüzeyin farklı bölgelerinde yukarıdaki dört yaklaşımı birleştiren bir sistem olması gerekir.

Tersine mühendislik yayınlarının çoğunluğu dört yüzlü yüzeylerin ölçüm verilerine uydurulması ile ilgilidir. İlave pratik problemler şöyledir. Verilen bir yüzeyde ölçülen veri noktaları için iyi parametre değerlerini bularak yüzey üzerindeki noktalarla ilişkilendirmek nasıl mümkün olabilir: bu konuda Hoschek ve Lasser ve Ma ve Kruth çalışmalar yapmıştır [Hoschek and Lasser, 1993; Ma and Kruth, 1995]. Diğer bir konu da sadece uzaklıkların bir fonksiyonunu asgariye indirmenin yeterli olup olmadığı veya yüksek dereceden türevleri de hesaba katarak bazı yüzey enerjisi çeşitlerini minimize etmek için daha ileri yüzey kaplama tekniklerinin gerekli olup olmadığı konusudur. Bu yöntemler genellikle hesap olarak oldukça pahalı olan lineer olmayan denklem sistemlerine neden olur. Yüzey kaplama ile ilgili literatür oldukça kapsamlıdır ve yöntemler belirli kısıtlamaları olan ideal bir şeklin oluşturulmasının gerekli olup olmadığına veya mevcut veya yaklaştırma yüzey gösteriminin iyileştirilmesi gerekip gerekmediği farklılık gösterir [Celniker et.al, 1991; Farin and Spadis, 1989; Greiner, 1994; Hoschek and Lasser, 1993; Moreton and Sequin, 1992]. Üçüncü bir konu da ölçülen veri takımında kayıp bölgeler olduğunda veya veriler oldukça dağınık bir şekilde saçılınca ne yapılması gerektiğidir [Dietz 1995; Hermann et al; 1996].

Yukarıda açıklanan teknikler kompozit bir serbest şekilli yüzey için lokal topoloji oluşturmada yardımcı olabilir ancak tam ve tutarlı B-rep modeli oluşturmak için ilave adımlar gereklidir [Besl and Jain, 1985]. Şekil 1.18’de de keyfi topoloji yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 1.18; Keyfi topoloji yüzeyi

1.14.6. Çoklu Görünüş Kombinasyonu

Bazı uygulamalar sadece bir objenin tersine mühendislik kısmı ile ilgilenirken pek çoğu tüm yüzeyin geometrik bir modelini gerektirir. Bunun sonucu olarak şu problem ortaya çıkar: ideal olarak 3D uzayda yüzen bir obje olduğu varsayılın (sabit yönelimde ve sabit bir pozisyonda); bu sayede tarayıcı veriyi tek bir koordinat sisteminde yakalamak için objenin etrafında hareket edebilir. Pratikte obje bazı yüzeylere dayanmak zorundadır, böylece bunun bir parçasına tarayıcı ile erişilemez. İlaveten eğer tarayıcı sabit bir pozisyonda ise herhangi bir zamanda obje yüzeyinin daha sınırlı bir bölgesinden bile veri toplamak mümkün olacaktır. Böylece genellikle tarayıcının önünde farklı yönelimlerde yerleştirilen obje ile çekilen çoklu görüşlerin birleştirilmesi gerekli olur.

Görüşleri birleştirmek için başka iyi nedenler de bulunabilir – örneğin objenin bazı parçaları diğerlerinden daha fazla detaya sahip olabilir ve detaylı alanların yüksek çözünürlüklü taramaları alınabilirken tüm objenin düşük çözünürlüklü taraması alınabilir. Kaç tane taramanın alınacağı ile ilgili karar vermede diğer varsayımlar da önemlidir. Örneğin daha fazla tarama alındıkça tüm tarama prosesi daha uzun sürecek ve sonuçta tarayıcı pahalı bir araç olacaktır. Öte yandan tarayıcı bir yüzeyi ne kadar yakından görüntülerse yüzeyden daha hassas veri toplanması olasılığı artar.

Doğal olarak yeterli görüşler alınmalıdır ki en azından bir görüşte obje yüzeyinin her parçası görünür hale gelir. Şayet objenin pek çok konkavlığı varsa bu önem kazanır. Aslında daha fazla taramanın gerekli olduğu yerleri belirlemek için objenin ilk taramasından bir çeşit geometrik modelin yapılması gerekebilir. Bu da yine tam bir tersine mühendislik sisteminin farklı fazları arasındaki karşılıklı etkileşimi gösterir.

Çoklu görüşleri birleştirmede en önemli problem hassas çakıştırma; yani bir görüşteki bilgiyi diğer bir görüş ile ilişkilendiren transformasyonu (rotasyon ve aktarım) bulmaktır, böylece tüm bilgi setleri birleştirilebilir. Çakıştırma mümkün olacak biçimde çoklu görüşleri toplamak için muhtelif yaklaşımlar mevcuttur.

En basit yaklaşım objeyi bir döner tablanın üzerine yerleştirmektir: çakıştırmayı sağlıklı bir biçimde gerçeklemek için bunun yüksek bir hassasiyetinin olması gerekir. Bu durumda bile objenin tabanı görünür olmayacaktır ve tüm objenin modeli gerekli ise objenin ters çevrilmesi gerekir. Bunu yapmak için bir robotun kullanılması mümkündür ancak robot kısılacındaki uyum çakıştırmının doğrudan robotun komutlu hareketlerinden hesaplanması için çok büyük olan konumlama hatalarına yol açabilir. Bunun yerine böyle bir durumda çakıştırmayı görünüşlerdeki bilgileri karşılıklı ilişkilendirerek çoklu görünüşlerden belirleme durumunda gereklidir. Bu gerekli görüldüğü takdirde obje ters çevrilebilir ve bir sonraki görünüş için elle doğru pozisyona kabaca yerleştirilebilir.

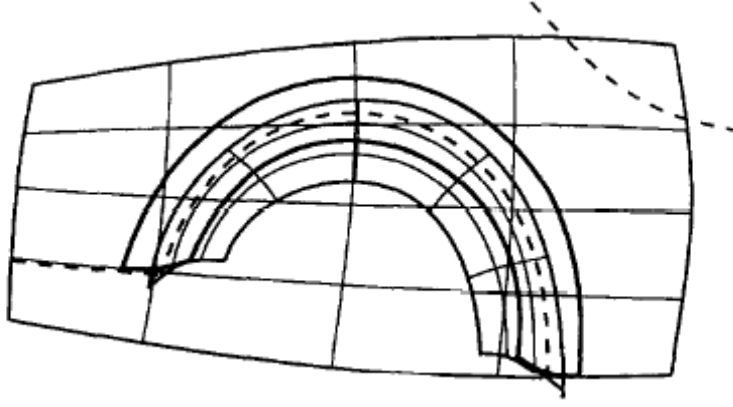
Çakıştırmayı doğrudan çoklu görünüşlerden belirlerken başarılı görünüşler arasında yeterli bilgi bulunduğundan emin olunmalıdır. Obje modellerini kıyaslamak için çeşitli yaklaşımlar sunulmuştur, bunların çoğu muayene için de kullanılmış olsa da hassasiyetin önemli olmadığı obje tanımlama alanında kullanım içindir [Marshall and Martin, 1992]. Bu tip yöntemler yeterli basit yüzeyin çakıştırmayı belirlemek için her görünüşte görülebilmesi kaydıyla hem yüksek seviyeden bilgiyi eşleştirebilir (her görünüş için kısmi geometrik modeller oluşturulur) hem de nokta verisi doğrudan eşlenebilir [Hoover et al, 1995].

Daha pragmatik bir yaklaşım da ticari ortamlara adapte edilen çoklu görünüşlerin çakıştırması için örtüşen verilerin sağlanması ve bazı referans objelerinin taranacak objeye tespit edilmesidir. Bu sayede her görünüşte yeterince basit yüzeyin mevcuttur ve bu yüzeyler her görünüşte bulununca çakıştırmayı hesaplamak için direkt bir algoritma uygulanır. Varlığı bilinen spesifik yüzeyleri kullanmak genel bir algoritmayı kullanmaktan çok daha kolay ve sağlıklıdır. Ne yazık ki referans objelerini taranacak objeye tespit etmek taranacak objeyi engelleyecektir, yani bu numara tam bir obje modelinin oluşturulması problemini doğrudan çözmez.

Nispeten denenmemiş bir teknik de objeyi pek çok yönden bir seferde görüntülemek için çoklu sensörleri kullanmaktır [Shirai, 1987]. Bu, ekstra bir ekipman gerekliliği açısından açık bir dezavantajdır. Ayrıca, birkaç sensörün aynı

anda kalibrasyonu çözümleri zaman alan ve nümerik olarak tutarsızlık sergileyen büyük bir simultane denklem takımına yol açacaktır. Bununla beraber, sistem bir kez kalibre edilince pek çok obje taranabilir – gerçekte çakıştırılan taranan objenin parçalarından ziyade sensörlerdir. Bu yaklaşımın diğer bir dezavantajı da objenin tümünü bir seferde görmeye yetecek kadar sensörün bulunduğu hiçbir zaman garanti edilememesidir – derin dişlere sahip bir dişli çarkı buna örnek olarak verilebilir.

Objenin birkaç görünüşü elde edildikten sonra uygun çakıştırma verileri ile yapılabilecek başka bir çözüm halen varlığını korumaktadır – parçalama ve ilaveten işleme öncesi verileri nokta takımı seviyesinde birleştirmek veya önce ilgili bir kısmi geometrik modeli oluşturmak için her görünüşü işlemek ve ardından birleştirme işlemini gerçekleştirmektir. Burada ilgili iki konu mevcuttur. Nokta takımları yerine çıkarılan özellikleri birleştirmek hesap açısından çekici görünebilir çünkü herhangi bir aşamada daha küçük veri takımları işlenmelidir. Bununla beraber farklı görünüşlerden çıkarılan özellikler tutarsızlık sergileyebilir. En iyi durumda aynı özellik için parametrelerin tahmini farklılık gösterecektir ve birleştirilmek zorundadır. Daha kötü bir durumda özellikler beklenmedik biçimde bir görünüşte mevcut olmayabilir veya bir görünüşteki tek bir özellik başka bir görünüşte çoklu özellikler olarak parçalanabilir. Tek bir nokta daha büyük ancak tutarsız veri yapısına neden olur; kısmi modellerin birleştirilmesi bu tutarsızlıkları çözmek için kompleks modellere gereksinim duyabilir. İlaveten çoklu görünüşlerde görünen herhangi bir yüz buna ait orijinal noktaların bütün alt takımlarından tahmin edilebildiğinden tek bir nokta takımını işleme yaklaşımı avantajlıdır. Daha yüksek bir seviyede birleştirme öncesi kısmi yüz tanımlamaları oluşturulur ve daha düşük seviye veriler çıkarılır; bu ise tüm yüz için daha az sağlıklı parametre tahminine neden olur [Fisher, 1996]. Aşağıdaki şekil, fonksiyonel olarak ayrıştırılmış yüzeyi göstermektedir.



Şekil 1.19; Fonksiyonel olarak ayrıştırılmış yüzey

1.14.7. B-Rep Model Oluşturma

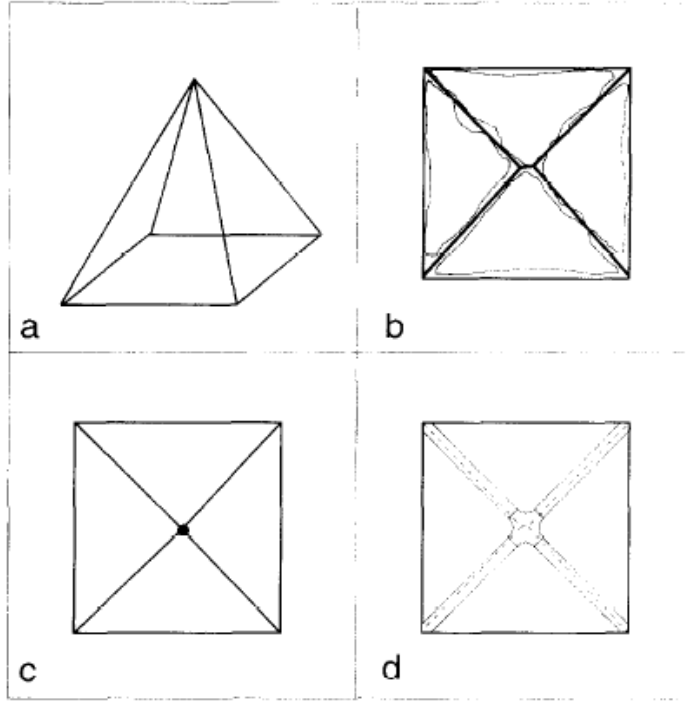
Yüzey gösterimlerindeki ve uygulanabilir algoritmalarındaki çeşitlilikten dolayı model oluşturma için giriş de geometrik ve topolojik bütünlüğün farklı seviyelerinde muhtelif formatlarda bulunabilir. Bu nedenden dolayı nihai model oluşturma için detaylı bir üniform yaklaşım çok güç olabilir.

Bu nihai aşamanın amacı hem tutarlı elemanlar arasında komşuluk ilişkilerinin hem de taban kenar eğrilerde ve yüzeylerinin açıkça saklandığı matematiksel denklemlerde köşelerin, kenarların ve yüzlerin tutarlı ve bitişik bir modelini oluşturmaktır [Hoffmann, 1989; Mantyla, 1988]. Belirli yaklaşımlarda bazı sınır eğri yapısı segmentasyon ile eşzamanlı olarak oluşturulur (bilhassa kenara dayanan yöntemlerde ve serbest şekilli eğri ağı tahrikli algoritmalar) ancak genellikle modele düzensiz bir elemanlar takımı oluşturularak başlanır. Bunlar lokal bölge büyümesi veya uydurma algoritmaları ile oluşturulur ve genellikle bunların arasında tutarlılık sağlamak için herhangi bir çaba gerekmez. Örneğin algoritma oluşturan bölgeler iyi tanımlanmış yüzeylerin uydurulduğu nokta alt takımları sağlar ancak bunlar arasında boşluklar (mesela atanmamış veri noktaları) bulunabilir veya bunlar birbirleri ile kısmi olarak örtüşebilir. Yüzeyler tutarlı olmayabilir, mesela iki komşu paralel düzlem aralarındaki bir adım ile parçalanabilir veya istenen/beklenen süreklilik derecesine sahip olmayabilir. Benzer olarak kenar tespit algoritmaları birbirleri ile çakışan ve pürüzsüz bir biçimde birleştirilmiş bir kenar ağı oluşturmak

gereğinde olmayan bir dizi eğri parçası oluşturabilir [Fitzgibbon et al, 1997; Hoover et al, 1995].

Şayet önceki adımlarda tanımlanan açık kenarlardan biri yoksa bunları bölgeleri genişletilerek hesaplamak durumundadır. Taban yüzeylerinin kendi parçalanmış bölgelerinin sınırlarının ötesine genişletilebildiği varsayılarak yüzey-yüzey kesişimleri iki uç köşe ile sınırlanması gereken uygun kenar eğrileri sağlayacaktır. Kesişim her zaman mümkün değildir veya başka bir deyişle yapılması gereken doğru şey değildir. Bu durumlarda pürüzsüz bir biçimde karşılaşma için blend eklenmeli veya yüzeylerin parametreleri ayarlanmalıdır: örneğin pürüzsüz bir kenar boyunca bir yarım silindir ile karşılaşan bir düzlem buna örnek gösterilebilir.

Üç yüzeyin karşılaştığı bir köşeyi konumlandırmak, bunlar keskin bir kesişimde karşılaşıyorsa nispeten basit görünmektedir çünkü bu durumda tek bir kesişim noktası belirlenebilir. Nümerik kararsızlık problemlerinden dolayı pürüzsüz kenarların karşılaştığı veya üçten fazla kenarın karşılaştığı yerlerde köşeler hesaplamak zorundaysa durum Şekil 1.20’de gösterildiği gibi çok daha karmaşık hale gelir [Higashi et al, 1995]. Şekil 1.21(a) tersine mühendislik yapılacak bir piramit objeyi betimlerken Şekil 1.20(b) üstten görünüşte tanımlanan olası bölgeleri gösterir. Kenarlar boyunca verinin düzensiz ve sağlıklı olduğu görülebilir. Yan yüzlerin dört düzlemini genişletirsek hassasiyet eksikliğinden dolayı kenarlar tek bir köşede birleşmez ancak küçük bir yapay kenar parçası oluşturulacaktır. Diğer durumlarda sadece küçük kenarlar değil ufak kesimler de oluşacaktır. Açıkçası bunlar istenmez ve mümkün olduğu durumlarda giderilmelidir. Örneğimizdeki gibi tek bir köşe de seçilebilir ve uydurulmuş düzlemler Şekil 1.20(c)’deki gibi küçük bir ölçüye ayarlanabilir. Bu pek çok durumda yapılabilir ancak diğer durumlarda diğer kısıtlamalar bunu engelleyecektir.



Şekil 1.20; Katı bir piramit modelin sabitlenmesi

Blend yüzeylerinin oluşturulması da primer yüzeylere dayandırılmalıdır. Blendler ölçülen objenin yüzeyi üzerinde de açıkça bulunabilir veya kenarlara yakın verilerin kusurlarından dolayı bunlar yapay olarak oluşturularak boşluklara köprü atılabilir. İki yüzeyin kesişim eğrisi bazı aralık tabanlı blend için bir omurga eğrisi oluşturabilir veya ilgili öteleme yüzeylerinin kesişimi bir blend yüzeyini süpüren döner bir topun merkez noktası için bir omurga eğrisi oluşturur. Değişken parametrelili daha genel blendler de blend bölgesinde veri noktaları ile birlikte primer yüzeylere dayanarak türetilir [Hoschek and Lasser, 1993; Vida et al, 1994]. Dar blend şeritleri önceki piramit modelinde gösterildiği gibi belirli hassasiyet problemlerini çözmek için kullanılabilir, zira Şekil 1.20(d)'deki gibi yan yüzleri ayarlamaya daha fazla gerek yoktur.

Kenar blendlerinin birleşim yerinde pürüzsüz köşe blendleri de oluşturulmalıdır. Tekniklerden biri n blend yüzeyinin birlikte olduğu n -yüzlü yamaların üretilmesidir. Köşeler, aynı yüzde yer alan kırpma çizgilerinin kesişim noktaları olarak hesaplanır. Diğer bir olasılık da ters köşe blendlerinin uygulanmasıdır [Varady and Rockwood, 1995]. Bunlar, blend edilecek primer yüzler

boyunca oluşan küçük eğri parçaları ile sınırlanan $2n$ -yüzlü yamalardır: bu parçalar komşu kırpma çizgilerini pürüzsüz bir biçimde birleştirir. Her iki köşe tipi de Şekil 1.15’de görülebilir.

Büyük serbest şekilli bölgeler içinde pürüzsüz bölme eğrilerinin oluşturulma probleminde daha önce söz edilmişti. Bu, bazı interaktif yardım ile veya otomatik olarak oluşabilir ancak sadece taban nokta bulutları yerine açık bir gösterim olmadan izdüşüm eğrileri veya kürsel eğri veya eğrilik çizgileri oluşturmak gereksizdir. Düzgün eğriler oluşturmak için bilinen eğri kaplama teknikleri genişletilmelidir [Farin, 1990; Hoschek and Lasser, 1993].

Sürekli bir B-rep modeli oluşturduğumuzu varsayarsak mühendislik bakış açısından gösterimi kabul edilebilir kılmak için ilave görevler de uygulanmak durumundadır. İnsan eli ile yapılan objelerde simetri, paralellik, ortogonallık, eşmerkezlilik gibi gerekli bilgileri gösteren pek çok önemli geometrik özellik mevcuttur [Grimstead and Martin, Hoffmann and Juan, 1993]. Bu tip kısıtlamaları modele uygulamak isteyebiliriz ancak bu işlem özel ihtimam gösterilmeden yapılmamalıdır. İki düzlemsel yüzey arasındaki açı ölçümlerdeki ve yüzey uydurmadaki hassasiyetsizlikten ve dolayı neredeyse 90° olmuşsa yüzler ortogonal olacak şekilde ayarlanabilir. Ancak kalıp imalatında parçayı kalıptan kolayca çıkarmak için düşey yüzlerde küçük çekme açıları gerekli bir özelliktir. Bu yüzden modelin nerede ve nasıl iyileştirileceği konusu çok güç bir hal alır ve daha yüksek seviyede bilginin belirlenmesini gerektirir. Kullanıcı etkileşimi veya yapay zeka teknikleri bu konuda yardımcı olabilir.

1.15. Özellik Tabanlı Tersine Mühendislik Stratejileri

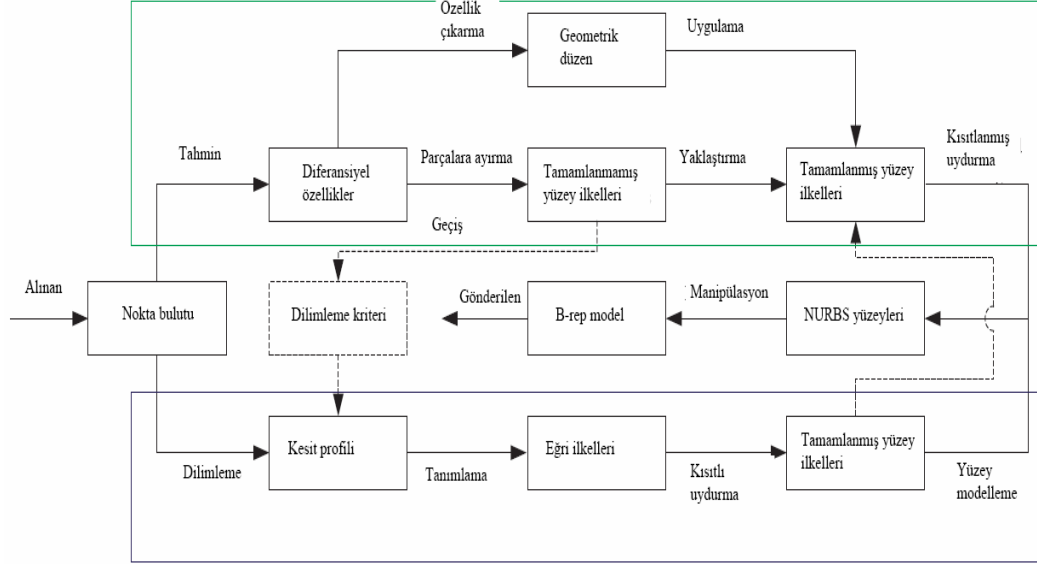
Fiziksel bir objeden tasarım yapma ve CAD modelinin tekrar oluşturulması gibi unsurlar, ürünün geliştirilmesi, tekrar üretim ve kalite kontrol için önemlidir [Varady et.al, 1997]. En popüler metodoloji olan tersine mühendislik genellikle nokta bulutu pozisyonları ile gösterilen düşük seviyedeki geometrik bilgiyi ve bunların farklı geometrik özelliklerini tasarım yöntemleri, fonksiyonel prensipler, mühendislik kısıtlamaları ve estetik değerlendirmeler gibi yüksek seviyede bilgiye dönüştürür. İlgili düşük seviye bilgi ve ileri tasarım gayesi ile ilintili olarak özellikler

geometrik şekil, topolojik gösterim ve bu gösterimlerin tersine modelleme prosesindeki gelişimleri olarak tanımlanır. Özellik tabanlı gösterimin sunulması ile model oluşturma için belli başlı iki yaklaşım mevcuttur: sınır gösterimi (B-rep) yaklaşımı [Benko et.al, 2001] ve özellik şablon yaklaşımı mevcuttur [Au and Yuen, 1999; Thompson et al, 1999]. Teorikte şayet tüm önemli özellikler noktalardan tanımlanır ve bazı ikinci dereceden önemi olan özellikleri bir dereceye kadar ihmal edilmesine izin verilirse B-rep yaklaşımı hassas ve topolojik olarak tutarlı modeller oluşturabilir. Bu yöntemin iç özellik anlam biliminde ve doğal yüzeylerin topolojik bilgi gösteriminde büyük avantajları olsa da komplike serbest şekilli yüzey özellikleri ile entegre etmek kolay değildir. Özellik şablonu yaklaşımı uygulamaya bağlı olarak spesifik geometrik ilkeleri kullanır. Bu nedenle özellik şablon yaklaşımı genel endüstriyel ürünler için tersine mühendislik durumunda doğrudan genellenemez.

CopyCAD, Geomagic Serileri, Imageware ve RE-SOFT gibi son teknoloji ürünü ticari tersine mühendislik sistemleri geleneksel endüstriyel ürünler için teknik şemalarına göre farklı tersine mühendislik çözümleri sağlamaktadır [Ke et al, 2004]. Bununla beraber özellik gösteriminin eksikliği genellikle yetersiz ve tutarsız topolojik CAD modeli ile sonuçlanır. Sonuçta orijinal tasarım niyetini göstermek ve nihai model parametrelerini efektif bir yolla değiştirmek güçtür.

Farklı strateji orijinal tasarım konseptinin gösteriminde farklı yüzey tiplerini ve özellik parametrelerini gerektirir. Tersine modelleme prosesinde kesit eğri özelliğine dayanan strateji ve yüzey özelliğine dayanan strateji olmak üzere iki temel çözüm stratejisi mevcuttur. Birinci çözüm stratejisinde sıralı noktalar ile gösterilen kesit eğrileri nokta bulutu dilimlenerek gösterilir [Lu, 2002]. Ardından doğru parçaları, dairesel yaylar, B-spline eğrileri ve iç kısıtlamalar sıralı noktalar ile tanımlanır. Kısıtlamalara uygulanan tek ilkel veya ilkeller parametrik özellik eğrileri oluşturmak için optimize edilir [Liu, 2004]. Nihayet, yüzey özellikleri süpürme veya soyma yöntemi ile modellenir. Diğer çözüm stratejisinde nokta bulutunun diferansiyel geometrik özellikleri tahmin edilir. Sonra dörtgenler, haddeden çekilmiş ve döndürülmüş yüzey, karıştırma, simetri ve sıra nokta bulutu ve bunun diferansiyel geometrik bilgisi kullanılarak çıkarılır [Shan, 2003; Ke and Li, 2003]. Mühendislik kısıtlamalarına uygulanan özellik ilkelleri nihai yüzey modelini oluşturmak için

optimize edilir. CAD yazılımlarında tersine mühendislik için temel çözüm stratejileri Şekil 1.21’de gösterilmiştir.



Şekil 1.21; Tersine mühendislik stratejileri

Tersine mühendislik sistemleri geometrik işlemlerin alt yapısı olarak üçgen ağ yapısı yerine nokta bulutunu kullanabilir. Bunun için stratejilerle entegre olan temel algoritmalar şöyle sıralanabilir:

- Kısıtlı uydurma prosedüründe analitik geometrilerin yanında serbest şekilli eğriler ve yüzeyler de dahil edilmiştir.
- Diferansiyel geometrik özellikleri tahmin etmek için binlerce lokal yüzey yaması yerine global bir 4D bir yüzey kullanılır.
- Veri çakıştırma tekniğine dayanan simetrik bir düzlem çıkarma algoritması uygulanır.
- Nokta bulutunun temel doğrultu Gaussian görüntüsü (PDGI) kullanılarak döner ve çekilmiş yüzeyler için bir çıkarma yöntemi kullanılır.
- Çıkarılmış parametreleri düzeltmek için istatistik teorisi ve yöntemi kullanılmıştır.

1.15.1. Kesit Özelliğine Dayanan Strateji – 2 Boyuttan 3 Boyuta

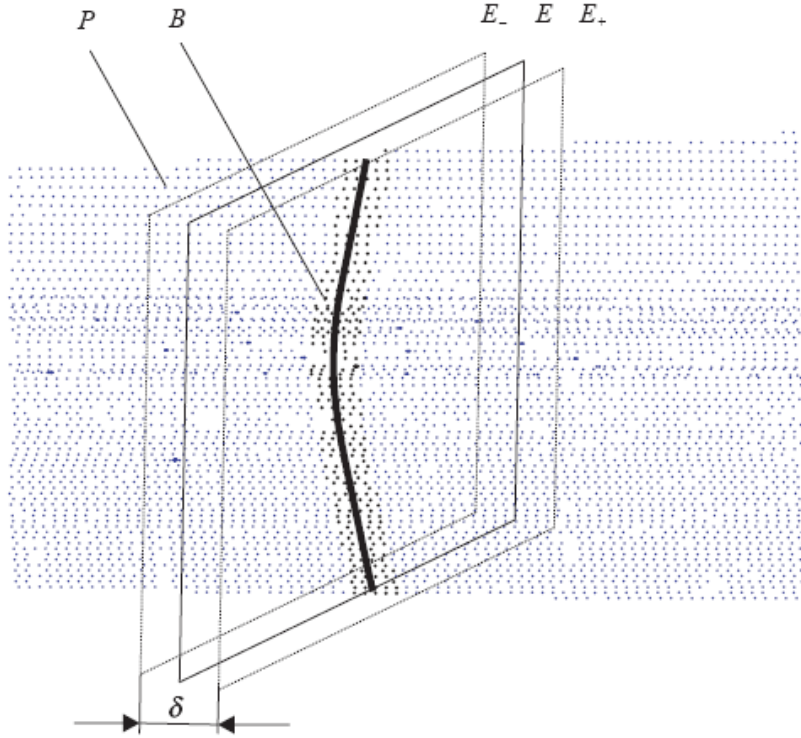
Modern endüstriyel ürünün tasarım prosesi genellikle basitlikten karmaşıklığa, diğer bir deyişle çekme, döndürme, süpürme veya soyma yöntemleri ile basit düzlem eğrileri oluşturmaktan kompleks yüzey modeli veya katı model oluşturmaya doğru uzanan bir yol izler. CATIA, UG ve PRO/E gibi popüler CAD platformları parametrik tasarım tabanlı özellik modelleme kapasitesine sahiptir. Endüstriyel ürünlerin çeşitliliği nedeniyle orijinal özellikler kırpma, karıştırma ve dikme gibi çoklu manipülasyon yöntemlerinin gerektirdiği spesifik performansı karşılamak için kademe kademe gelişmekte ve sonra tersine mühendislik için uygun olmayan bir hale gelmektedir. Nokta bulutundan yüzey özellik tanımlamasının esası tahmin edilen diferansiyel geometrik özelliklerin kullanılması ile spesifik geometrinin yüzeyinin yaklaştırılmasıdır. Tanıma tekniği keyfi serbest şekilli yüzey özelliklerini iyileştirecek kadar geliştirilmediği için kesit özellik stratejisi komplike objelerin tersine modellenmesi için önemli bir çözüm haline gelmiştir. Tersine modelleme prosesinde B-spline eğrilerini oluşturmak için kullanılan klasik yöntemler nokta belirleme enterpolasyonu veya yaklaştırma olarak adlandırılır. Eğrinin doğal özelliklerinin kaybolması sıkıcı bir modifikasyon ve tekrar tasarım gerektirir. Özellik tabanlı çözüm ile komplike yüzeyler (küçük boyutlu motor katlarından büyük optik çerçevelere kadar) parametrik özelliği taşıyan ve spesifik yüzey geometrisine uyduran eğriler ile tekrar oluşturulabilir.

Bu yöntemin anahtar noktaları, bir nokta setinin kısıtlamasına tabi 3 boyutlu özelliklerin, kesit eğrisi özelliğinin tanınmasının, parametrik tasarımın ve optimizasyonun korunması ile nokta bulutunun dilimlenmesini içerir. Bu stratejinin esası nokta bulutundan düzlemsel eğri oluşturulmasıdır. İlk önce dilimleme tekniği ile organize olmayan nokta bulutu tabakalı kesit profillerine dönüştürülür. Dilimleme düzenleri veri düzlemi, iletim yönü ve dönme eksenini gibi çıkarılmış 3 boyutlu özellik ile uyarlanır. Ardından özellik noktasının tanınması için ilgili kesit profiline dahil edilen noktadaki farklı dairesel eğrilikler ve türevler tahmin edilir. Her bir parça doğru, dairesel yay veya B-spline eğrisi gibi önceden tanımlanmış özellik şablonu ile tanınır ve uydurulur. Paralellik, diklik ve geometrik süreklilik gibi kısıtlamalar sonunda eğri ikellikleri arasında yürütülür. Sadece belirtilen kısıtlamaları yerine getirmeyen, aynı zamanda kesit profilini yaklaştıran parametrik eğriler kısıtlamalı

uydurma teknikleri ile tekrar oluşturulur. Çekme, döndürme, süpürme veya soyma gibi yüzey modelleme yöntemlerine göre kompleks geometrik şekil bu parametrik eğrilerle modellenebilir.

1.15.2. Geometrik Özelliklerin Hakim Olduğu Nokta Bulutu Dilimleme

Nokta bulutu dilimleme, bir nokta bulutu ile bir düzlem, E , arasındaki kesişim olarak düşünülebilir. Bir nokta bulutu, P , için ve verilen $\delta > 0$ ile ilişkili nokta bulutu yoğunluğu ρ ve düzlem E için düzlem üzerinde sıralı bir noktalar takımı, diğer adıyla düzlemsel nokta takımı bulunur. Düzlemsel nokta takımı orijinal objeye bağlı olarak tek bir kesit profili veya çoklu kesit profilleri olarak sınıflandırılabilir. δ değerine dilimleme genişliği adı verilir ve $\delta = c_s \rho$ şeklinde ifade edilir; burada $c_s = 1-4$ arasında değişen ve nokta dağılımının benzerliği ile belirlenen katsayıdır. Şekil 1.22’de gösterildiği üzere E düzlemine eşit uzaklıkta, $\delta/2$, olacak şekilde E_- ve E_+ iki öteleme düzlemi oluşturulur. E_- ve E_+ arasında bir araya getirilmiş nokta takımı, B , nokta bulutundan çıkarılır. Nokta bulutunun bölümlenmiş ızgaraları ile dilimleme düzlemi arasındaki ilişki zaman kompleksliğini azaltmak için kullanılır.



Şekil 1.22; Bir düzlemle birlikte dilim nokta bulutu

Lokal dilimleme hata analizi her bir kesit profilinin kalitesinin sadece dilimleme düzlemi veya düzlemlerinin yönelimine bağlıdır. Her kesit profilindeki geometri özelliğinin korunması dilimleme kriterine bağlıdır. Bu, düzlemsel eğrilerin özellik tanımlaması için anahtar bir unsurdur. Bu sayede dilimleme kriterini seçme yolları ele alınmalıdır. Nokta bulutundan dilimleme kriterini otomatik olarak çıkarmanın güçlüğünden dolayı nokta bulutu dilimleme prosesini sağlamak için tek makul kriter 3 boyutlu şekil özelliğidir. Farklı durumlara uygunluk gösteren beş adet dilimleme kriteri önerilmiştir [Shan, 2003]. Örnek olarak çekilmiş yüzeyin çekme yönü ve döner yüzeyin dönme eksenini dilimleme düzleminin konumunu belirler. Daha açık olarak dilimleme düzlemi çekilen yüzeye diktir veya dönme ekseninden geçer. Süpürme veya soyma yüzeyleri ile ilgili kılavuz profili veya kesit profili kılavuz profiline dik veya kesit profiline paralel dilimleme düzlemlerine üstünlük sağlar.

1.15.3. Kesit Eğrisinin Özellik Tanımı

Düzlemsel bir profil serbest şekilli bir eğri ile yaklaştırılabilir veya doğru parçaları, dairesel yaylar ve B-spline eğrilerinden oluşan kompozit bir eğri ile gösterilir. Kesit profilinin uygun bir biçimde parçalara ayrılması büyük ölçüde profilin farklı diferansiyel özelliklerine bağlıdır çünkü bunlar obje eğrisi üzerinde konumlanmış fenomenlerdir. İki eğri parçası arasındaki kırılma noktasına özellik noktası adı verilir ve kompozit bir eğrinin önemli özelliklerini gösterir. Daha açık bir ifadeyle, özellik noktaları sadece uç, kırılma, lokal maksimum ve büküm gibi kritik noktaların özelliklerini değil aynı zamanda diklik, paralellik ve simetri gibi geometrik kısıtlamaların da özelliklerini taşır. Bu nedenle nokta takımından özellik noktalarını aramak kesit profilinin parçalara ayrılması için anahtar rol oynar.

1.15.4. Kısıtlamalar ile Tersine Kesit Eğrisi Tasarımı

Tanımlanan eğri özellikleri için genel bir optimizasyon bu tersine modelleme stratejisi için en önemli tekniktir. Tekrar oluşturulan eğriler sadece uydurma hassasiyetini sağlamakla kalmamalıdır, ayrıca eğriler arasında geometrik kısıtlamalara da tabidirler. Geleneksel parametrik çözücü yüksek uydurma hassasiyeti ve ağır geometrik kısıtlamalardan dolayı bu işi göremez. Tersine mühendislik prosesinde eğri ve/veya yüzeyin tekrar oluşturulma prosesini çözmek için iki tipik nümerik metot vardır [Werghi et al, 1999; Benko et al, 2002]. B-spline eğrisinin geometrik gösteriminin ve doğru ve dairesel yayın tam gösteriminin aynı anda var olması durumu göz önüne alındığında [Pratt, 1987], modifiye Newton iterasyonu fazla kısıtlama ve çatışık kısıtlama durumlarını idare etmede olağanüstü bir kapasiteye sahip olsa da ceza fonksiyon metodu [Werghi et al, 1999] daha sağlam yakınsama performansı sergiler. 2 boyutlu çizim alanında daha güçlü bir tersine mühendislik tasarım sistemi oluşturmak için parça uydurma, kısıtlama uygulama ve işleme ve genel optimizasyon sırayla yürütülür.

1.15.5. Yüzey Özellik Tabanlı Strateji – 3 Boyuttan 3 Boyuta

Geometrik olmayan özellikler göz önüne alınmadan tersine mühendislikte yüzeyler en popüler CAD/CAM sistemleri tarafından kullanılan modelleme metotların göre sınıflandırılır. Tipik tanınabilen yüzeyler düzlem, küre, silindir ve koni gibi doğal yüzeyleri ve çekilmiş yüzey, döner yüzeyler ve karışım yüzeyleri gibi basit serbest şekilli yüzeyleri içerir [Varady et al, 1997]. Yukarıdaki yüzeyler arasındaki şekil ilişkisi ve pozisyon ilişkisi boyut ve topoloji adı verilen geometrik kısıtlamalar ile belirtilir [Liu, 2004; Ke et al, 2003; Werghi et al, 1999; Benko et al, 2002]. Yüzeyler arasında paralellik, diklik ve tanjant kısıtlamalar gibi temel geometrik ilişkilerin yanında bu stratejide simetrik düzenlilik ve sıra düzeni de göz önüne alınır. Yüzey özellik tabanlı tersine mühendislik diferansiyel geometrik özelliklerin tahmini, nokta bulutunun parçalar ayrılması, geometrik düzenlerin çekilmesi ve eklenmesi, B-rep modelinin oluşturulması ve düzenlenmesi gibi unsurları da içerir [Au and Yuen, 1999; Langbei et al, 2004]. Üçgen ağ yapısına dayanan diğer tersine modelleme stratejilerinden ayrı olarak bu modelleme nokta bulutunu esas almaktadır.

1.15.6. 4 Boyutlu Yüzeye Dayanan Diferansiyel Geometrik Özellik Tahmini

Yüzey özellik tanımlama nokta bulutunun tahmin edilen diferansiyel geometrik özelliğine bağlıdır. Diferansiyel geometrinin tahmin metotları nümerik metot ve analitik metot olmak üzere iki dalda sınıflanır [Flynn and Jain, 1989]. Nümerik metot üçgen ağ yapısında gerektiği gibi yerine getirilir. Bu metotla her noktadaki normal vektör, noktaya komşu tüm üçgenlerin normal vektörlerinin ağırlıklı ortalamasıdır ve eğrilikler de tahmini bir yöne doğru olan eğriliklerin kombinasyonudur [Meek and Walton, 2000; Desbrun et al, 2000]. Analitik metot genellikle düzgün bir yüzeyi nokta bulutundaki her bir noktanın komşuluğuna uydurur ve eğriliği ve normal vektörü uydurulan yüzeyin ikinci kısmi türevleri ile hesaplar [Ernest, 1992]. Bu nedenle yüksek miktarda lokal yüzey oluşturulması düşük bir etkinliğe neden olur.

Üçgen ağ yapısı kullanılmadan her bir noktanın diferansiyel geometrik özelliğın tahmini için ızgara yapısı kullanılarak global bir modelin kullanılması önerilmektedir [Sun et al, 2001]. Evvela her geçerli ızgara için ızgara merkezinin en yakın noktası örneklenir. Ardından örneklenen noktanın normal vektörü ve eğrilikleri hesaplanır. En son olarak bu örneklenen noktalara enterpole edilen global bir 4 boyutlu yüzey σ değeriinin örnek noktanın (x, y, z) özelliğini gösterdiği uzayda oluşturulur (x, y, z, σ) . 4 boyutlu Shepard yüzeyine dayanarak örneklenmeyen noktaların özellikleri kolaylıkla tahmin edilebilir [Chen et al, 2004].

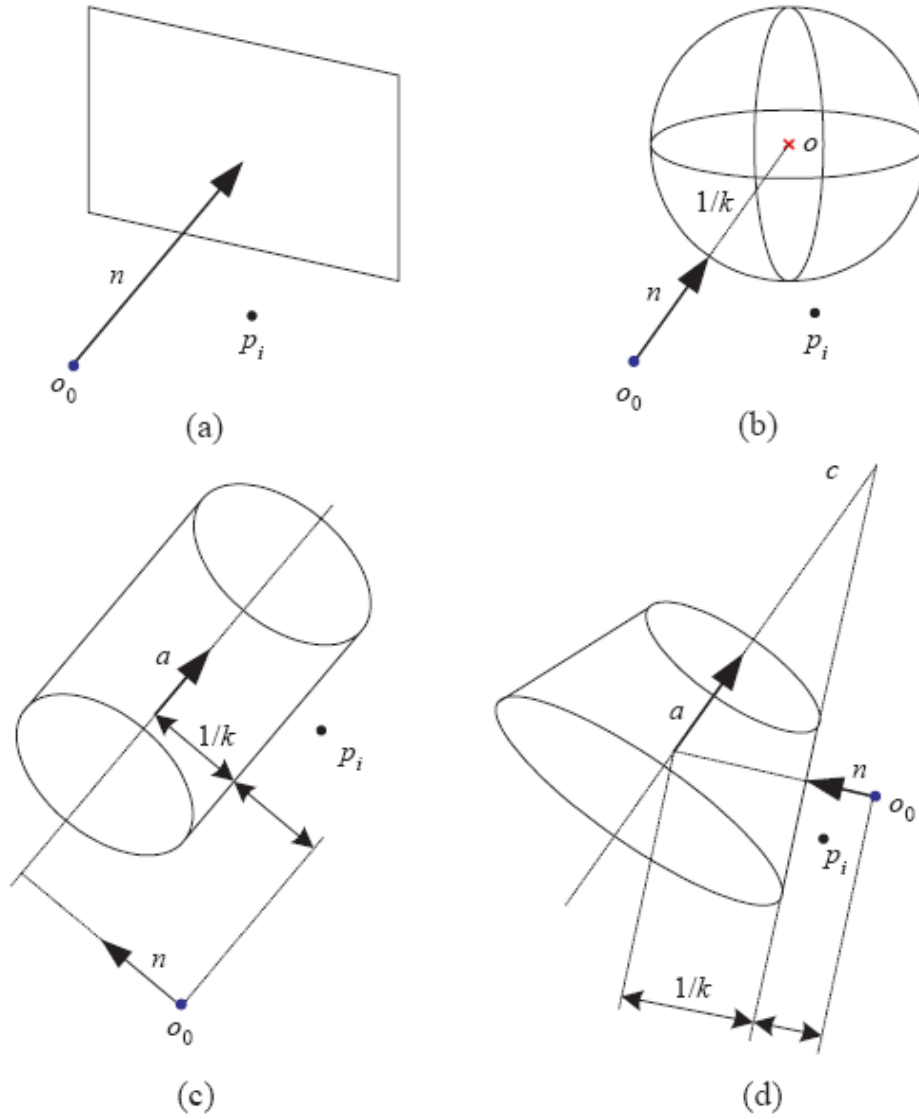
1.15.7. Simetrik Düzlemin Çıkarılması

Simetri özelliğı endüstriyel ürünler için en genel özelliktir. Simetrik kısıtlamalara sahip tersine modelleme prosesi orijinal estetik ve fonksiyonel tasarımı yerine getiren tam modeli oluşturabilir. Endüstriyel parçalardan çoklu simetrik metotlar sınıflandırılmış ve düzeltme prosesinde nihai modele uygulanmıştır [Langbein et al, 2004; Mills et al, 2001]. Bu geometrik düzenlerin manipölasyonu nokta bulutuna değil özelliklere uygulanır.

1.15.8. Dörtgen Yüzeylerin Özellik Tanımlaması ve Optimizasyon

Düzlemsel yüzeyler, silindirik yüzeyler ve konik yüzeyler gibi dörtgen yüzeyler CAD/CAM sistemlerinin temel yüzeyleridir. Diferansiyel geometrik özelliklere [Chen and Liu, 1999; Alrashdan et al, 2000] veya kenar özelliklerine [Huang and Menq, 2001; Chean et al, 2004] dayalı çoklu şemalar önceden önerilmişse de bu algoritmalar üçgen ağ yapısına veya görüntü verilerine dayalıdır ve bu nedenle bizim uygulamalarımız için uygun değildir. Lokal uydurma kullanıldığı için bu algoritmaların etkinliğı düşüktür. Nokta bulutundan özellik bölümünü seri bir şekilde parçalara ayırmak ve dörtgen yüzeye uygunluk sağlamak için özellik bölgesindeki gelişme noktaları kümelenme merkezinin komşularında manuel olarak belirtilir çünkü bu noktalar ilk yüzey uydurması için sağlam bir yapı gösterir. Ardından özellik uydurma hatasının kontrolü altında gelişim devam eder. Bu proses tamamlandıktan sonra her dörtgen yüzey bölge bağlantısına göre parçalara ayrılır. Uygulamalarda, bilhassa makine mühendisliğinde, geometrik kısıtlamaların görülme

sıklığı kısıtlama geçerliliğini tanımlamak için kullanılır [Mills et al, 2001]. Önemi geometrik kısıtlamalar ve bunların dörtgen yüzeyler arasındaki gösterimleri yoğun bir biçimde incelenmiştir [Ke et al, 2003; Werghi et al, 1999; Benko et al, 2002]. Şekil 1.23’de dörtgenlerin geometrik gösterimleri verilmiştir.

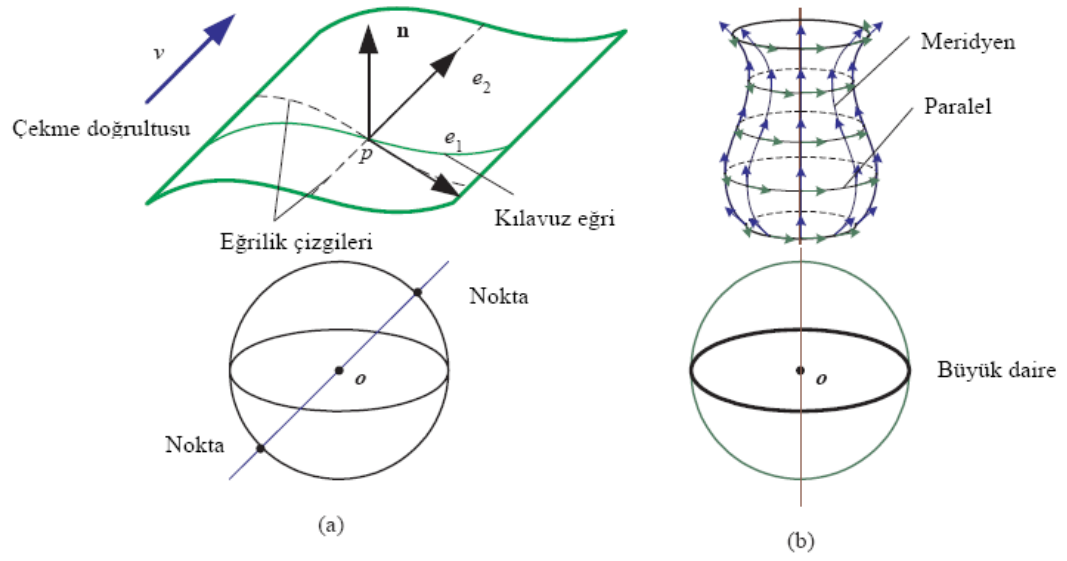


Şekil 1.23; Dörtgenlerin geometrik gösterimi: (a) düzlemsel yüzey, (b) küresel yüzey, (c) silindirik yüzey ve (d) konik yüzey. Dörtgen parametreleri ile p_i noktası arasındaki ilişkiler kullanılarak p_i noktasından olan gerçek uzaklık değerlendirilebilir.

1.15.9. Temel Yönelim Gaussian Görüntü Tabanlı Çekme ve Döndürme Özelliğinin Çıkartılması

Düzlem, silindir veya halka gibi analitik yüzeylerin yanında serbest şekilli yüzeyler profil eğrilerin çekilmesi veya döndürülmesi ile de oluşturulabilir. Profil eğrileri bir doğru, dairesel bir yay, konik bir yay, rasyonel bir B-spline eğrisi veya kompozit bir eğri olabilir. Profil eğrileri uygun bir biçimde pek çok yoldan oluşturulabileceğinden şayet çekme doğrultusu veya dönme eksenini organize edilmemiş verilerden tanınabilirse yüzeyi tekrar oluşturmak çok kolaylaşır. Çekme yüzeyinin normal vektörünün ortak bir çekme doğrultusuna dik olması gerekliliği prensibine göre çekme yüzeyinin çıkarılması tahmin edilen tüm normal vektörler ile çekme doğrultusu arasındaki iç ürünlerin kareleri toplamının minimizasyonu olarak formüle edilir [Au and Yuen, 1999]. Döner bir yüzeyin normal çizgileri ortak bir eksenle kesişmek zorunda olduğu için dönme eksenini çıkarmak için çizgi geometrisi teorisi kabul edilir [Au and Yuen, 1999; Lukacs et al, 1998]. Nokta bulutunda yer alan parazit çözümü bozabilir. Bu nedenle çekme doğrultusunu ve çekme yüzeyinin ve dönme yüzeyinin dönme eksenini çıkarmak için temel doğrultuya dayalı geniş kapsamlı bir Gaussian görüntüsü, PDGI takdim edilmiştir.

Çekme yüzeyinin tüm minimum temel yönelimler çekme doğrultusuna paralel olmak zorunda olduğundan Şekil 1.24(a)'da gösterildiği gibi kılavuz eğride herhangi bir büküm oluşmazken bunlar Gaussian küresinde bir veya iki noktaya eşlenir. Klasik diferansiyel geometri teorisine göre dönme yüzeyinin tüm paralelleri ve meridyenleri eğriliğin çizgileridir. Sonuçta bir noktadaki Şekil 1.24(b)'deki gibi iki temel yönelimden bir tanesi bu noktadan geçen paralel bir düzlemde konumlandırılmalıdır. Temel yönelim vektörleri Gaussian küresine eşlendikten sonra paralellere teğet temel yönelim vektörleri kürenin merkezinden geçen bir düzlem oluşturur. Doğal olarak bu düzlem büyük bir daire oluşturacak şekilde Gaussian küresi ile kesişir ve bu dairenin normal vektörü dönme eksenine paraleldir. Gaussian görüntüsünün bu özellikleri özellik çıkarmayı kolaylaştırır. Minimum temel doğrultusunun eşleme noktası küreden tanımlanınca çekme yönü de çıkarılır. Benzer olarak Gaussian küresinde büyük daire bulununca döner eksenin doğrultusu bulunur.



Şekil 1.24; Temel yönelim Gaussian görüntü: (a) çekme ve (b) dönme yüzeyleri

2. KOORDİNAT ÖLÇME TEZGAHLARI

2.1. Koordinat Ölçme Tezgahları ile İlgili Genel Bilgi

Koordinat metrolojisi; 30 yılı aşkın kullanımına rağmen, birçok imalat teknolojisi ile karşılaştırıldığında kısmen az bilinen bir konudur. Günümüz teknolojisinde metroloji, imalat için halen ilk sırada önem arz etmemektedir, yine de pek tercih edilmemekle birlikte zorunluluktan dolayı kaçınılmaz olmaktadır. Aslında, koordinat metrolojisi olmaksızın bazı karmaşık parçaların ölçülmesi ve kalitesinin garanti altında tutulması neredeyse imkansızdır. Örnek olarak, bir araba gövdesinin aynalanmış diğer yarısının kontrolü koordinat metrolojisinden faydalanıldığında son derece pratik ve hızlıdır. Bir yarısı için yazılmış kontrol programı birkaç saniye içinde diğer yarısı için adapte edilebilir.

Koordinat metrolojisinin piyasada etkili olmasının daha birçok nedeni vardır. İmalat parçalarının istenilen toleranslarda üretilmesi zorunluluğu ve bu kalitenin maliyete etkileri kalite kontrolün sadece final kontrolü yerine, imalatın her aşamasında gerekli olmasını sağlamıştır. Globalleşme, imalatın kalitesinin üretim alanından bağımsız hale getirilmesini gerektirmiş böylece kalite kontrol yöntemleri standart hale gelmiştir. Bir üretici, taşeron firmalarla çalışıyorsa güvenilirliğin sağlanması kaçınılmazdır. Üretilen iş parçaları karmaşıklaştıkça ve toleransları küçüldükçe kullanılan koordinat metrolojisinin verimliliğinin de artması gerekmiştir.

İşte bu gibi nedenlerden dolayı hiçbir boyutsal metroloji disiplini koordinat metrolojisinin olduğu gibi hızlı bir gelişim göstermemiştir.

Koordinat metrolojisinin temeli, varolan üç boyutta tüm parametreler göz önünde bulundurularak, prosedürlerden elde edilebilecek belirsizlikler dahilinde ölçüm yapmaktır. Gelişen teknolojinin de yardımıyla 1 μm 'un altında hassasiyet ile ölçümler yapmak imkanı hale gelmiştir.

Koordinat ölçme tezgahları (Coordinate-measuring machines) (CMM) (boyut ölçümü için istifade edilen cihazlar) bir ölçüm probunu hareket ettirerek bir iş parçasının yüzeyindeki noktaların koordinatlarını belirlemek üzere tasarlanmış mekanik sistemlerdir. Koordinat ölçme tezgahları dört ana bileşenden oluşur: tezgahın kendisi, ölçüm probu, kontrol veya hesaplama sistemi ve ölçüm yazılımı. Bu tezgahlar genellikle boyut ölçümü, profil ölçümü, açısal ölçüm veya yönelim ölçümü, derinlik analizi, sayısallaştırma veya görüntüleme ve mil ölçümü için kullanılır. Bu tezgahlar, parçalanma koruması, çevrim dışı programlama, tersine mühendislik, atölye şartlarında çalışabilme, SPC yazılımı (istatistiksel proses kontrolü yazılımı) ve sıcaklık kompanzasyonu gibi özelliklerle sunulmaktadır. Tezgahlar geniş yelpazede boyut ve tasarım seçenekleri ve farklı prob teknolojileri ile kullanıcıya ulaşmaktadır. Tezgahlar elle veya CNC veya PC ile kontrol edilebilir. Tezgah üstü, serbest duruş, elle kontrol ve portatif gibi muhtelif konfigürasyonlarda temin edilirler.

2.2. Tezgah

Tezgah farklı kinematik ve fiziksel prensipler altında imal edilebilir.

2.2.1. Kinematik

İlk tezgah olan UMS 500 (Zeiss/Almanya) sabit portal (Leitz/Almanya) ile sağlanan hareketli tablalı sabit bir standı sağıptı. Bilinenler büyük tahrik portalları (köprülü vinç gibi), scara (selective compliant assembly root arm – duyarlı hassas montaj taban kolu) (robot; CNC veya elle) ve diğerleridir. Elle tahrik edilen tipler (düşük maliyet) hareketli ölçüm tezgahı olarak daha fazla kullanılmaktadır. Konum anahtarla (elle) veya probun kendisi ile (CNC) tetiklenmeden önce mekanik prob bir dokunma konumuna getirilecektir. Mekanik probu değıştirmeden komplike iş parçalarının yaklaşabilirliğini arttırmak için seçime bağılı döner tablalar kullanılabilir. İleri tahrik eksenini olarak döner tabla ölçüm boyutlarını arttırmaz.

2.2.2. Fiziksel Prensipler

CMM'leri ölçüm mikroskoplarına veya çoklu sensör ölçüm tezgahlarına dönüştüren optik proplar ve/veya lazer proplar (mümkünse kombine olarak) kullanılabilir. Izgara projeksiyon sistemleri, yer ölçümü üçgenleme sistemleri veya lazer uzaklık kontrolü ve üçgenleme sistemleri ölçüm cihazları olarak adlandırılmaz ancak ölçüm sonucu aynıdır: bir uzay noktası.

2.3. Ölçüm Probu

Ölçüm probu seçilen bir doğrultudan-genellikle dikey- bakılarak başlangıç malzemesinin noktasını tespit eder.

MEKANİK PROBLAR malzemeye yüzeyde sert bir top vasıtasıyla (bir milin ucunda) belirgin bir kuvvetle dokunur. Tepki olarak prob yön değiştirecektir. Bu sapma kontrol edilebilir ve ölçülebilir. Sonuç “doğru” dokunma noktasının tetiklenmesi biçiminde olacaktır (imalatçının hassasiyet özelliğinin eşiği dahilinde).

OPTİK PROBLAR, mekanik olanlar gibi hareket ettirilen ancak dokunmayarak hedeflenecek ilgi noktasını alan lens-CCD-sistemleridir. Yüzeyin gösterilen resmi, kalıntı siyah ile beyaz bölgeler arasında kontrast oluşturacak kadar yeterli hale gelene kadar bir ölçüm penceresinin sınırları tarafından çevrelenecektir. Kesen eğri uzayda istenen ölçüm noktası olan bir noktaya hesaplanabilir. CCD üzerindeki yatay bilgiler 2 boyutludur (XY) ve düşey konum, standın Z-tahriki (veya tezgahın başka parçasında) üzerindeki tüm inceleme sisteminin konumudur. Bu, 3 boyutlu incelemeye olanak tanır.

LAZER PROBLARI yüzey ile kinematik zincirin ucundaki referans noktası arasındaki uzaklığı tespit etmek için kullanılır (yani: Z-tahriki bileşeni ucu). Bunun için interferometrik, ışık sapması veya yarı ışın gölgeleme prensibinden faydalanabilir.

Modlar, tek nokta, tarama veya merkezlemedir.

2.4. CMM Tezgahının Yapısı

2.4.1. Tabla

Tabla mekanik yapının hareketli parçalarına, iş parçalarına ve fikstür ekipmanlarına destek sağlamaktadır. Boyutları tezgahın modeline göre değişmektedir. Tabla kaynak yapılmış çelik yapıdan meydana gelmektedir. Son derece rijit ve hacmi boyunca üniform bir sıcaklık genişmesi sabitine sahiptir. Çalışma yüzeyi çelik bir tabandan yapılmış ve yüzeyinde iş parçası kenetlerini tutturmak için M8 vidalar açılmıştır. Tabla esnek manuel takım sistemi bütünleşmesi için tasarlanmıştır. Bundan dolayı özel işlemeye, pnömatik parçalar için gereken düzlemselliği garanti eden paslanmaz kaplamalı boyamaya ve 5 kolonu tabladan ayırmaya yarayan manyetik olmayan tablaya sahiptir.

Tablanın diğer tarafında, dikey çelik tabla sürücü, pnömatik kontrol ünitesi, pnömatik ve elektriksel elemanları ve de ana taşıyıcının kızaklarını taşımaktadır.

Sol tarafta ana taşıyıcının kızaklarını taşıyan yatay tabla vardır [DEA, 1996].

2.4.2. Anti titreşim destekleri

Anti titreşim destekleri tablayı taban üzerinde izostatik olarak tutmaya, yerden gelen titreşimlerden yapının hareketli parçalarını korumaya ve ölçme tezgahının metrolojik performansında bozulmaya yol açan faktörleri önlemeye muktedirdir. Pasif anti titreşim destekleri (konvansiyonel tip) tablaya bütünleşmiş metal plaka ve taşlanmış metal plaka desteği arasındaki bir tabaka kauçuktan meydana gelmektedir. Aktif anti titreşim destekleri (pnömatik) tavsiye edilmemektedir. 3 anti titreşim desteğinin düzenlenmesi (2 tanesi sağ tarafta ve 1 tanesi sol tarafta) eğilme önleyici desteğe ihtiyaç göstermemektedir (DEA, 1996).

2.4.2.1. Hareketli parça

Yapının alüminyum alaşımından yapılmış hareketli parçası ana taşıyıcı, merkez taşıyıcısı ve Z kolonundan meydana gelmektedir. İki taşıyıcının dik ve bağımsız hareketleri ve Z kolonunu ortagonal kartezyen referans sistemini meydana getirmektedir. Hareketli parça yüksek mekanik rijitlik (köprü mimarisi sonucu olarak) ve düşük atalet (alüminyumun hafifliğinden dolayı) ile karakterize edilmelidir. Alüminyum (yüksek ısı iletiminden dolayı) sıcaklık değişimlerinde yapısal gerilim ve deformasyona neden olmadan hızlı ve üniform tepkiler göstermekte ve sıcaklık genleşmesi bu sebepten dolayı yazılım tarafından verimli ve hassas bir şekilde telafi edilebilmektedir [DEA, 1996].

2.4.2.2. Ana Taşıyıcı

Ana taşıyıcı birbirine cıvata ile tutturulmuş 4 parçadan meydana gelmektedir. Sağ omuz ve sağ üst, karşılıklı barlar ve sol üst. Sağ omuz ve sağ üst alüminyum alaşımlı dökümden ve karşılıklı barlar ile sol üst de ekstrüzyon parçalarından yapılmıştır. Her iki durumda da tezgah tasarımcıları maksimum hafifliği, karmaşık yapısal hesaplamalar bazında hareketli parçaların ağırlık ve rijitlik oranını optimize etmeyi hedeflemek durumundadırlar. 2 üst sağın ve karşılıklı barların boyutları, cihaz modeline göre değişmektedir [DEA, 1996].

2.4.2.3. Merkezi Taşıyıcı

Merkezi taşıyıcı ana taşıyıcıyla uyumlu olarak enine hareket etmekte Z eksen kolonuna ve kolonun sürücü ve kayan elemanlarına destek fonksiyonunu yerine getirmektedir. Hafif alüminyum alaşımlı dökümdür ve boyutları bütün modeller için aynıdır. Bir çerçeve merkezi taşıyıcının üzerine cıvatalanmış yapısal eleman olarak değil, Z kolonunu koruyucu ve Z kolonunun karşı ağırlık silindirine destek olarak bulunmaktadır.

Çerçeve alüminyum ekstrüzyonundan yapılmıştır ve yüksekliği cihazın Z eksenine göre değişmektedir [DEA, 1996].

2.4.2.4. Z Kolonu ve Ölçme

Z kolonu merkezi taşıyıcıya uyumlu olarak dik hareket etmektedir. Kare kesitte alüminyum ekstrüzyon edilmiş parçadan imal edilmiştir. Yüksekliği cihazın Z ekseninin değerine göre değişmektedir [DEA, 1996].

2.4.2.5. Koruyucular ve Panjurlar

Sürücü ve kayan elemanlar operatörün güvenliği ve toz birikmesi ve çalışma ortamında buluna kirliliği önlemek için tamamen korunmalıdır.

2.5. Koordinat Ölçme Tezgahı Tipleri

2.5.1. Dikey Tip CMM

Dikey tip CMM'in köprü tarafından taşınan dikey bir probu vardır. Köprü ölçme alanını kuşatmaktadır.

Köprü tipi CMM özellikle rijit bir tezgahdır. Bu onu en popüler CMM ekipmanı tarzı yapar. Köprü tipi CMM granit yüzey tablasına hava yataklı kanallar ve köprü tipi konstrüksiyona sahiptir.

Diğer dikey tip CMM, Gantry koordinat ölçme tezgahıdır. Dikey Gantry tip CMM iş parçasına herhangi bir destek vermemektedir. Tezgah iş parçası üzerinde durur. İş parçası bağımsız bir kurulum üzerinde oturmaktadır. Bu tipteki tezgah çok geniş iş parçaları için çok uygundur. Bu tezgahın diğerlerinin üzerindeki avantajı operatörün prob ile yürüyebilmesidir.

Bu tezgahlar manuel olarak veya nümerik kontrolle otomatik olarak kullanılabilirler.

2.5.2. Yatay Tip CMM

Yatay tip CMM dikey düzlem yerine yatay düzlemde kurulmuş hareket eden bir kola ve proba sahiptir.

Bu tezgahın avantajı kapalı olmayan geniş bir çalışma alanı sunmasıdır. Genelde döküm ve sac kalıpları gibi büyük hacimli parçaların ölçümlerinde tercih edilmektedir. Konstrüksiyonun geometrisinden dolayı tezgaha iş parçası yüklemesinde köprü tipi CMM'lere karşı daha avantajlıdır. Gantry tipi CMM'lere nazaran ölçüm hassasiyeti daha fazladır.

2.6. Ölçme Kolları

Ölçme kolları mühendislik ve herhangi bir imalatın boyutsal kalite kontrolü için tasarlanmış yüksek hassasiyete sahip gezici bir ölçme aracıdır. Ölçme kolu ölçülecek parçaya veya montaja kullanıcının yaklaşımıyla sınırlanmadan prob ucunun kesin pozisyonunu hassasiyetle ölçmek için hassas kodlarla bütünleşmiştir.

Gezici ölçme kolu çevre şartlarına bakmaksızın ihtiyaç olan yere kolayca kurulabilmektedir. İçindeki sıcaklık kompanzasyonu özelliği ile ölçme aletindeki tipik performansı etkileyen faktörleri bertaraf etmektedir.

Gezici ölçme kolunun kullanıldığı alanlar tersine mühendislik, prototipleme, parça tetkiki, istatistiksel analiz ve proses kontrolüdür.

Büyük ölçekli kalıp hanelerde bazı durumlarda her bir kalıp yarısı 22500 kiloya kadar gelebilmektedir ve bu da geleneksel CMM'ler için çok ağırdır. Genelde CMM'lerin üzerine en fazla 7500 kilo konmaktadır. Ölçme kolları kalıbın bulunduğu yerde konumlandırılarak yaptığı ölçme ve ağır yüklerin üzerine konulmasını gerektiren bir tabla içermediğinden dolayı imalatçılara büyük kolaylık sağlamaktadır.

Ölçme kolunun 6 ek noktasının her birindeki sayısal sinyal işlem teknolojisi ve hibrit dönüştürücüler, her bir noktanın X, Y, Z pozisyonunu ve (I, J, K) yönelimini almaktadır.

Geniş kalıpların içini ölçmek için gereken ulaşılabilirlik ve esneklik için makine 2-2-2 konfigürasyonunda 8 kol kullanmaktadır. Bunlar şu şekildedir; 2 eksen tabanda, 2 eksen dirsekte, 2 eksen bilekte ve 2 tane de diğer eksenler içindir.

Kol ve tezgahın orta bölgesi kendi üzerine katlanabilmekte ve operatörü kalıbın içbükey bölgelerine ve çeşitli parçaların altına girmesine izin vermektedir.

2.6.1. Ölçme Kolu Unsurları

- Açık Mimari
- Düşük Ağırlık
- Dahili Karşı Denge
- Çabuk Prob Özelliği
- Ömür Boyu Kalibrasyon
- Geniş çeşitlilikte kurulabilme avantajı: Masa Üstüne, Sürgülü Raylar, Çabuk Ayırma, Manyetik Taban, Üçlü Ayak

2.6.2. Ölçme Kolunun Faydaları

- Taşınabilirlik
- Kolay Kullanım
- Esnek Kullanım
- Basit Kullanıcı Kılavuzu

2.7. Koordinat Ölçme Tezgahlarında Ölçme Tarzları

Koordinat ölçme tezgahları için temel üç tip operasyon vardır. Manuel olarak, bilgisayar desteği ile motorize olarak ve direkt bilgisayar kontrollü.

Manuel tip CMM atölyede bulunan en popüler tiptir. Manuel CMM hava yastığı üzerinde üç eksen boyunca hareket eden serbest gezici proba sahiptir.

Bilgisayar destekli motorize tip CMM'ler motor yardımlı hareket için bilgisayar ve tahrik mekanizmalarını kullanmaktadır. Direkt bilgisayar kontrollü CMM'ler tamamen otomatiktir ve operatörün müdahalesi olmadan parçalı ölçmek için kullanılabilir.

2.8. Prob Tipleri

Bütün CMM'ler parça özelliklerini ölçmek için bir takım problemlerle donatılmıştır. Üç genel tip prob vardır: Sert, yumuşak ve temasız prob.

2.8.1. Sert Prob

Sert problemler özellikle derin delikleri ölçmek için kullanılır. Atölyede en çok bulunan prob tipleri, ikisi de temaslı prob olan sert ve yumuşak tipli problemlerdir.

Sert prob kullanıldığında gerçek temas manuel olarak yapılmalıdır. Bu sert problemin yumuşak veya elektronik problemler kadar popüler olmasının sebeplerinden biridir.

Diğer sebep ise dokunmanın doğasından olan sapmadan kaynaklanır.

2.8.2. Yumuşak Problemler

Yumuşak problemlerin sert problemlerden bir çok uygulamada yerini alması yaygın değildir. Parçaya temas olduğunda prob bilgisayara okumayı durdurması için mesaj gönderir. Temas basıncı uygundur ve bu yüzden ölçüm güvenilirdir.

Yumuşak problemin montajı üç parçadan meydana gelmektedir: Bunlar, kafa, prob ve temas küresidir.

Temassız prob tipi günümüzde lazer teknolojisinde kullanılmaktadır. Temassız prob tipinin temel kullanım alanı yumuşak ve narin parçalardır.

Lazer tip probun yüksek hızı ve hassasiyeti birçok ölçmenin yapılmasının zorunlu olduğu yeniden mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.9. Kalibrasyon

CMM'in en belirgin özelliği, boşluk problemi olmadan yönünü değiştirebilmesidir. Bununla beraber prob hataları da mevcuttur. Çünkü prob parçayı fiziksel olarak ölçen bir elemandır ve kalibre edilmeye ihtiyacı vardır. Bütün CMM problemleri bilinen bir standarda göre kalibre edilmelidir. Standart ölçü bloğu, halka ölçüsü veya bazı tip hassas kürelerden oluşabilmektedir.

2.10. Koordinat Metrolojisinin Başlıca Prensipleri

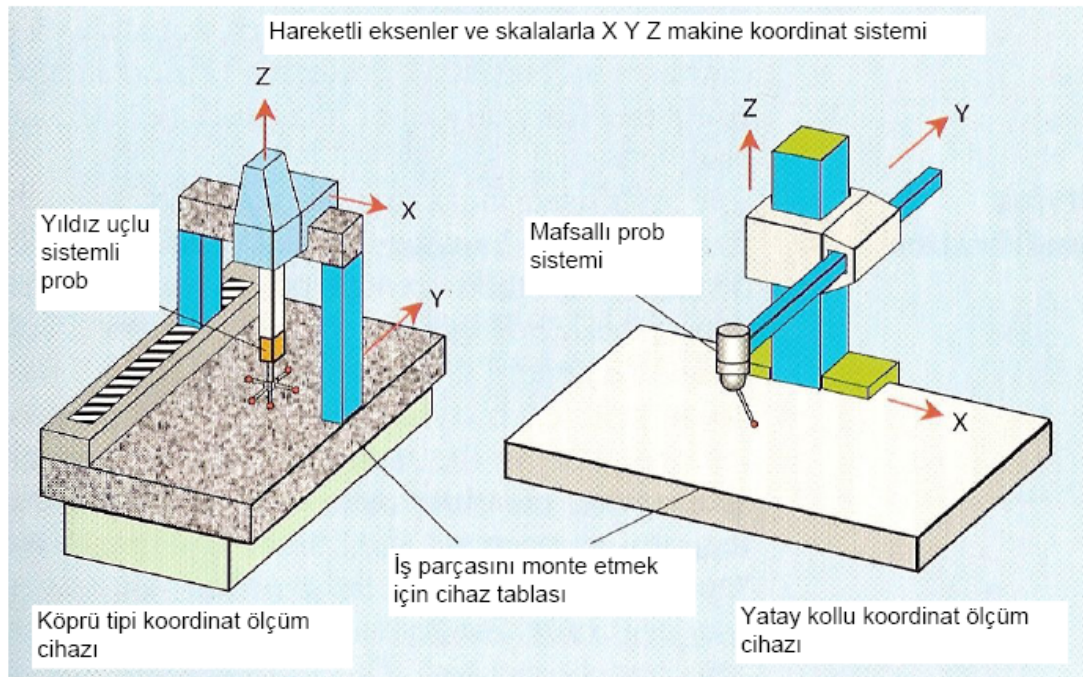
Koordinat metrolojisinde genel olarak üç eksenli kartezyen koordinatlarda ölçüm yapan koordinat ölçme tezgahları (Coordinate Measuring Machines, CMM) adı verilen tezgahlar kullanılır. Koordinat ölçme tezgahları için en geleneksel dizayn incelendiğinde X, Y ve Z olarak adlandırılan ve birbirine dik üç ana hareketli eksen göze çarpar. Z ve Y eksenleri (çoğunlukla RAM olarak adlandırılır) diğer iki eksen üzerinde kurulmuşlardır ve dokunmatik yada optik sensörlerin bulunduğu prob sistemi taşırlar. Her üç eksenli de kendi içinde pozisyonlarını $0,1\ \mu\text{m}$ 'un altına inebilen çözünürlük hassasiyetleri ile okuyabilen yüksek çözünürlüklü skalalar bulunur. Bu kartezyen eksen dizaynına ek olarak iki yada daha çok yerden mafsal bağlantılı modellere de rastlanabilmektedir. Fakat en çok rastlanan koordinat ölçüm tezgahları, köprü tipi ve yatay kol tipi diye tabir edilen modellerdir. Koordinat ölçme tezgahları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Eksen ve propları manuel olarak hareket ettirilen tezgahlar

- Motorize eksenleri manuel joystick ile hareket ettirilenler
- Motorize eksenleri bilgisayar ile kontrol ettirilen tezgahlar (CNC modu)

Birçok farklı model bulunmasına karşın en son üretilen tezgahlar üstteki özelliklerin tümüne birden sahiptirler.

Koordinat ölçme tezgahlarının en genel karakteristiği şu şekilde özetlenebilir. Küresel bir ölçüm ucu kullanılarak ölçülecek obje üzerinden noktalar alınır. X, Y ve Z eksenlerindeki makine hareketleri skalalar üzerinden okunarak ölçüm ucunun merkez koordinatları bilgisayara aktarılır. Bilgisayardaki mevcut metroloji yazılımı yardımı ile analizler yapılır ve ölçüm sonuçları elde edilir. Şekil 2.1’de en yaygın olarak kullanılan koordinat ölçme tezgahı tasarımları gösterilmektedir.



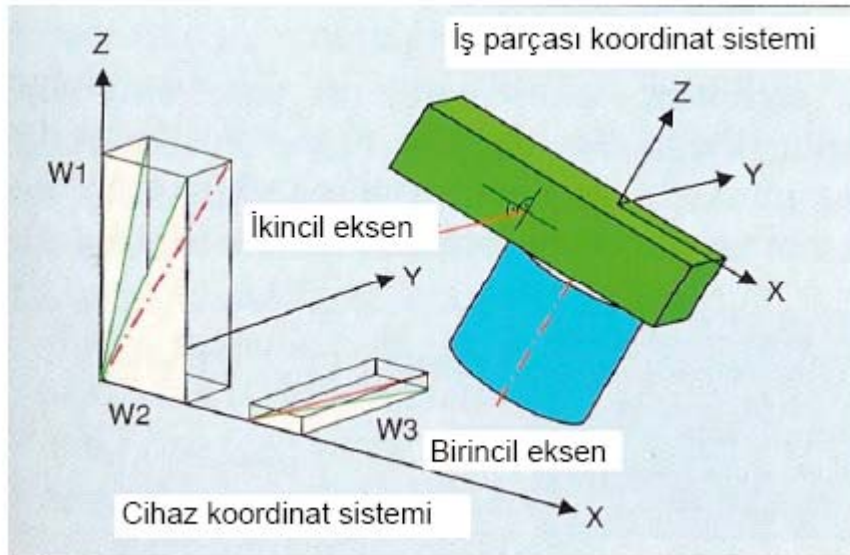
Şekil 2.1; En sık kullanılan koordinat ölçme tezgahları. Şekilde gösterilmeyen kontrol ünitesi ve bilgisayar aksamı da mevcuttur

Özellikle, kullanılacak olan ölçüm ucu kalibre edilmeli yani çapı ve X, Y, Z koordinatları hassas olarak belirlenmelidir. Bunun için yüksek hassasiyetli referans küresi en az 5 noktadan ölçülür. Daha sonra ölçüm ucunun merkez koordinatları metroloji yazılımı tarafından analiz edilmek için bilgisayara aktarılır. Böylece

kullanılacak olan tüm açılarda kalibre edilen ölçüm ucu, ölçüm programı içinde telafi edilen değerleri de kullanılır. Gerçek şudur ki, prob, ölçüm esnasında 0,01 N ile 0,2 N arasında güç uygulamakta ve bu gücün etkisi altında çok az da olsa esneyebilmektedir. Yüksek hassasiyet gerektiren ölçümlerde önem kazanacak olan bu esneme payı, kalibrasyonlar esnasında tespit edilip telafi edilir.

Mekanik olarak hizalanmamış ölçüm parçası tabaya yerleştirildiğinde parça üzerinde bir koordinat sistemi (Datum) yaratılır ki ölçülecek elemanların sonuçları sorgulanırken bir referans sistemi baz alınabilsin. Düzlem, koni, silindir ve daha birçok eleman veya serbest yüzeyler üzerinde hedef noktalar kullanılarak farklı yöntemlerle oluşturulabilen referans sistemleri çoğunlukla ölçüm parçasının teknik resminde tanımlanmıştır.

Datum, altı serbestlik derecesine sahip üç boyutlu koordinat sisteminden meydana gelir. Diğer bir deyişle üç adet sıfır noktası ve koordinat sisteminin duruşunu ifade eden üç adet açıdan oluşur. Matematiksel olarak hizalamak da denebilecek bu yöntem ile elde edilen veriler yazılımda analiz edilirler. Ölçüm parçasından yararlanarak model oluşturulduğunda, ölçüm tabası üzerinde mekanik olarak hizalama yapmaya gerek kalmaz. Aşağıdaki şekilde tezgah koordinat sisteminin parça koordinat sistemine taşınması gösterilmektedir.



Şekil 2.2; Tezgah koordinat sisteminin, parça koordinat sistemine taşınması

Parça nasıl konulursa konulsun referans tanıtıldıktan sonra ölçüm programı CNC modunda, otomatik olarak çalışabilir. Bir ölçüm parçası için bir veya birden çok referans sistemi oluşturmak gerekebilir. Şekil 2.3’de köprü tipi koordinat ölçme tezgahının resmi görülmektedir.



Şekil 2.3; Köprü tipi koordinat ölçme tezgahı

Toplanan veriler bir bilgisayar yardımıyla işlenir. Koordinat metrolojisindeki en temel ihtiyaç ölçülen noktalardan istenilen ölçüm elemanlarının oluşturulmasıdır. Bilgisayar ve kontrol ünitesi otomatik ölçümler esnasında eşzamanlı olarak hem koordinat ölçme tezgahını kontrol etmekte hem de ölçülen karmaşık nokta bulutlarından delik, yarık, düzlem, doğru gibi anlamlı elemanlar oluşturup bunların farklı özelliklerini sorgulayabilmektedir. Gerçek zamanlı veri analizi, yüksek kapasiteli kontrol üniteleri kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

2.11. On Yıllık Gelişim Sürecine Bir Bakış

Endüstriyel imalatta koordinat ölçme tezgahlarının kullanılması özel olarak şu ihtiyaçlara odaklanır:

- Daha çok üretim ve fonksiyonellik bağlantılı ölçümler

- Yüksek hassasiyet ve düşük tekrarlanabilirlik değerlerine ulaşma ihtiyacı
- Ölçüm verilerine ve analiz sonuçlarına hızlı ulaşma ihtiyacı
- Sadece tek bir tezgahın büyüklük, uzunluk, çap, açı, yönelim, konum ve form ölçümlerini yapabilmesi isteği
- Üç boyutlu bilgisayar modelleri (CAD Veri) entegrasyonu
- Ortam şartlarından bağımsız olarak yüksek hassasiyetlere ulaşmak
- Uzunluk ölçümü sonuç raporlarının, operasyon bazlı inceleme sonuçlarına dönüşmesi ile proses kontrolü ihtiyacı
- Elde edilen ölçüm sonuçlarından grafik sunumlarının üretilmesi

Yeni nesil ölçüm tezgahları imalat prosesine daha erken seviyelerde dahil olmaktadır. Çok da uzun sayılamayacak bir zaman önce kalite, bitmiş üründe yada başka bir deyişle imalatın sonunda sadece zorunluluktan dolayı hatırlanmaktaydı. Günümüzde ölçüm sistemleri direkt olarak proses kontrolü sağlamaktadır.

Koordinat ölçme tezgahları, çok hızlı imalat tekniklerinin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için zorlu bir gelişim sürecinden geçmiştir. Bu hızlı imalat, ani ürün değişikliklerine cevap verecek şekilde yapılandırılmıştır. Örnek olarak bugün dört silindirli motorlar üreten bir imalat hattı, yarın altı silindir üretebilir. Esnek üretim hattında çalışan esnek koordinat ölçme tezgahları üreticileri ve operatörleri yeterlilik testlerine tabi tutulmaktadırlar. Piyasa tarafından daha verimli ve hassas tezgahların üretilmesi isteği ve gereksinimi son 10 yılda bu konularda yeni çözümler ve koordinat metrolojisine yeni yaklaşımlar kazandırmıştır. Bunlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Ortam şartlarından en düşük seviyede etkilenen ve laboratuvar şartlarında modern imalat teknikleri sayesinde daha düşük maliyetlerde üretilen koordinat ölçme tezgahları yapılabilmektedir
- Sabit güçler uygulayabilen, geliştirilmiş hassas dokunmatik prob sistemleri
- Yazılım yardımı ile hata düzeltme değerlerini kullanarak ölçüm hatalarının anında giderilmesi
- Sürekli tarama problemlerinin geliştirilmesi ile çoklu nokta ölçümleri ve bu yöntem ile gelişen ölçüm avantajları

- Form ölçümlerini de içeren gelişmiş uygulamalar
- Operatörlere yardımcı olacak, hata tespit ve giderme uzman sistemlerinden faydalanma
- Eleman bazlı ölçüm yöntemi ile değişime ayak uydurma esnekliğine sahip pratik ölçüm yazılım ve programlama dilleri

2.11.1. CAD verilerinin sistemlere dahil edilmesi

Serbest yüzeylerin direkt ölçümü ve serbest yüzey oluşturma metodları sayesinde koordinat ölçme tezgahları araştırma ve geliştirme alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır.

2.12. Sensör Sistemleri

Ölçülecek parçanın yüzeyi ile koordinat ölçme tezgahının ölçüm sistemi arasındaki bağlantıyı sağlayan sensöre (koordinat metrolojisi için) ISO standartlarında “prob” adı verilmiştir. Probun ucundaki, ölçüm esnasında parçaya temas eden ölçüm ucuna iğne adı verilmektedir. Hem temassız (opto-elektronik) hem de temassız problar bulunur.

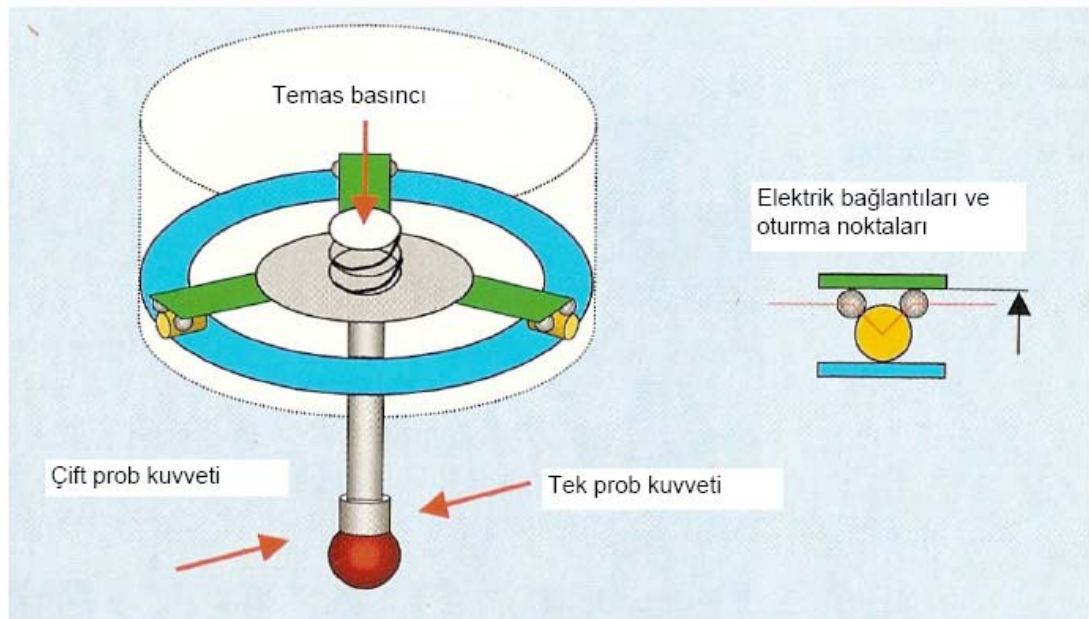
Yüzeye olan mesafeyi ölçüp üçgenler metodundan faydalanarak ölçüm yapan prob sistemleri “spacing sensörleri” olarak adlandırılır. Bu tip problar kısa sürede birçok doğru ve kenar ölçümü yapabilirler.

Bir veya iki boyutlu görüntü analiz sistemleri kenar sensörü olarak adlandırılırlar. Koyu ve açık tonlar arası farklardan yararlanarak, çoğunlukla plastik parçalar üzerinde, çap, oluk, köprü ve elektronik devre ölçümleri için kullanılırlar.

Temassız problar dokunmatik ve ölçüm sistemleri olmak üzere ayrılırlar. Bu iki sistem arasındaki belli başlı karakteristikleri görelim.

2.12.1. Temaslı Sistemler

Çoğu temaslı sistemin çalışma prensibi altı serbestlik derecesi sağlayan, üç noktadan oturmalı mekanizma yapısıdır. Daha basit versiyonlarda bu mekanizmaların yerine elektrik kontakları kullanılabilir. İğne ölçüm parçasına dokunur dokunmaz elektrik kontakları açılır. X,Y ve Z skalalarındaki yer değiştirme değeri kaydedilir. Günümüzde bu prensip ile çalışan probalar düşük hassasiyetli koordinat ölçme tezgahlarında kullanılırlar. Farklı iğne baskı kuvvetlerine göre oturma yüzeylerine dağılan kuvvet üniform olmamaktadır. Bu tip problemlerin en zayıf tarafı da budur. Ölçüm esnasında bu eğilmeler hesaba katılmalı ve kompanse edilmelidir aksi takdirde üçgensel hesap hataları oluşacaktır. Şekil 2.4’de dokunmatik problemlerin çalışma prensipleri gösterilmiştir.

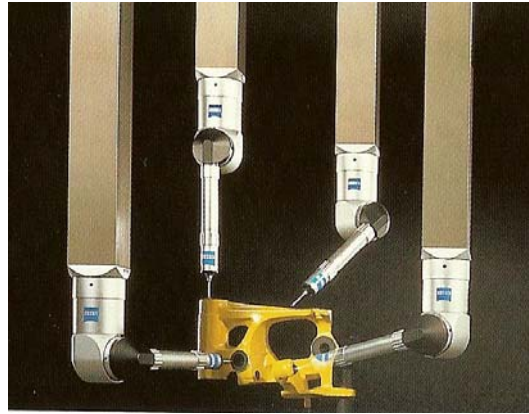


Şekil 2.4; Dokunmatik problemlerin çalışma prensibi

Bu nedenlerden dolayı bu tip elektromekanik kontaklar yerine piezoelektrik sensörler kullanılmaktadır. Düşük güçlerde aynı hassasiyette çalışıp tüm yönlerden gelen kuvvetlere karşı eşit dağılım uygulayabilen ve hassasiyetlerini koruyabilen bu sensörler ile probleme hataları minimuma indirgenmiştir. Otomatik ölçüm ucu değiştirme magazini her iki tip dokunmatik prob ile de kullanılabilir son derece

önemli bir cihazdır. Ölçüm uçları ölçüm programı esnasında yüksek hassasiyet ile otomatik olarak değiştirilip kullanılabilirler.

Piezo sinyalin elektronik analizi hassasiyet açısından bir iyileştirme daha kazandırır. Ölçüm parçasına dokunma anında elde edilen veri yanı sıra temas anından kısa süre sonra da halen bilgi akışı devam eder. Bunun sonucu olarak elde edilen sinyaller doğrusal ölçüm sonuçları elde etmek için kullanılabilirler. Mekanik kontağın açılmasına gerek kalmadan dokunmanın gerçekleştiği bilgisini alan sensör sistemi böylece ucun veya ölçüm parçasının eğilmesine yada problama hatalarına izin vermeksizin daha net bir ölçüm değeri elde edecektir. Mekanik kontak sadece dokunmanın gerçekleştiğini onaylama görevini üstlenir. Aşağıdaki şekilde piezo sensörlü bir probun kullanıldığı bir sistem gösterilmektedir.



Şekil 2.5; Piezo sensör takılmış küçük bir probun kullanıldığı bir sistem

Farklı açılara otomatik olarak dönebilen prob sistemi sayesinde ölçüm parçalarında esneklik sağlanmaktadır. Bu sistemler ile de otomatik prob değiştirme magazini kullanılabilmektedir.

2.12.2. Ölçüm Sistemleri

Bu mantıkla çalışan prob sistemleri aslında kendi içlerinde de birer koordinat ölçme tezgahı olarak tanımlanabilirler. Paralel kenar yay sistemleri üzerine oturtulmuş yataklarla bağlantılı üç adet kartezyen ölçüm sistemine sahiptirler ve koordinat ölçme tezgahının eksenlerine paralel hareket ederler. Endüktif uzunluk

değiştiricileri (LVDT) her üç eksenindeki sapmaları bu şekilde ölçerler. Dokunmatik sistemlerde olduğu gibi sadece tek noktadan dokunarak değil tüm üç boyutlu dağılımlar analiz edilerek veri toplanır. Bu sayede sürekli tarama metodu geliştirilmiştir.

Elektronik kontrol sistemleri sayesinde birçok hata düzeltme metodu uygulanarak yüksek hassasiyetlere erişilebilmektedir. Ölçüm esnasındaki baskı ve sapma kuvvetindeki değişim ulaşılan ölçüm hassasiyetlerini doğrudan etkilemektedir. Uygulanan kuvvetler söz konusu olduğunda farkı yaratan pasif ve aktif sistemlerdir. Şekil 2.6 ise günümüzde kullanılan gelişmiş bir hızlı tarama probunu göstermektedir.



Şekil 2.6; Günümüzde kullanılan gelişmiş hızlı tarama probu

Pasif sistemler, yoldan bağımsız ölçüm kuvvetlerini yay sistemleri ile birleştirip küçük sapma kuvvetlerini analiz edebilirler. Bu sistemlerde ölçüm kuvvetinin büyüklüğünü ve iğnenin eğilmesini algılamak zordur. Pasif sistemler nispeten küçük problemleri taşıyabilirler ve magazinler kullanmadan kısa ölçüm uçları ile çalışmayı hedef alırlar.

Aktif sistemlerde ise, solenoidler ile oluşturulmuş elektronik yay yapısı sayesinde ölçüm kuvvetinin büyüklüğü ve yönü kolaylıkla kontrol edilir. Ölçüm kuvveti genel olarak sabit kalır ve her zaman ölçülecek yüzeye dik olarak uygulanır.

VAST (Değişen hassasiyet ve hız teknolojisi) olarak adlandırılan özel olarak dizayn edilmiş yüksek hızlı tarama problemleri da mevcuttur.

2.12.3. Otomatik Prob Değişirme Magazini

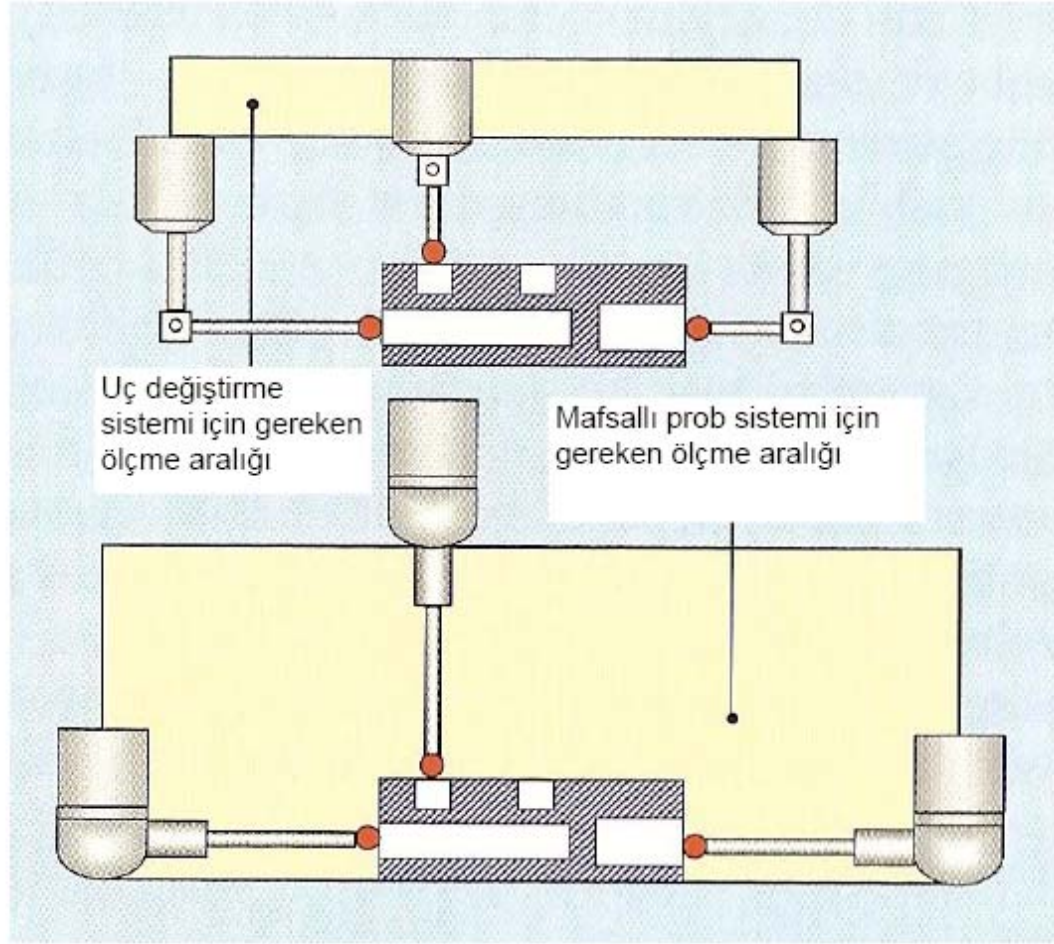
Ölçüm programı esnasında farklı açı, uzunluk ve çap değerlerine sahip iğnelere ihtiyaç duyulabilir. Otomatik olarak prob değişirme magazinleri sayesinde bir ölçüm ucunun bırakılıp diğerinin alınması CNC program içerisinde otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

Farklı açıların seçilebileceği indekslenebilir prob kafaları olduğu gibi sabit kafa sistemleri de mevcuttur. Magazinler kullanıldığında sabit kafaların kullanımı kolaylaşır. Böylece özellikle küçük koordinat ölçüm tezgahları için önem arz eden net ölçüm kapasitesi arttırılmış olur. Şekil 2.7’de otomatik prob değişirme magazini gösterilmiştir.



Şekil 2.7; Otomatik prop değişirme magazini

Şekil 2.8’de indekslenebilir prob kafası yerine otomatik prob değişirme magazini kullanılan bir sistemde sağlanan net ölçüm kapasitesi kazancı gösterilmiştir. Magazin kullanılan sistemlerde indekslenebilir prob kafası kullanmaya gerek kalmayabilecektir.



şekil 2.8; İndekslenabilir prob kafası yerine otomatik prob değiştirme magazininin kullanılması

2.12.4. Çoklu-Sensör Teknolojisi

Çoklu-sensör teknolojisi gerekli yerlerde dokunmatik gerekli yerlerde ise mekanik dokunma olmadan temassız ölüm yapabilme esnekliğine sahip sistemlerdir. Birbirine göre aynı referansta kalibre edilmiş sensörler ölüm esnasında değiştirilirse bile ölüm sonuçları açısından farklılık yaşanmaz.

Temassız lm sistemlerine en iyi örnek lazer sistemleridir. Bu tip ölümlerde ölüm yüzeyine dik lazer gönderilmesi önem taşır bu nedenle sistemler daha çok indekslenabilir prob kafası üzerinde kullanılır. Lazer sistemlerinden başka son zamanlarda kamera sistemleri de ölüm amaçlı kullanılmaktadır. Bu yöntemler

sıklıkla tersine mühendislik ve dizayn alanlarında serbest yüzeylerin ölçüm ve oluşturulmasında özel yazılımların da yardımıyla kullanılırlar.

2.13. Kaç Adet Ölçüm Noktası Gerekli?

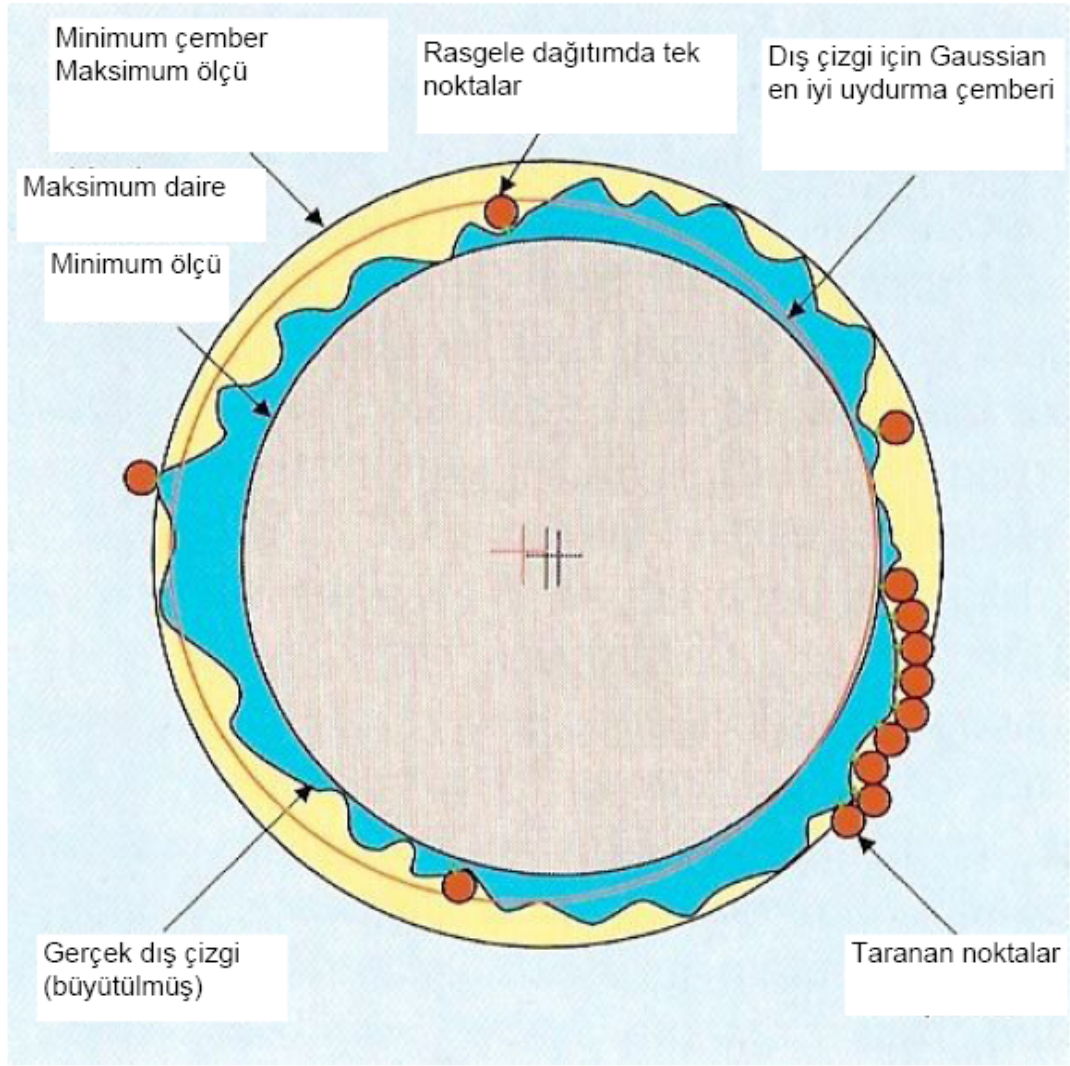
Kısa bir süre önce ölçüm parçası yüzeyinden birkaç nokta alınmasının yeterli olduğu düşünülmektedir. Bir silindir veya delik yalnızca dört yada sekiz noktadan ölçülmektedir. Ölçüm verileri arasında büyük boşluklar normal varsayılmaktaydı. Koordinat metrolojisi imalat prosesi için gerekli olan güvenilir bilgiyi kısa sürede elde edememektedir. Az sayıda nokta alınarak elde edilmiş ölçüm verileri göz ardı edilemeyecek dezavantajlar yaratır.

Form sapmaları olan endüstriyel parçalarda, sonuçlar gerçek şekli yansıtmaz.

Elde edilen verilerin analiz edilip ilgili elemanların oluşturulmasında en küçük kareler yöntemini kullanan best fit metodundan başka metot kullanılmaz. Oysa nokta sayısı yeterli düzeye ulaşabilirse maksimum ve minimum yöntemleri gibi farklı metotlar uygulanabilir.

Az nokta alındığında; eğer ölçüm noktalarının yeri değiştirilirse ölçüm sonuçları da değişebilir. Alınan birkaç nokta homojen bir hata dağılımı garanti edemeyecektir.

Şekil 2.9’da da görülebileceği üzere, örnek bir dış çap üzerinden alınan 4 nokta yeterli olabilmekte, ancak sürekli tarama sonucunda elde edilen veriler ile tekrarlanabilir dairesellik değerleri elde edilebilmektedir. Minimum ve maksimum yöntemleri sadece çoklu nokta ölçümlerinde kullanılabilir.



Şekil 2.9; Çoklu nokta ölçümü

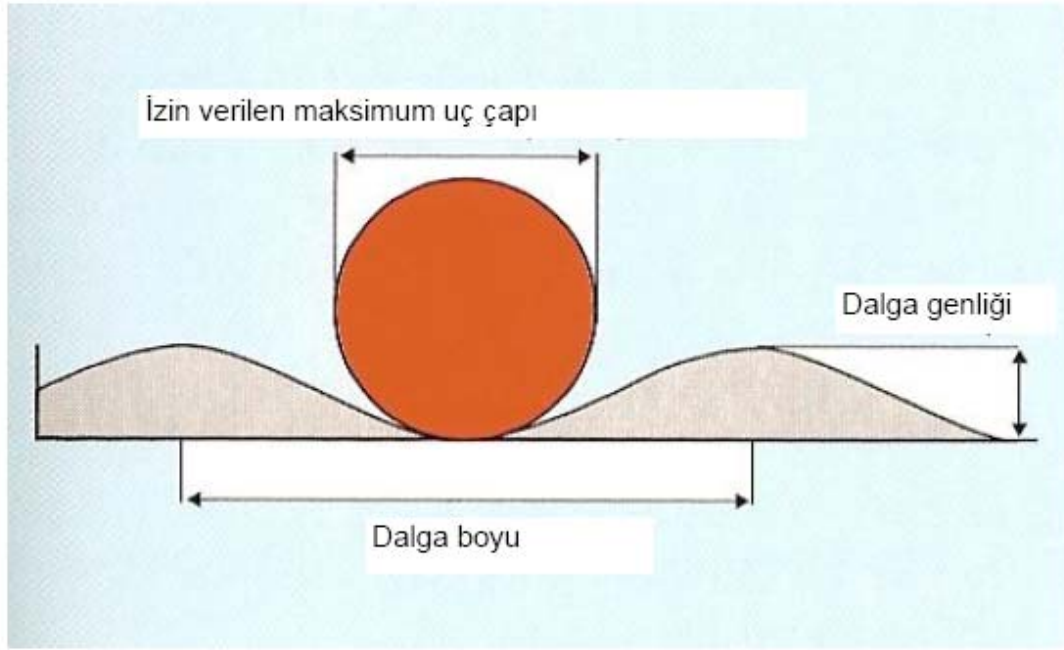
Eskiden dört nokta alma zamanında günümüz teknolojisi ile binlerce nokta almak artık mümkündür. Tarama teknolojisi genellikle tek nokta ölçümünün dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır. Ölçüler yüksek tekrarlanabilirlik değerlerine ulaşmakla kalmamakta, form hataları da uygun matematiksel hesaplama metotlarına imkan tanıyarak gerçek değerleri ile hesaplanabilmektedirler.

2.14. Yeni Uygulama-Form Ölçümleri

Form ölçümleri alanında koordinat ölçüm tezgahlarının kendi yerlerini bulmaları biraz zaman alsa da sürekli tarama problemlerinin geliştirilmesi ile özellikle büyük ölçüm parçalarındaki form ölçüm sorunlarına çözümler üretilebilmiştir.

Koordinat ölçme tezgahları form ölçümleri için tasarlanmış form ölçüm makinelerinden farklı bir prensip ile çalışmaktadır. Form ölçüm tezgahlarında bir eksen etrafında dönen iş parçası tek ekseninde sabit bir ölçüm ucu ile ölçülürken, koordinat ölçüm tezgahlarında ölçüm parçası sabit kalırken koordinat ölçüm tezgahı her üç ekseninde hareket ederek tarama yapabilmektedir. Bir döner tabla elemanı sisteme dahil edildiğinde dördüncü eksen kazandırılıp ölçüm parçasının da dönmesi sağlanabilir fakat bu durum istisnadır. Genelde koordinat ölçme tezgahlarında döner tabla standart değildir. Döner tabla eksenine merkezlenemeyen eksantrik olmayan parçaların form ölçümünde koordinat ölçüm tezgahlarının kullanımı daha uygundur. Ölçüm ucu parçanın çevresinde istenilen yolu takip ederek ölçü alabilir. Her iki sistemde de elde edilen veriler filtrelenebilir, yüzey pürüzlülükleri elimine edilip form sapmaları hesaplanmalıdır. Hem koordinat ölçüm tezgahlarında hem de form ölçüm tezgahlarında aynı matematiksel yöntemler uygulandığı için aralarında sonuçlar açısından bir farklılık yoktur.

Şekil 2.10'da gösterildiği üzere ölçülecek yüzey sinüs eğrisi şeklinde düşünüldüğünde, sağlıklı ölçüm değerleri için ihtiyaç duyulacak ölçüm ucu çapını hesaplamak mümkün olacaktır.



Şekil 2.10; Ölçüm ucu çapının hesabı

Bahsedilen filtreleme değer parçanın teknik resminden elde edilebileceği gibi en uygun filtre gözlem sonucu ile de seçilebilir. Standart filtreleme değerleri 15, 50, 150 ve 500 dalgalanma/devir (UPR) veya kesme dalga boyu değeri olan $\lambda_c=8$ mm, 2.5 mm, 0.8 mm ve 0.25 mm kullanılabilir.

Koordinat ölçme tezgahları ile form ölçümleri şu önemli avantajları sağlamaktadır:

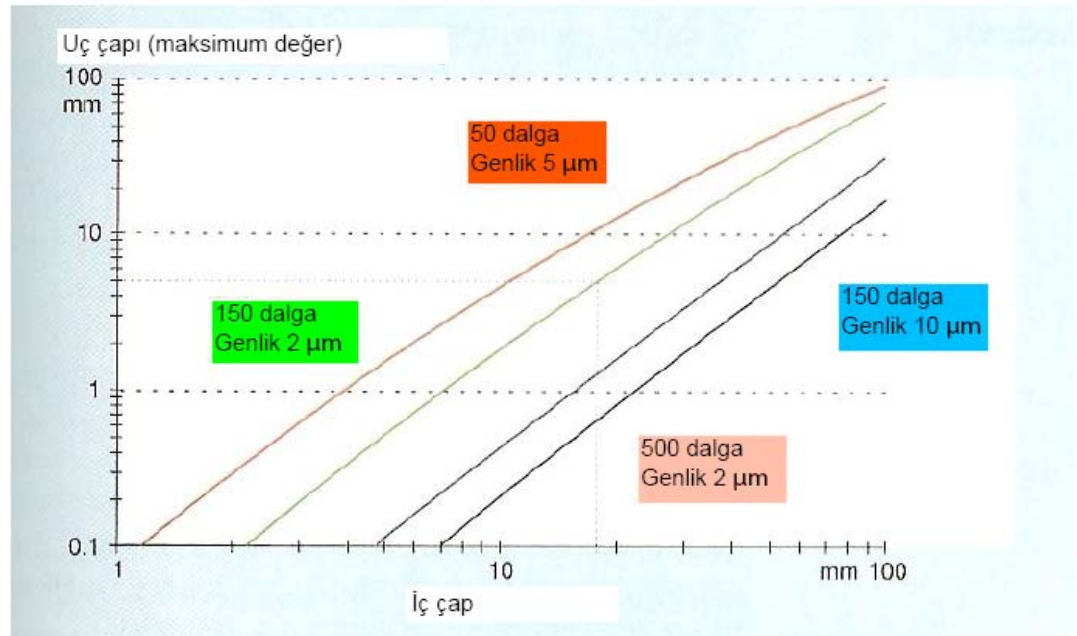
- Parça üzerinde mekanik doğrultma yapmaya gerek kalmaz.
- Ölçüm parçaları sabit kaldığı için çok büyük parçalar kolaylıkla ölçülebilir.
- Sisteme dördüncü eksen olarak döner tabla eklenmesi eksantrik parçaların tek bağlama ile pratik olarak ölçülebilmesini sağlar.
- Parçayı ölçüm tablasından sökmeden form ölçümü dışında tüm geometrik ölçümleri de tek bir makine ile gerçekleştirilebilir.
- Ölçüm zamanları gözle görülebilir ölçüde hızlıdır.
- Tüm ölçüm sonuçlarına aynı koordinat sistemi uygulanır.

Form ölçüm tezgahlarının avantajları ise:

- Tek ekseninde çalışan ölçüm ucu ve döner tabla sayesinde ulaşılan daha hassas ölçüm belirsizlikleri
- Çok küçük ölçüm ucu kullanımına imkan tanınması

şeklinde sıralanabilir.

Şekil 2.11’de ise ölçülecek çap ve ölçüm ucu çapı arasındaki bağıntı, derinlik ve filtreleme değeri açısından incelenmiştir

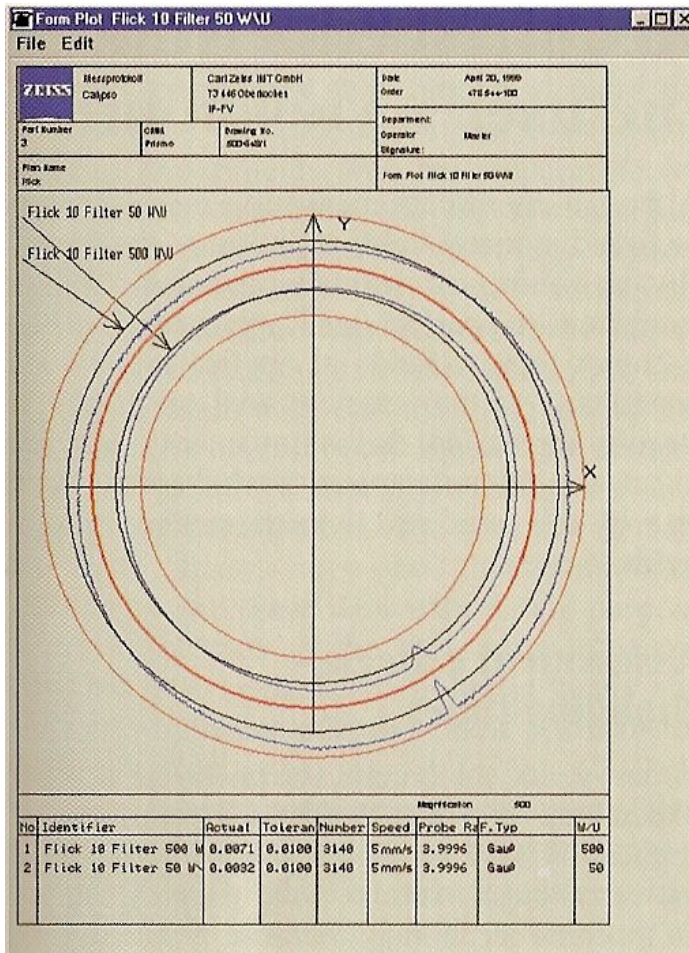


Şekil 2.11; Ölçülecek çap ve ölçüm ucu çapı arasındaki bağıntı

Koordinat ölçme tezgahlarında kullanılan ölçüm ucu çapları genel olarak form ölçüm tezgahlarından daha büyüktür. Bunun en önemli nedeni uzun ölçüm uçları için büyük çaplı uç kullanma gereğidir. Büyük çapların ölçümü kullanılması istenilmeyen bir filtreleme efektine neden olur. Bu hataya göz yumulur. Bu nedenle koordinat ölçme tezgahları ile yapılan form ölçümlerinde probun çapı mutlaka belirtilmelidir. Şekilde pürüzlülük ölçümlerinden yola çıkılarak bu bağlantı açıklanmıştır. Örnek

olarak 5 mm çapında bir prob ile dalga derinliği $2\mu\text{m}$ olan 150 UPR filtreleme değeri ile ortalama 18 mm iç çap değerindeki bir delik ölçülebilir.

Koordinat ölçme tezgahları sadece dairesellik ve silindiriklik ölçmek için uygun değildir aynı zamanda doğrusallık yada düzlemsellik de ölçebilirler. Böyle bir durumda UPR cinsinden bir filtre değeri girmek mümkün değildir. Bu gibi durumlarda filtre değeri dalga boyu cinsinden verilebilir. Örnek olarak $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$. Bu filtre değerleri ya teknik resimden yada elde edilmiş deneysel veriler doğrultusunda seçilir. Şekil 2.12’de bir koordinat ölçme tezgahı ile yapılan form ölçümü raporu görülmektedir



Şekil 2.12; Form ölçümü raporu

2.15. Koordinat Ölçme Tezgahlarının Yetenekleri

Koordinat ölçme tezgahlarının yeterlilik testlerini gerçekleştirirken en önemli kıstas tanımlanmış ölçüm toleransları içinde güvenilirliği sağlamak ve müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilmektir.

Uluslararası standartlar göstermektedir ki; ölçüm belirsizlikleri, toleranslar ve çevre etkileri ölçüm sonuçlarını etkileyecek tüm değişkenler göz önüne alındığında, koordinat ölçme tezgahları mevcut performans ihtiyacını karşılamaktadır. Uzunluk mastarı üreticilerinin kuralı olarak da bilinen; ölçme tezgahından gelen belirsizlik ölçüm tolerans aralığının 1:10'u olmalıdır şartı, koordinat ölçme tezgahlarının performans ihtiyacını belirlemiştir.

Toleransların güvenilir bir şekilde gözlemlenebilmesi için ölçüm belirsizliklerinin de göz önüne alınması şarttır. Diğer bir deyişle sonuçlar ISO 14253-1 standardında tarif edilen uygunluk bölgesi içinde bulunmalıdırlar.

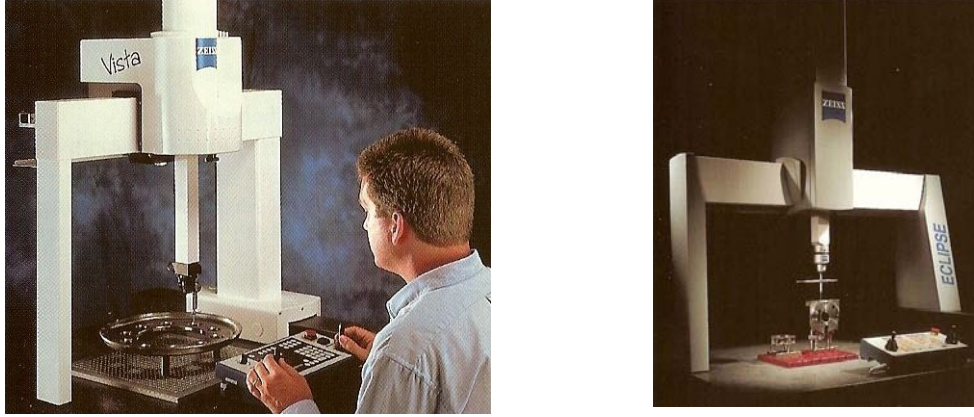
2.16. Tezgah Sınıfları ve Uygulama Alanları

Koordinat ölçme tezgahları çeşitli piyasa ihtiyaçlarını karşılamak üzere farklı sınıflarda üretilmektedir. Küçük firmaların tercih ettikleri tezgahlar ile ölçüm parçaları standartlaşmış, ölçüm gereksinimleri belirli büyük firmaların tercih ettikleri tezgahlar birbirinden farklıdır. Bu nedenle ihtiyaç dahilinde koordinat ölçme tezgahları belirlenen ihtiyaç sahibi firmanın uygulamaları göz önünde bulundurulmalıdır.

2.16.1. Orta Hassasiyetli Üniversal Ölçümler

Bu tip tezgahlar, çözüm maliyetinin ön planda tutulduğu orta ölçekli firmaları hedef almaktadır.

Enjeksiyon kalıplarında kullanılan parçalar, elektronik elemanlar, döküm ve saç parçalar, imalat parçalarının koruyucu kutuları gibi parçaların ölçümlerinde kullanılır. Koordinat ölçme tezgahları genellikle atölye ortamında kullanılabilirler. Şekil 2.13’de orta hassasiyete sahip koordinat ölçme tezgahları gösterilmiştir.



Şekil 2.13; Orta hassasiyetli koordinat ölçme tezgahları

Firmalar; düzlem, silindir, çap, koni, nokta gibi geometrik elemanların yanı sıra serbest yüzeylerin ölçümüne yada CAD model ile bire bir karşılaştırılmasına ihtiyaç duyabilmektedirler. Bu istekler koordinat ölçme tezgahının performans ihtiyacını arttırmaktadır. Genel olarak orta ölçekli firmalar; geniş ölçüm aralığı, orta seviye hassasiyet ve kullanım kolaylığı aramaktadırlar. En önemli ikinci etmen ise genellikle çözüm maliyetidir. Şekil 2.13’de gösterilen koordinat ölçme tezgahları yukarıdaki ihtiyaçları karşılayacak modellerdir. Her iki tezgah da hem manuel modda hem de otomatik CNC modda çalışarak ölçüm yapabilirler. RAM olarak adlandırılan Y eksen ve Z eksenleri seramik malzemeden imal edilmiştir. Seramik malzemenin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek rijitlik
- Olumlu termal davranışlar
- Korozyona uğramama
- Yüksek aşınma dayanımı
- Hava yastıkları için ideal yataklama özellikleri

Bu tip tezgahlarda kullanılan ölçüm problemleri dokunmatik tipte olup noktasal ölçümde yüksek performans sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Şekil 2.13'te gösterilen tezgahlar aynı zamanda analog prob olarak tabir edilen tarama performansı yüksek problemler ile de çalışabilir. Ayrıca bu tip sistemlere otomatik prob değiştirme magazini bağlanarak tam anlamıyla ölçüm otomasyonu sağlanabilir.

2.16.2. Yüksek Hassasiyetli Üniversal Ölçümler

Devamlı bir imalat prosesinin gözlemlenmesi, üretim parçalarındaki boyut, form ve pozisyon değerlerinin kontrol altında tutabilmesi için yüksek hız ve hassasiyette koordinat ölçme tezgahlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ölçümler fonksiyon bazlı yapılmalıdır. Diğer bir deyişle tüm ölçüler teknik çizime bağlı olarak kontrol edilmelidir. Parça teknik çiziminden gelen metotlar ile referans edilmeli ve ölçüm verileri istenilen standartlar dahilinde analiz edilmelidir.

Devamlı tarama metotlarındaki gelişmeler sayesinde çoğu büyük imalatçı ölçülerinde tarama probu kullanmaya başlamıştır. Kısa sürede hassas ve çok sayıda veri toplayarak ölçüm yapan bu tezgahlar daha çok orta büyüklükteki ölçüm parçalarına kadar idealdir. Şekil 2.14'de kabinli sistemler gösterilmektedir.



Şekil 2.14; Kabinli sistemler taşınabilir yapıya sahiptir

Araç kontrol sistemleri, türbin kanatları, jet parçaları, dişli çark kutuları, vidalı kompresörler, rotor ve benzeri elemanların ölçümü için idealdirler. Bu modellerin genel özelliklerini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Değiştirilebilir prob sistemi
- Dokunmatik problemler ile hassas noktasal ölçüm
- Dijital tarama desteği
- Analog tarama problemleri ile yüksek hızlı tarama kabiliyeti
- 16°C ile 30°C arasında çalışabilen sıcaklıktan en az etkilenen skalalar
- Yüksek hassasiyet ve hız
- Kabinli sistem ölçüm çözümleri ile taşınabilir yapıya sahiptirler. Bu sayede imalatın yanında bulunabilirler ve bütünleşik çalışabilirler
- Elde edilen ölçüm verilerini başka sistemlere gönderebilirler. İstatistiksel proses kontrolü için modüllerle desteklenebilirler.

Teknolojideki hızlı gelişim sayesinde büyük imalat parçalarının hassas ölçümleri de yapılabilecek hale gelmiştir. Kısa sürede, orta büyüklükteki parça ölçümlerini hedefleyen bu grup koordinat ölçme tezgahları hedef kitlelerini genişleteceklerdir.

2.16.3. Referans Ölçümleri ve Kalibrasyonlar

Devlet enstitüleri ve metroloji laboratuvarları ultra hassasiyete sahip, referans makineleri olarak kullanılacak üç boyutlu koordinat ölçme tezgahlarına ihtiyaç duyarlar. Boyut, form ve pozisyon ölçümleri bir bütün olarak düşünüldüğünde rakipsiz düzeyde hassas tezgahlar olan koordinat ölçüm tezgahları bu tip ölçüm ve kalibrasyonlarda tek çözümdür.



Şekil 2.15; Ultra ölçüm hassasiyetine sahip koordinat ölçme tezgahı

Örnek olarak alınan Şekil 2.15'deki tezgah Zeiss marka CARAT modelidir. Özel alaşım alüminyum kaplama sürücü sistemi uzun süreli stabilite sağlamaktadır. Alüminyumun iyi ısı iletkenliği sıcaklık açısından homojen bir dağılımın oluşmasını sağlamaktadır. Ölçüm skalaları genleşme katsayısı sıfır denecek kadar az olan zerodur malzemesinden yapılmıştır. Yüksek hassasiyette kalibre edilmiş bu tezgahlar tüm matematiksel hata düzeltme faktörlerini kullanmaktadırlar. Köprü sürücü sistemi Y ekseninde yani bir başka deyişle ağırlık merkezinin ortasındadır. Bu dizayn ile hareket halinde ve hızlanma esnasında oluşan eğme, burulma, gerilme ve basma kuvvetleri diğer modellere göre minimuma indirgenmiştir. Sonuç olarak 19°C ile 21°C arasında çalışacağı varsayılan bu tezgahın 600 mm'lik ölçüm parçasında yapacağı maksimum hata 1,5 µm mertebesinde.

Kullanım alanları; kalibrasyon, master referans ölçümleri, standartların ölçümleri, geçer geçmez masterları, yüksek hassasiyetli iş parçaları olarak sınıflandırılabilir.

2.17. Otomotiv Parçalarının Ölçümleri

Doksanların başına kadar otomotiv sektöründe gövde ölçümlerinde problu fikstür sistemleri kullanılmaktaydı. Sabit ölçüm uçlarının fikstürlere monte edilerek gövdenin kritik pozisyonlarının ölçülerinin çıkarılması prensibine dayanan bu yöntemin avantajlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

- Kaba atölye ortamında rahat kullanım
- Özel operatör eğitimi gerektirmeyen kullanım kolaylığı
- İmalat alanı değişse dahi taşınarak yeniden konumlandırılabilir esnek kullanım

Bu özelliklere karşın günümüz ölçüm teknikleri ile karşılaştırıldıklarında ortaya çıkan dezavantajları ise:

- Yeni ürün veya modifikasyonlar sonucunda sistem adaptasyonları için gereken yüksek yatırım maliyeti
- Sabit ölçüm sistemleri olduklarından dolayı, ölçüm parçaları değiştiğinde ölçüm fikstürlerinin yeniden tasarlanıp imal edilmesi gerekir
- Ölçüm tekrarlanabilirliği ve hassasiyet düşüktür. Operatör hataları direkt sonuca yansır
- Çoğunlukla doğru/yanlış sonucu elde edilir. Herhangi bir analitik geri besleme mevcut değildir
- Sistemler çok büyük yer kaplamaktadır

Bu sistemlerin avantajlarına sahip olma yönünde gelişme gösteren koordinat ölçme tezgahları, günümüzde otomotiv endüstrisinde vazgeçilmez ölçüm tezgahları olarak kullanılmaktadırlar. Koordinat ölçme tezgahları imalatın sürekli göz altında tutulması, yeni model veya serilerin piyasaya sürülmesi esnasında son derece önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 2.16'da otomotiv sektöründe kullanılan bir koordinat ölçme tezgahı gösterilmiştir.



Şekil 2.16; Otomotiv sektöründe kullanılan, LK Ltd. marka koordinat ölçme tezgahı

Koordinat ölçme tezgahlarının otomotiv endüstrisi tarafından bu şekilde kabul görmesinin başlıca sebepleri:

- Üç boyutlu bilgisayar verileri (CAD data) ile birebir karşılaştırma imkanı sağlaması
- Elde edilen ölçüm verilerinin eş zamanlı analizi sayesinde SPC ve tersine mühendislik uygulamaları kabiliyeti
- Ölçüm programlarındaki küçük bir düzeltme ile imalattaki değişikliklere kısa sürede adaptasyon sağlama
- Ölçüm program ve sonuçlarının global değiş tokuşu
- Atölye personeli tarafından kullanım kolaylığı
- Kullanım ömürleri boyunca sağladıkları karlılığın yüksek olması

- Bu avantajların yanı sıra koordinat ölçme tezgahlarına entegre edilmiş bilgisayarlar sayesinde elde edilen veriler çok çeşitli şekillerde kullanılabilir. Güvenilir veri mevcut olduğu sürece, örnekleme yolu ile ölçüm aralığı daha uzun tutulabilir.

Özel olarak araç gövdelerinin ölçümü için dizayn edilen yatay kol tipi tezgahlar köprü tipinin uygun olmadığı ölçüm parçalarının da incelenmesinde kullanılabilir. Özellikle çok büyük makine tasarımlarında sistem rijitliği sağlayan bu dizaynlar senkronize çalışan çift kol tipi alternatiflerine kadar çeşitlilik gösterirler.

2.18. Tasarım ve Prototip Alanlarında Ölçüm

Yüzeylerin temassız tarama problemleri kullanılarak ölçümü, ölçüm ucunun önceden tanımlanan bir dış çizgiyi otomatik takip edebilmesi gibi yöntemler model ve bitmiş imalat parçası arasındaki zamanı önemli bir ölçüde azaltmıştır. Şekil 2.17’de lazer ölçüm ucu kullanan portatif koordinat ölçme tezgahı gösterilmiştir.



Şekil 2.17; Tasarım ve prototip alanında da sıklıkla kullanılan Fransız Romer firmasının ürettiği, lazer ölçüm ucu kullanan portatif koordinat ölçme tezgahı

Günümüzde otomatik tarama adı verilen metot kullanılarak elde edilmiş avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Dizayn modellerinin sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılması
- İş parçalarındaki bölgesel alanlar değiştirildiğinde sayısallaştırılarak CAD modelin yenilenmesi
- Yeni parçalar tasarlanırken ana sistem üzerinden veri toplanabilmesi

2.18.1. Ölçüm Sonuçları Ne Kadar Hassas?

Koordinat ölçme tezgahı kullanıcıları elde ettikleri her ölçüm sonucunun bir belirsizliği olduğunu bilmeleri gerekmektedir. Tüm ölçüm sonuçları için tek bir ölçüm belirsizliği tanımlamak mümkün değildir. Bunun nedenlerini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Sadece tek tip ölçüm yapan ölçüm tezgahlarına kıyasla koordinat ölçme tezgahları iş parçası üzerindeki tüm geometrik ölçülerde kullanılabilirler
- Ölçüm sonuçları, ölçüm noktalarının analitik hesaplamaları sonucunda elde edilirler. Noktasal koordinatlar kullanılarak ölçüm elemanlarının farklı özellikleri hesaplanmaktadır.
- Ölçümler, farklı stratejiler kullanılarak yada ölçme tezgahının değişik alanlarında yapılabilir.
- Ölçüm sonuçları, referans oluşturmada kullanılan elemanların doğruluğuna göre farklılık gösterebilmektedir.

Tüm bu nedenlerden dolayı ölçüm belirsizliği üzerine sadece birkaç özellik standart hale getirilebilmiştir. Bir tek sonuca bağlanamayacak olan ölçüm belirsizliği koordinat ölçme tezgahları için genel anlamda uygulanamamaktadır. Bu nedenle standartlar (ISO 10360) tam anlamıyla açıklanmış bir ölçüm prosedürü için en fazla izin verilen hata payından bahsetmektedirler. Bu değer MPE (maximum permissible error) (izin verilen maksimum hata) olarak adlandırılır. Buradaki hata tanımı, izin verilen yada göz yumulan, gerçek değerden sapma olarak anlaşılmalıdır.

Şekil 2.18’de de gösterildiği gibi uzunluk masterlarının doğrusal ölçümlerinde izin verilen maksimum hata değeri (ISO 10360-2) MPE_E olarak adlandırılır ve şu şekilde formüle edilir;

$$MPE_E = \pm (A + L/K)$$

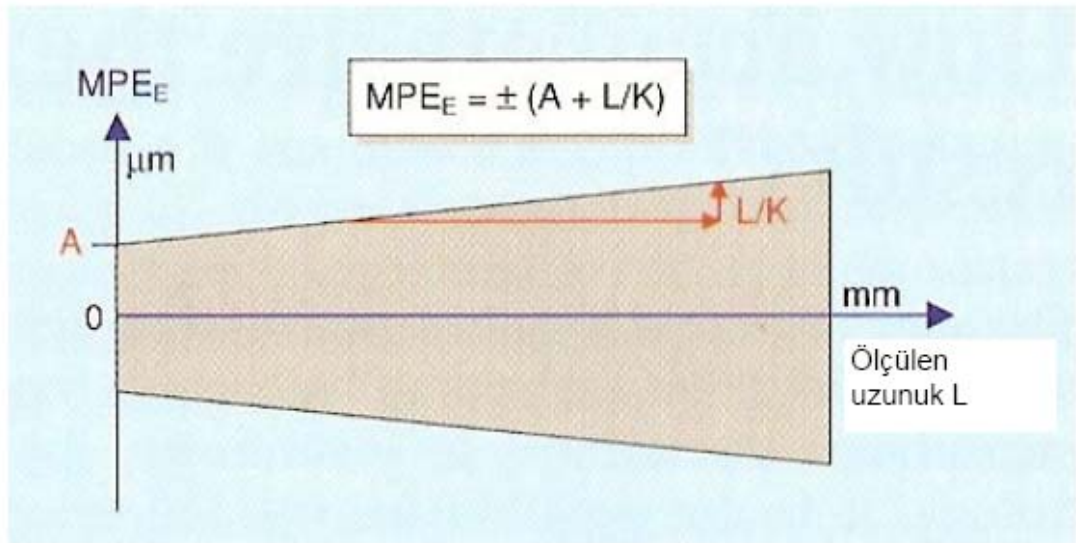
A ve K değerleri üretici firma tarafından sağlanacak değerlerdir.

Örnek;

$$MPE_E = \pm (1.4 + L/350) \mu m$$

L, milimetre cinsinden ölçülecek değerdir. Bu ölçülecek değerin 800 mm olması durumunda yukarıdaki formülden;

$$MPE_E = \pm 3.7 \mu m \text{ olarak hesaplanır.}$$



Şekil 2.18; İzin verilen maksimum hata değeri ile ölçüm uzunluğu arasındaki ilişki

Bu formül tezgahın net ölçüm kapasitesi içinde bulunan tüm üç boyutlu uzunluklar için geçerli olmak zorundadır. Kabul testleri esnasında tezgah, maksimum izin verilen hata değerinin içinde olmalıdır.

Göz önünde bulundurulması gereken bir başka hata ise prob hatasıdır. Bunun hesaplanabilmesi için referans küresi üzerinden homojen dağılımlı 25 adet nokta

alınır. MPE_p elde edilen bu noktalardan “Gaussien best fit” metodu ile hesaplanan küre geçirilerek maksimum sapmalara bakılarak hesap edilir.

Diğer başka standartlarda, döner tablanın ekseninin, tarama modunun, prob kafasının ve prob değiştirme magazinlerinin özelliklerine ait tanımlamalar da mevcuttur.

2.18.2. Sıcaklık ve Ölçüm Belirsizliği

Koordinat ölçme tezgahlarının imalatın içinde, havalandırılmış özel odalar dışında kullanılması ihtiyacı sıcaklık etkilerinin önemini arttırmıştır. Gerçek ölçüm ortamı ile standartların belirlediği ortamlar birbirinden farklılık gösterirler. Günümüzde kullanıcılar iş parçalarının ortam sıcaklığında şartlanması için gerekli zaman kaybına sıcak bakmamaktadırlar. Sabit sıcaklığın sağlandığı özel odalar da maliyeti arttırmaktadırlar. Uzunluk ölçümleri için uluslararası sıcaklık standardı 20^0C 'dir. Toleranslar açısından bu sıcaklığın dışında yapılan ölçüm sonuçları dönüştürülmelidirler. Bu dönüştürme çoğunlukla ölçüm parçası ve ortam sıcaklığının belirlenmesi ile koordinat ölçme tezgahının yazılımı aracılığı ile yapılmaktadır. Bazı koordinat ölçme tezgahları, ölçüm probu yerine sıcaklık algılayıcısı ile önce parçaya dokunarak sıcaklık ölçümü yaparlar. İlk etapta beklenen sıcaklık etkileri ölçüm parçasının ve koordinat ölçme tezgahının skalalarının lineer şekil değiştirmesidir.

Bu nedenden dolayı basit bir çıkarım yapmak mümkündür. Çelik ölçüm parçaları için çelik skala ideal sonuç verecektir fakat alüminyum yada plastik parçaların ölçümü esnasında çelik skalalar sonuçları olumsuz etkileyecektir. Sonuçların kompanzasyonu şarttır. Bazı koordinat ölçme tezgahları sıcaklık etkisi altında eğilme ve burulma eğilimi göstermektedir. Bu değerler yazılım aracılığı ile kompanze edilememektedir.

2.18.3. Termal Stabiliteye Sahip Koordinat Ölçme Tazgahları

Isısal değişimlerin etkilerini en aza indirmek için en etkin yol ölçüm parçası dışındaki tüm ölçüm malzemelerinin ısı etkilerini ortadan kaldırmaya çalışmaktır. Bu

ideal ortamda sıcaklıktan bağımsız olarak aynı sonuçların elde edilebileceği varsayılabilir.

Isının etkilerini minimuma indirmek için konstrüksiyonda aşağıdaki değişikliklere gidilmiştir:

- Skalalar zerodür'den imal edilmiştir. Bu malzemenin genleşme katsayısı sıfıra çok yakındır ve belirsizliği $0,05 \cdot 10^{-6} / K$
- Eksen yatakları alüminyumdan yapılmıştır ve sıcaklık iletkenlikleri yüksek olduğundan eğilme eğilimi göstermezler.
- Granit ölçüm tablasının şekil değiştirme eğilimi matematiksel kompanzasyonlar ile minimize edilmeye çalışılır.
- Makinenin ısı yalıtımı yapılır
- Matematiksel skala düzeltme faktörleri uygulanır
- Matematiksel sürüklenme düzeltme faktörleri uygulanır
- Tüm eksenlerin matematiksel düzeltme faktörleri girilir

Konstrüksiyon ve dizaynda yapılan iyileştirmelerin dışında diğer düzeltme faktörlerinin hesaplanabilmesi ölçümü etkileyen kritik merkezlerin sıcaklık değişiminin gözlemlenebilmesine bağlıdır. Ortam sıcaklığı ve parçanın sıcaklığı birden çok sıcaklık ölçer ile kontrol edilir. Geri kalan hesaplama ise yazılımın içerisinde çözümlenir. Yazılım, ölçüm esnasında kullanılan tüm malzeme kombinasyonlarının genleşme katsayılarını hesaba katabilmektedir.

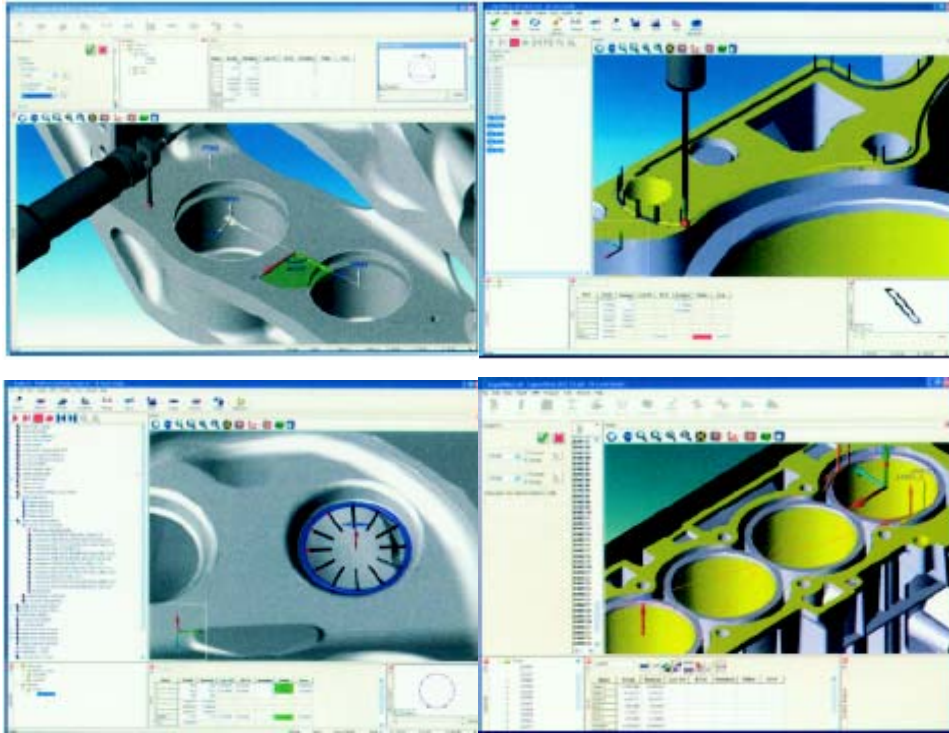
2.19. Koordinat Ölçme Tezgahı Yazılımlarının Özellikleri

Koordinat metrolojisinin gerektirdiği temel özelliklerin dışında günümüz metroloji yazılımları aşağıdaki özellikleri de içerebilmektedirler:

- İstatistik ve proses kontrolü
- İki ve üç boyutlu eğrilerin ölçümü
- Serbest yüzey ölçümleri
- Üç boyutlu bilgisayar modelleri kullanabilme

- Dişli ölçüm kabiliyeti
- Boru ölçüm yetenekleri
- İleri seviye raporlama ve analiz
- Tersine mühendislik opsiyonları

Aşağıdaki şekilde Camio Studio adlı koordinat ölçme yazılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.19; Lk Ltd. koordinat ölçme yazılımı, Camio Studio programından ekran görüntüleri

2.20. Koordinat Ölçme Tezgahlarının Geleceğine Genel Bakış

Müşteri istek ve ihtiyaçları doğrultusunda son yıllarda koordinat ölçme tezgahları hızlı bir gelişim göstermiştir. Kısa zamanda bu alandaki beklentiler şu şekilde özetlenebilir:

- Çoklu nokta ölçüm metotları gelişimini sürdürecektir, ölçüm stratejileri ve yöntemleri bu yönde ilerleyecektir.
- Koordinat ölçme tezgahları kaba atölye ortamlarında yüksek performans ile çalışabilecek hale gelecektir.
- Ölçüm süreleri önemli ölçüde azalacaktır.
- Ölçüm için gerekli operasyonlar daha da basit hale gelecektir.
- CAD sistemlerinin entegrasyonu gelişecek ve yaygınlaşacaktır.
- Optik ölçüm sensörlerinin kullanım alanları yaygınlaşacaktır.
- Ölçülen her değer kendi içerisinde belirsizliği ile elde edilebilecek hale gelecektir.
- Yeni hedef kitleler ortaya çıkacaktır.

Gelecekteki gelişmelerde ISO standartlarının rolü büyük olacaktır.

ISO 10360 Bölüm 1 ve Bölüm 6'daki standartlar dahilinde koordinat ölçme tezgahları kullanıcılar tarafından kolaylıkla tarafından kolaylıkla karşılaştırılabilecektir.

ISO 14253 Bölüm 1 ve Bölüm 4 özelliklerine uygunluk ve uygunsuzluk için karar kuralları tanımlamakta, ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ve ölçülmesi için tanımlar içermektedir.

ISO 15530 standardı belirsizliğin hesaplanabilmesi için kullanıcıya yol göstermekte ve farklı tekniklerin standartlaşmasına imkan vermektedir.

ISO 5459 referanslama sistemleri ve toleranslama temellerini standart hale getirmek için tekrar revize edilecektir.

ISO 12181 (dairesellik), ISO 12180 (silindiriklik) , ISO 12780 (doğrusallık) ve ISO 12781 (düzlemsellik) standartları form sapmalarında kullanılacaktır.

Teknik çizimlerdeki ölçüler ve toleranslar ISO 1101, 2692 ve 5458 standartlarına uygun tanımlanacaktır.

Farklı ulusların ürettikleri birbirinden farklı dizaynlar belirli standartlarda birleştirilmelidir. Çözülmek istenen problem tanımlanıp standart hale getirildiğinde farklı üreticiler farklı çözümler sunacaklardır fakat elde edilen somut sonuçların karşılaştırma kriterleri standart olmak zorundadır. Önemli olan ve yakın gelecekte ulaşılacak nokta; koordinat ölçme tezgahlarının standartlaştırılması değil üç boyutlu koordinat metrolojisinin değerlendirme kriterlerinin standartlaştırılması olacaktır.

3. 3 BOYUTLU TARAYICI

3 Boyutlu Tarayıcı, bir objenin veya ortamın biçimi ve bazen de rengi ile ilgili veri toplamak amacıyla objeyi ve ortamı analiz eden bir cihazdır. Toplanan veriler daha sonra muhtelif uygulamalarda kullanılan dijital, üç boyutlu modellerin oluşturulmasında kullanılır. Bu cihazlar film ve video oyunu üretimi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer uygulamalar arasında kültürel tarihi eserlerin bilgisayar ortamına aktarılması ve dokümantasyonu sayılabilir.

3.1. Fonksiyonellik

3 boyutlu bir tarayıcının kullanım amacı genelde objenin yüzeyinde bir nokta bulutu oluşturmaktır. Bu noktalar daha sonra objenin şekli hakkında tahmin yürütmek için kullanılabilir (bu prosese rekonstrüksiyon adı verilir). Eğer renk bilgisi her noktada toplanırsa, nesnenin yüzeyindeki renkler de belirlenebilir.

3 boyutlu tarayıcılar kameralarla oldukça benzerlik gösterir. Kameralar gibi 3 boyutlu tarayıcıların da koni biçimli görüş alanları vardır ve yalnızca bulanık ve silik olmayan yüzeyler ile ilgili bilgi toplayabilirler. Kameralar görüş alanları dahilindeki yüzeyler için renk bilgisi toplarken 3 boyutlu tarayıcılar görüş alanları dahilindeki yüzeyler için uzaklık bilgisi toplayabilirler. Bir 3 boyutlu tarayıcı ile oluşturulan resim, resimdeki her bir noktanın bir yüzeye olan uzaklığını tanımlar. Eğer tarayıcının orijin ve tarayıcının ön tarafından dışarı doğru uzanan vektör de $\phi=0$ ve $\theta=0$ şeklinde bir küresel koordinat sistemi tanımlanırsa, resimdeki her nokta bir ϕ ve θ ile ilişkilendirilir. r bileşenine tekabül eden bu küresel koordinatlar resimdeki her noktanın tarayıcıya göre üç boyutlu konumunu tam olarak tanımlar.

Pek çok durumda tek bir tarama objenin tam bir modelini oluşturmaz. Objenin tüm görünüşleri ile ilgili bilgi elde etmek için genelde pek çok yönden birden fazla tarama gerekir. Bu taramalar ortak bir referans sistemine getirilmek zorundadır ki bu işleme çakıştırma adı verilir ve ardında tam bir model oluşturmak

için birleştirilir. Tek bir aralık eşlemeden tüm modele kadar uzanan tüm bu proses 3D tarama adını alır.

3.2. Teknoloji

3 boyutlu tarayıcılar temaslı ve temassız olmak üzere iki tiptir. Temassız 3 boyutlu tarayıcılar da aktif tarayıcılar ve pasif tarayıcılar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Bu kategorilere tekabül eden muhtelif teknolojiler mevcuttur.

3.2.1. Temaslı

Temaslı 3 boyutlu tarayıcılar objeyi fiziksel dokunma ile inceler. Sözelimi CMM (Koordinat Ölçme Cihazı) temaslı 3 boyutlu tarayıcıya örnektir. Genellikle imalatla kullanılır ve çok hassas olabilir. Bununla beraber CMM'lerin dezavantajı taranacak obje ile temas zorunluluğudur. Bu nedenle objenin taranma işlemi objeyi değiştirebilir veya ona hasar verebilir. Bu husus tarihi eserler gibi narin veya değerli objelerin taranması esnasında ehemmiyet kazanır. CMM'lerin diğer dezavantajı da diğer tarama yöntemlerine kıyasla yavaş kalmalarıdır. Bunun monte edildiği kolu fiziksel olarak hareket ettirmek çok yavaş olabilir ve en hızlı CMM'ler birkaç yüz hertz değerinde çalışabilir. Aksine lazer tarayıcı gibi optik bir sistem 10 ila 500 kHz aralığında çalışabilir.

Bu kısma verilebilecek diğer örnekler ise bilgisayarlı animasyon endüstrisinde kilden modelleri sayısallaştırmakta kullanılan elle idare edilen dokunma problemleridir.

3.2.2. Aktif

Aktif tarayıcılar bir çeşit ışınım yayar ve bir objeyi veya ortamı incelemek için bu ışınımın yansımalarını tespit eder. Olası ışınım çeşitleri ışık, ultrason veya x-ışını olarak sayılabilir.

3.2.3. Uçuş Süreli

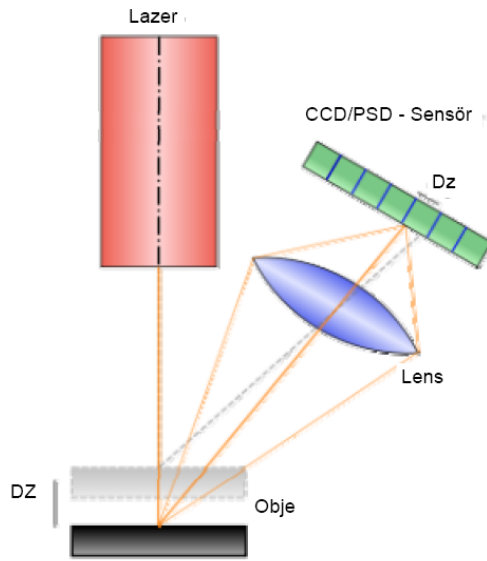
Uçuş süreli 3 boyutlu tarayıcı, objeyi incelemek için lazer ışınından faydalanan aktif bir tarayıcıdır. Bu çeşit tarayıcının temelinde uçuş süreli lazer menzil bulucusu yer alır. Lazer menzil bulucusu, bir ışın darbesinin bir tur zamanını hesaplayarak bir yüzeyin uzaklığını bulur. Lazer, ışın darbesi yaymak için kullanılır ve yansıtılan ışının bir detektör tarafından görülmesinden önce geçen süre hesaplanır. Işık hızı c bilindiğinden, tur zamanı tarayıcı ile yüzey arasındaki uzaklığın iki katı olan ışının gidip gelme uzaklığını belirler. Eğer tur zamanı t ile gösterilirse, bu durumda uzaklık $(c.t) / 2$ olarak hesaplanır. Uçuş süreli bir 3 boyutlu tarayıcının hassasiyeti, t süresini ne kadar kesinlikle ölçebildiğimize dayanır: ışının 1 santimetre mesafe kat etmesi için gereken süre 3.3 piko saniye (yaklaşık) olarak alınır.

Lazer menzil bulucusu sadece kendi görüş doğrultusundaki bir noktanın uzaklığını tespit eder. Bu sayede tarayıcı farklı noktaları taramak için menzil bulucusunun görüş doğrultusunu değiştirerek tüm görüş sahasını bir seferde bir nokta olacak biçimde tarar. Lazer menzil bulucusunun görüş doğrultusu hem menzil bulucunun kendisi döndürülerek hem de döner aynalardan oluşan bir sistem kullanılarak değiştirilebilir. Ayna metodu daha yaygın olarak kullanılır çünkü aynalar daha hafiftir ve böylece daha hızlı ve daha büyük hassasiyetle döndürülebilirler. Tipik uçuş süreli 3 boyutlu lazer tarayıcılar saniyede 10.000~100.000 nokta uzaklığını ölçebilir.

3.2.4. Üçgenleme

Üçgenleme 3 boyutlu lazer tarayıcı, ortamı incelemek için lazer ışınından faydalanan aktif bir tarayıcıdır. Uçuş süreli 3 boyutlu tarayıcılara göre üçgenleme lazer ışını objenin üzerine bir lazer ışını gönderir ve lazer noktasının konumuna bakmak için bir kameradan yararlanır. Lazerin yüzeye ne kadar uzakta çarptığına bağlı olarak lazer noktası kameranın görüş alanında farklı yerlerde görünür. Bu tekniğe üçgenleme adı verilir çünkü lazer noktası, kamera ve lazer yayıcısı bir üçgen teşkil eder. Üçgenin bir kenarının uzaklığı yani kamera ile lazer yayıcısı arasındaki uzaklık biliniyor. Lazer yayıcısının köşe açısı da bilinmektedir. Kamera köşesinin

açısı kameranın görüş alanından lazer noktasının konumuna bakılarak hesaplanabilir. Bu üç bilgi parçası üçgenin şeklini ve boyutunu tam olarak belirler ve üçgenin lazer noktası köşesinin konumunu verir. Pek çok durumda tek bir lazer noktası yerine bir lazer şeridi objeden geçirilerek veri alma prosesi prosesi hızlandırılır. Kanada Ulusal Araştırma Konseyi 1987’de üçgenleme tabanlı lazer tarama teknolojisini geliştiren ilk kuruluşlardan biridir. Aşağıda bir lazer üçgenleme sensörünün çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 3.1; Bir lazer üçgenleme sensörünün çalışma prensibi

3.2.5. Uçuş Süreli ve Üçgenleme Tarayıcılar ile İlgili Notlar

Uçuş süreli ve üçgenleme menzil bulucuların her birinin güçlü ve zayıf yönleri vardır ve bu yönler nedeniyle farklı uygulamalarda farklı kullanım alanlarına sahiptirler. Uçuş süreli menzil bulucuların avantajı, kilometre mertebesinde çok uzun mesafelerde çalışabilmeleridir. Bu tarayıcılar binalar veya coğrafik öğeler gibi büyük yapıların taranması için uygundur. Uçuş süreli menzil bulucuların dezavantajı hassasiyetleridir.

Işığın yüksek hızından dolayı tur süresini hesaplamak zordur ve uzaklık ölçümünün hassasiyeti milimetre mertebesinde düşüktür. Üçgenleme menzil bulucular bunun tam tersidir. Metre mertebesinde sınırlı menzile sahiptirler ancak

hassasiyetleri nispeten yüksektir. Üçgenleme menzil bulucuların hassasiyeti mikrometrenin on katı mertebesinde.

Saniyede 10.000 numune olacak şekilde düşük çözünürlüklü taramalar bir saniyeden daha kısa sürebilir fakat milyonlarca numune gerektiren yüksek çözünürlüklü taramalar bazı uçuş süreli tarayıcılarda dakikalarca sürebilir. Bunun oluşturacağı problem hareketten kaynaklanan distorsiyondur. Her bir nokta farklı bir sürede örneklendiği için objedeki veya tarayıcıdaki herhangi bir hareket toplanan verilerin bozulmasına neden olacaktır. Bu nedenle hem objenin hem de tarayıcının stabil platformların üzerine monte edilmesi ve titreşimin en aza indirilmesi gerekir. Bu tarayıcıları kullanarak hareketli objeleri taramak oldukça zordur.

Son olarak, düşük oranda titreşimden kaynaklanan distorsiyonu önlemek için araştırmalar yapılmaktadır.

3.2.6. Yapısal Işın

Yapısal ışın 3 boyutlu tarayıcılar objenin üzerine bir ışın modeli yansıtır ve objenin üzerindeki modelin deformasyonuna bakar. Model bir veya iki boyutlu olabilir. Tek boyutlu modele örnek bir doğrudur. Bir LCD projektör veya bir tarama lazeri kullanılarak doğru objenin üzerine yansıtılır. Model projektöründen hafifçe ötelenmiş bir kamera doğrunun şekline bakar ve doğrunun üzerindeki her noktanın uzaklığını hesaplamak için üçgenlemeye benzer bir teknik kullanılır. Tek doğrulu bir model durumunda bir seferde bir şeritlik uzaklık bilgisini toplamak için doğru görüş alanı boyunca taranır.

İki boyutlu bir modele örnek olarak bir ızgara veya bir doğru şerit modeli verilebilir. Modelin deformasyonunu kontrol etmek için bir kamera ve modeldeki her bir noktanın uzaklığını hesaplamak için bir derece kompleks bir algoritma kullanılır. Kompleksliğin nedeni belirsizliktir. Bir hedef boyunca yatay olarak tarayan bir dizi paralel dikey lazer şeridi düşünün. En basit durumda bir görüntü analiz edilebilir ve şeritlerin soldan sağa doğru dizilişlerinin dizideki lazerlerin sıralanışını yansıttığı varsayılabilir, böylece en soldaki görüntü şeridi ilk lazer, bir sonraki ikinci lazer, v.s.

şeklinde olacaktır. Deliklere, tıkanıklıklara ve ani derinlik değişimlerine sahip belirgin olmayan hedeflerde, şeritler genellikle gizli olduğundan ve sıraları değişiyormuş gibi görünebildiğinden bu sıralanma bozulur ve sonuçta lazer şeridinde belirsizlik oluşur. Bu özel problem son zamanlarda Çoklu Şeritli Lazer Üçgenleme (Multistripe Laser Triangulation-MLT) adı verilen bir teknoloji ile çözülmüştür. Yapısal ışın taraması halen pek çok araştırmacının her yıl üzerine makale yayınladıkları çok aktif bir çalışma konusudur.

Yapısal ışın 3 boyutlu tarayıcıların avantajı hızıdır. Bir seferde bir noktanın taranması yerine yapısal ışın tarayıcılar bir seferde birden fazla noktayı veya tüm görüş alanını tarar. Bu sayede hareketten kaynaklanan distorsiyon problemi azalır veya bertaraf edilir. Mevcut bazı sistemler hareketli objeleri gerçek zamanda tarayabilme kapasitesine sahiptir.

3.2.7. Modüle Edilmiş Işık

Modüle edilmiş ışık 3 boyutlu tarayıcılar objenin üzerine sürekli olarak değişen bir ışın verir. Genellikle ışık kaynağı genliğini sinüzoidal bir model olarak gösterir. Yansıtılmış ışığı bir kamera tespit eder ve modelin değiştirildiği miktar, ışının kat ettiği mesafeyi belirler.

3.2.8. Pasif

Pasif tarayıcılar kendi başlarına herhangi bir ışınım yaymazlar, çalışma prensipleri yansıtılmış ortam ışınımını tespit etmeye dayanır. Bu tipteki pek çok tarayıcı görünür ışığı tespit eder çünkü bu kolayca elde edilebilen ortam ışınımıdır. Kızılötesi gibi diğer tip ışınım da kullanılabilir. Pasif yöntemler çok ucuz olabilir çünkü pek çok durumda özel bir donanıma gereksinim duymazlar.

3.2.9. Stereoskopik

Stereoskopik sistemler genellikle birbirinden bir miktar uzakta, aynı ekrana bakan iki video kamera kullanır. Bu siluetler objenin görsel gövdesini oluşturmak için çekilir ve kesiştirilir. Bu tip tekniklerle bir objenin içbükeylikleri tespit edilemez.

3.2.10. Kullanıcı Destekli (Görüntüye Dayanan Modelleme)

Bazı özelliklerin kullanıcı destekli tespiti ve tanımlanmasına dayalı olan ve bir objenin farklı görüntülerinden objenin yaklaşık olarak kendisinin oluşturulabildiği başka metotlar da vardır. Bu tip teknikler binalar gibi basit şekilli objelerin seri bir şekilde modellerinin oluşturulmasında oldukça kullanışlıdır. iModeller, D-Sculptor veya RealViz-ImageModeler gibi muhtelif ticari paketler de vardır.

3.2.11. Rekonstrüksiyon

3 boyutlu tarayıcı ile oluşturulan nokta bulutları genellikle doğrudan kullanılmaz. Pek çok uygulama nokta bulutları yerine poligonal 3 boyutlu modelleri kullanır. Bir nokta bulutunu poligonal bir 3 boyutlu modele dönüştürme prosesine rekonstrüksiyon adı verilir. Rekonstrüksiyon, kesintisiz bir yüzey oluşturmak için komşu noktaları bulma ve birbirine bağlama işlemlerini içerir. Bunun için pek çok algoritma mevcuttur.

3.13. Uygulamalar

3.13.1. Malzeme İşleme ve Üretimi

Lazer tarama, yüzeyin lazer teknolojisi ile örneklendiği veya tarandığı bir yöntemdir. Temelde kullanılan lazerlerin gücü açısından ve tarama prosesinin sonucunda bakımından farklılık gösteren pek çok uygulama alanı vardır. Taranan yüzeye nüfuz edilmesine gerek olmadığında düşük güçlü lazerler kullanılır. Aynı

odaklı veya 3 boyutlu lazer tarama, taranan yüzey ile ilgili bilgi almak için kullanılan yöntemlerdir.

Lazerin gücüne bağlı olarak çalışma parçası üzerindeki etkisi de farklılık gösterir: malzemenin lazerle kısmen çıkarıldığı lazerle oyma için düşük güç değerleri kullanılır. Daha yüksek güçlerde malzeme akışkan hale gelir ve lazerle kaynak gerçekleştirilebilir veya güç malzemeyi tamamen çıkaracak kadar yüksekse lazerle kesme yapılabilir.

Hızlı prototipleme için de sözelimi bir prototip lazer sinterleme ile oluşturulduğu zaman bir lazer tarama prosedürü kullanılır.

Tüm bu uygulamalar için kullanılan prensip aynıdır: kişisel bir bilgisayarda veya ankastre bir sistemde çalışan ve bir tarayıcı kart ile bağlanarak tüm prosesi kontrol eden bir yazılım. Bu kart tarama kafasına gönderilen alınan vektör verilerini hareket bilgisine dönüştürür. Bu tarama kafası lazer ışığını bir seviyeye (X ve Y koordinatları) saptıran iki adet aynadan ibarettir. Üçüncü boyut – gerekliyse – lazerin odak noktasını derinlik yönünde (Z-ekseni) hareket ettirebilen spesifik bir optik ile gerçekleştirilir.

Üçüncü boyuta, lazerin malzemeye spesifik konumlarda etki etmesi gerektiği objenin tabaka tabaka oluşturulduğu hızlı prototipleme gibi bazı özel uygulamalarda ihtiyaç duyulur.

Daha gelişmiş lazer tarama uygulamaları ve/veya üretim esnasında yüksek malzeme çıkışı için birden fazla tarama kafasına sahip tarama sistemleri kullanılır. Burada yazılım, böyle bir çoklu kafa uygulaması dahilinde tam olarak neyin yapıldığını kontrol etmek durumundadır.

3.13.2. Endüstriyel Lazer Tarayıcı Parçalarının Üreticileri

SCAPS Tarayıcı Uygulama Yazılımı – 2 ve 3 boyutlu lazer tarayıcı sistemlerinin kontrolü için yazılım

USC-1 Tarayıcı Kartı – USB tarayıcı kartı

Scanlab RTC3 / RTC4 Tarayıcı kartı – PCI Tarayıcı kartları

Nutfield Tarama kafaları – Lazer tarama sistemleri için tarama kafaları

3.13.3. Eğlence

3 boyutlu tarayıcılar, hem sinema hem de video oyunları için dijital 3 boyutlu modeller oluşturmak için eğlence endüstrisi tarafından da kullanılır. Bir modelin gerçek dünyada eşdeğeri mevcutsa gerçek objeyi taramak 3 boyutlu modelleme yazılımı kullanarak bir model oluşturmaktan çok daha hızlıdır. Genellikle sanatçılar istedikleri fiziksel modelleri yontarak oluşturur ve bunları doğrudan bir bilgisayarda dijital modeller oluşturmaktansa dijital form oluşacak şekilde tararlar.

3.13.4. Tersine Mühendislik

Mekanik bir parçanın tersine mühendisliği yeniden oluşturulacak objelerin tam bir dijital modelini gerektirir. Modeli elde etmek için 3 boyutlu bir tarayıcı, genellikle bir koordinat ölçme makinesi kullanılabilir.

3.13.5. Kültürel Miras

Tarihi mekanların ve eserlerin taranması ile ilgili pek çok araştırma projesi yapılmıştır.

3.2. 3D Optik Taramanın Temel Prensibi

3.2.1. Optik Üçgenleme

Fotoğraf çekme, en geniş anlamıyla 3 boyutlu dünyayı 2 boyutlu resimlere dönüştürme işlemidir. Ne yazık ki bu dönüşüm işlemi tamamen yapmak olası değildir. Derinlik gibi bazı bilgilerin kaybolması söz konusudur. 3 boyutlu tarama

işlemi yukarıdaki dönüşüm işleminin tersi olarak düşünülebilir. 2 boyutlu fotoğraflar yardımı ile 3 boyutlu görüntü elde edilmesi işlemidir. Fotoğraflama işleminde bazı bilgilerin kaybolmasından dolayı 3 boyutlu görüntü oluşturmak için birden fazla çekim yapmak gereklidir. Bu şekilde daha fazla bilgi edinilerek işlem daha iyi hale getirilir. 3D optik taramada kullanılan hem fotogrametri hem de topogrametri yöntemleri 3 boyutlu cisimlerin 2 boyutlu fotoğraflarının çekilmesi ve bu fotoğrafların bilgisayar ortamında tekrar 3 boyutlu hale döndürülmesi işlemini gerçekleştirir.

3 boyutlu topogrametrik ölçüm 3'ncü boyutta görüntü işlemede fotogrametri ve stereometri kadar iyi bir yöntemdir. Tüm teknikler optik üçgenleme (optical triangulation) prensibini temel alır. Kelime anlamı belli sayıda noktanın konumunu kesin olarak tespit edebilmek için, bu noktaları tepe olarak kabul ederek bir alanı üçgenlere bölme işi olan "üçgenleme (triangulation)" tüm 3 boyutlu ölçme/tarama tekniklerinin kullandığı yöntemdir. Çok çeşitli uygulamaları olan üçgenleme prensibi haritacılıktan GPS ile konum belirlemeye kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu prensiple, matematiksel olarak uzayda kesişen doğruların yardımı ile noktanın bulunduğu yer hassas olarak elde edilir.

3 boyutlu taramada, cisim, bir veya daha fazla kamera ile 2 boyutta taranır. Sonra 3 boyutlu koordinat sistemine aktarılır. Bilgisayar yardımı ile cismin referansları veya yüzeylerinin ve formlarının nokta bulutu şeklinde ölçümlendirilmesi mümkündür. Optik ölçüm (metrology) aktif ve pasif metodlar olmak üzere farklılık gösterir.

Aktif metodlar:

- Optik üçgenleme (Optical Triangulation) (1D)
- Işık kesiti (light section) teknikleri (2D)
- Fringe izdüşümü (fringe projection) teknikleri (3D)

Optik üçgenleme (Optical Triangulation): Bir lazer pointer ve optik dedektör üçgensel bir yapıda düzenlenir, sonuç olarak üçgensel dayanak noktası olarak

adlandırılan, üzerine lazerle ışık düşürülen noktanın uzaklığı dedektör tarafından belirlenir.

Işık kesiti (light section) teknikleri: Işık kesiti tekniği, optik üçgenlemenin geliştirilmiş halidir. Bu teknikte cismin üzerine düşürülen bir çizgi ve optik detektör yardımı ile cismin 3 boyutlu profili düzlemde elde edilir.

Fringe izdüşümü (fringe projection, saçak izdüşümü) teknikleri: Fringe izdüşümü tekniği ışık kesiti tekniğinin gelişmiş halidir. Bu yöntemde çoklu ışık kesitleri başka bir deyişle siyah ve beyaz şeritler halindeki desenler cismin yüzeyine düşürülerek ve bir yada daha fazla yüksek çözünürlükteki kamera yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılarak 3 boyutlu yüzey bilgisi elde edilir.

Pasif metodlar:

- Stereometri (3D)
- Fotogrametri (3D)

Stereometri: Ölçümü yapılacak olan cismin yüzeyi üzerine herhangi bir ışık kesiti (fringe) düşürülmez. Bunun yerine cismin 3 boyutlu yüzeyi, iki kameradan alınan üst üste binen görüntülerden hesaplanarak elde edilir.

Fotogrametri: Bu yöntemde taranan obje bir kamera ile farklı açılardan görüntülenip üzerindeki belirleyici işaretler yardımı ile referansları bilgisayar ortamında 3 boyutlu nokta bulutu halinde elde edilir.

3.2.2. 3D Tarama Sisteminde Topogrametri

3 boyutlu optik ölçüm tekniklerinde topogrametrik metodun yapılı aydınlatma tekniği esnekliği ve güvenilirliği bakımından göze çarpmaktadır. Bu tekniğin avantajları Breuckmann firmasının 3 boyutlu tarama sistemlerinde maksimum düzeyde görülmektedir. Bu sistemler Gri kod ve faz kaydırma metodu ile birleştirilmiş patentli MPT (Miniature Projection Technique))Minyatür Projeksiyon

Tekniği) tekniğini kullanarak yüksek çözünürlük ve ölçüm hassasiyetini, hızlı veri edinme, esnek veri analizini en iyi şekilde sağlamaktadır.

3.2.2.1. Metot

Topogrametrik 3D sistemi, güçlü bir ışık kaynağı ile cismin üzerine farklı dokusal özellikleri olan fringe'ler düşürür. Cismin yüzeyi üzerinde bu kodlanmış yapıları ışıklar, cismin şeklinin karakteristik özellikleri doğrultusunda deformasyona uğrar. Yüksek çözünürlükteki bir kamera sistemi ile bu deformasyon bilgileri alınır. Bu kamera sistemi, projeksiyon sistemi ile özel bir açı yapacak şekilde yönlendirilmiştir. Bu açıya üçgenleme (triangulation) açısı denir. Cismin üzerine düşürülen fringe'lerin deformasyon bilgileri analiz edilerek 1 milyona kadar noktanın 3D koordinatları birkaç saniye içerisinde elde edilmiş olur. Kullanılan sensor sistemine bağlı olarak birkaç milimetreden birkaç metreye kadar olan objeler bir ölçümde sayısallaştırılabilmektedir.

3.2.2.2. Standart optoTop Sistemi ve Sensorün Geometrik Düzenlemesi

Gri kod metodunda bir dizi ikili kodlanmış ışık kesiti demeti cisim üzerine düşürülür. Düşürülen bu ışık dizisi şablonu sayesinde her görüş pozisyonu için Gri kod bilgisi üretilir. Sonuç olarak her bir görüntü pozisyonunun ışık demeti düzeni açık bir şekilde elde edilmiş olur. Faz kaydırma, 3 boyutlu pozisyonların yerel olarak hesaplanmasında kullanılan standart bir yöntemdir. Cisim üzerine sinüzoidal ışın kesiti demetleri düşürülür. Faz kaydırma metodu ile yalnızca yerel nokta pozisyonları elde edilmez. Ayrıca ışık kesitlerinin kontrast bilgileri de elde edilir ki bu bilgi ölçüm verisinin kalitesinin bir göstergesidir. Gri kod ve faz kaydırma metodunun birleştirilmesi ile yüksek doğruluk ve güvenilir ışık kesiti (fringe) analizi garantilenmiş olur.

3.2.2.3. Projektör ve Izgara Levhası

MPT tekniğindeki gri kod ve faz kaydırma yaptıracak ızgaralar projektördeki ince bir cam levhaya üzerinde basılı bulunmaktadır. Bu levhanın yukarı aşağı ve sağa sola hareketi ile taraması yapılacak yüzey üzerine gri kodlanmış ızgara yapılı ışık demeti ve faz kaydırma metodu için gerekli ışık demetleri gönderilir. Bu şekilde ızgaraların faz hatası 0.5 μm olmaktadır. Bu şekildeki birleşik yapı sayesinde gri kod ve faz bilgisi ayrı bir cihaza gerek duymaksızın elde edilmiş olur.

3.3. 3D Tarama Sistemleri ve Kullanım Alanları

3.3.1. 3D Sayısallaştırma Sistemleri

3D sayısallaştırma/tarama sistemleri iki ana gruba ayrılır: dokunmalı ve dokunmasız sistemler. Dokunmalı yada diğer adıyla problu sistemler, mekanik kollu sistemler ve CMM'dir. Birkaç eksenli mekanik kolun ucuna takılmış bir ölçüm probu sayesinde koordinatları istenen noktaya dokundurulan prob ile noktanın koordinatları hassas biçimde ölçülür. Bu sistemlerle yüzey bilgisi değil istenen belirli sayıda noktanın koordinatları elde edilebilmektedir.

Dokunmasız optik sistemlerle serbest şekilli yüzey bilgisi elde edilmesi hem ürün geliştirme, tersine mühendislik ve kalite kontrol işlemleri üzerine uzmanlaşmış mühendislik ofisleri, hem de büyük endüstri kuruluşlarının tasarım ve ürün geliştirme, kalite kontrol, kalıp hane v.s. gibi departmanlar için önem arz etmektedir. Bu sistemlerle tüm yüzey formu çok yüksek hassasiyetle elde edilmekte ve CAD modelinin oluşturulması, hızlı prototipleme ve CNC'de işlenme işlemlerine hazır hale gelmektedir.

Dokunmasız sistemlerin çok çeşitli tipleri ve her birinin farklı kullanım alanları olmakla birlikte lazer çizgili sistemler ve yapılı ışık desenli (ızgara projeksiyonu, saçak) sistemler yada topogrametrik sistemler kullanımı diğerlerine göre daha yaygın olanlardır.

Dokunmasız optik tarama sistemlerinden lazer çizgili sistemler cismin üzerine bir lazer kesiti düşürülmesi ve bu kesitin cismin üzerinde hareket ettirilmesi prensibi ile çalışırlar. Ölçüm yöntemi lazer kesitinin cisim üzerinde deformasyona uğraması ve bu deformasyon bilgisinin CCD dijital kamera vasıtası ile alınması şeklindedir. Portatif modeller olduğu gibi mekanik kol ucuna bağlananları da vardır. Ayrıca robot koluna bağlanarak ölçüm otomatik hale de getirilebilir. Bu sistemlere bir örnek Steinbichler T-SCAN olarak verilebilir. Portatif bir sistem olmasından ötürü sayısallaştırılacak ürünler kendi ortamlarında taranabilmektedir. Böylelikle zaman alan tarama öncesi hazırlıklar bertaraf edilmiş olur. Deneyimsiz kişilerin bile kullanabileceği bu sistem ile boya fırçası ile boya yapar gibi hareket ettirilerek tarama yapılmakta ve tarama esnasında monitörden gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. 90 mm'lik tarama genişliği ile büyük cisimlerin taranmasına imkan tanımaktadır. Şekil 3.2'de Steinbichler T-SCAN lazer kesitli tarama sistemi verilmiştir; Şekil 3.3'de ise Steinbichler COMET IV tek kameralı optik tarama sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2; Steinbichler T-SCAN lazer kesitli tarama sistemi



Şekil 3.3; Steinbichler COMET IV tek kameralı optik tarama sistemi

Dokunmasız optik tarama sistemlerinden yapıları ışık desenli 3D optik tarama sistemlerinin değişik tasarım tipleri mevcuttur. Tek kameralı, çift kameralı, asimetrik çift kameralı sistemler gibi. Tüm bu sistemlerde güçlü bir ışık kaynağı ile cismin üzerine farklı dokusal özellikleri olan saçaklar düşürülür. Cismin yüzeyi üzerinde bu kodlanmış yapıları ışıklar cismin şeklinin karakteristik özelliklerine göre deformasyona uğrar. Projeksiyon sistemi ile özel bir açı yapacak şekilde yönlendirilmiş yüksek çözünürlükteki bir kamera sistemi ile bu deformasyon bilgileri alınıp nokta bulutu oluşturulur. Bu sistemler sayesinde çok sayıda noktanın ($\sim 1.000.000$) koordinatı çok kısa zamanda (~ 1 s) ölçülür. Böylelikle cismin yüzey formu bilgisini içeren nokta bulutu oluşturulmuş olur. Bundan sonra bir tersine mühendislik uygulaması olan nokta bulutundan CAD modelleme işlemi mümkün olmaktadır.

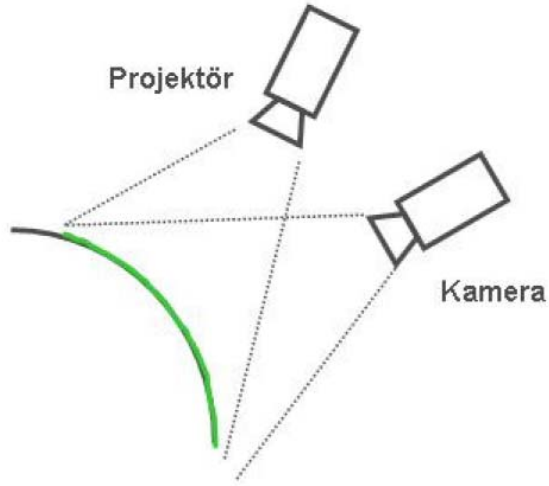
Tek kameralı sistemlerde bir projeksiyon cihazı ve 1 CCD dijital kamera aralarında belli bir açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu açıya üçgenleme açısı adı verilir. Bu açı sayesinde noktaların koordinatları trigonometrik hesaplarla elde edilir. Breuckmann ve Steinbichler sistemleri tek kameralı yüksek teknolojiye sahip sistemler olup uygulama alanına göre farklı görüş alanlarına sahip lensler sunarak değişik ebattaki cisimlerin sayısallaştırılmasını mümkün kılmaktadır.

Çift kameralı sistemlerde ortada bulunan projeksiyon cihazı ile eşit veya farklı açı yapacak şekilde konumlandırılmış 2 CCD kamera bulunmaktadır. İki kameranın da ortak olarak gördüğü bölge esas ölçüm bölgesidir. Breuckmann firmasının geliştirdiği asimetrik çift kameralı sistem (STEREOSCAN) ise ortada bulunan projeksiyon cihazı ile farklı iki açı yapacak şekilde konumlandırılmış 2 CCD kamera bulunur. Bu asimetrik tasarım ile 3 tane üçgenleme açısı elde edilmiş olup detayların daha hassas ölçülmesi ve görüş kapasitesinin artırılması garanti edilmiş olur.

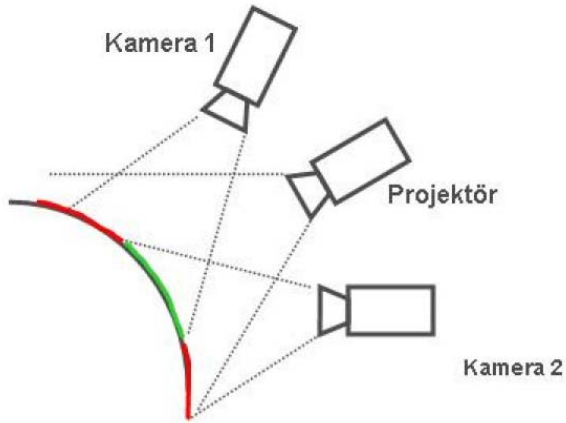
3.3.2. Kullanım Alanları

Üreticinin bir parçayı uzun zamandır üretmemesi ve tekrar üretmek istemesi, orijinal tasarımın yetersiz dokümantasyona sahip olması, bir ürünün orijinal üreticisinin artık bulunmaması fakat müşterilerin bu ürüne ihtiyacının olması, ürünün orijinal dokümantasyonunun kaybolması veya hiç var olmamış olması, ürünün bazı kötü özelliklerinin yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulması, ürünün uzun süreli kullanımına dayanarak ürüne ait iyi özelliklerin ölçülendirilmesi, rakip ürünün iyi ve kötü özelliklerinin analiz edilmesi, ürünün performansını ve özelliklerini geliştirmede sonuca götürecek yeni yolların keşfedilmesi, rakip ürünlerin anlaşılması ve daha iyi ürünlerin geliştirilmesinde rekabete dayalı karşılaştırma yöntemlerinin elde edilmesi, orijinal CAD modelinin değişikliklere yada güncel üretim yöntemleri için yeterli olmaması, orijinal üretici firmanın parça sağlamada aşırı ücret talep etmesi, modası geçmiş parçaların yada eski üretim işlemlerinin bugünkü ve daha ucuz teknolojilerle güncellenmesi gibi istek ve sorunlara geriye dönük mühendislik çözüm getirmektedir. Bu proseslerin çözüme kavuşturulması aşamasında bir teknolojik kolaylık olarak sayısallaştırma sistemleri kullanılmaktadır. Parça bu sistemler vasıtası ile sayısallaştırılmakta ve CAD modeli oluşturulmaya hazır hale

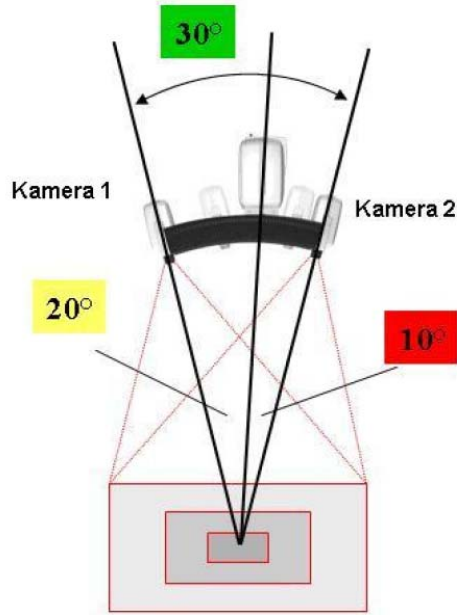
getirilebilmektedir. Şekil 3.4’de tek, Şekil 3.5’de çift ve Şekil 3.6’da ise asimetrik yerleştirilmiş çift kameralı sistem gösterilmektedir. Şekil 3.7’de ise Breuckmann STEREOSCAN verilmiştir.



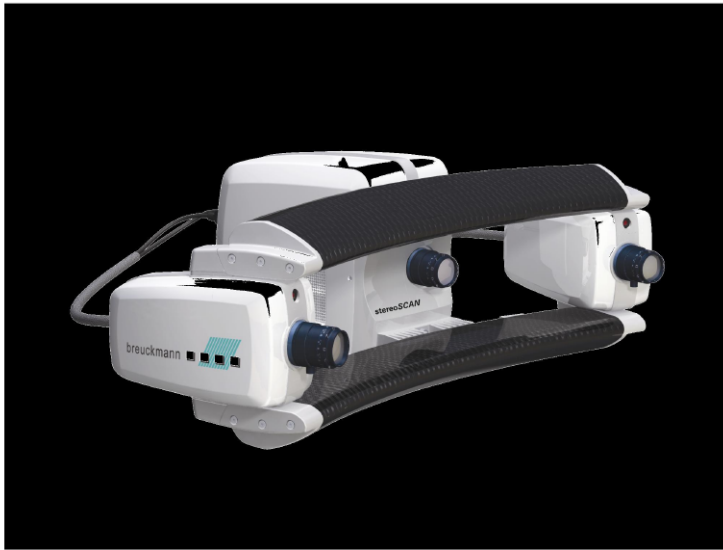
Şekil 3.4; Tek kameralı sistem



Şekil 3.5; Çift kameralı sistem



Şekil 3.6; Asimetrik yerleştirilmiş çift kameralı sistem (Breuckmann STEREOSCAN)



Şekil 3.7; Breuckmann STEREOSCAN

3.4. 3D Optik Tarama Sistemleri Nasıl Çalışır

3 boyutlu optik tarama sistemleri iki ana prensip ile çalışmaktadır. Bunlar fotogrametri ve topogrametri prensipleridir. Fotogrametri prensibine dayanan ölçüm

sistemleri ile büyük cisimler ve bunların referansları ölçülebilmektedir. Topogrametri prensibine dayanan ölçüm sistemleri ise parçaların yüzeylerinin ve formlarının nokta bulutu şeklinde ölçümlendirilebilmesidir.

3.4.1. Fotogrametri

Fotogrametri prensibi uygulaması ile yapılacak ölçümlerde 3 boyutlu ölçüm yapabilen dijital kameralı bir sistem kullanılmaktadır. Parça, kalıp, aparat, fikstür veya montajlı nihai ürün, şekil ve büyüklük ayırımı yapmaksızın farklı açılardan taranır. Elde edilen 2 boyutlu veriler gerçek zamanlı olarak yada sonradan bilgisayar ortamına aktarılır. Bu veriler çok yüksek performans gerektirmeyen standart bir bilgisayarda işlenerek 3 boyutlu ölçüm sonuçları elde edilir.

Kısaca fotogrametri yöntemi ürünün üstüne ve/veya çevresine “indeks işareti” adı verilen işaretler yapıştırılarak bu işaretlerin 3 boyutlu verilerinin ölçülmesidir. Bu işlemi yapabilmek için bazı ölçü skalaları kullanılır. Bu skalalar hassas olarak (0.002 mm) kalibrasyonu yapılmış çubuk demetlerinden oluşmaktadır. Kalibrasyonu uluslar arası kalite sistemlerine göre izlenebilirliği (doğrulanabilirliği) denetlenebilen bu tip sistemler ile yapılan ölçümler kalite kontrol bölümlerince kabul edilen ölçüm sistemleri arasına girmektedir. Elde edilen sonuçlar CMM cihazı ile yapılacak olan ölçümler ile aynı kalitede olup çok daha süratli bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu sistemlerin en önemli avantajlarından biri taşınabilir olmalarından dolayı istenilen yerlerde ölçüm yapabilme olanağı sağlaması ve diğeri de taraması yapılacak parçanın büyüklüğü ile ilgili herhangi bir fiziksel sınır olmamasıdır.

3.4.2. Ana Kullanım Alanları

- 3 boyutlu tarama sistemlerine referans hazırlanması
- Deformasyon analizi
- Çarpma ve çekme analizi
- Çap, eğrisellik gibi geometrik ölçümler

3.4.3. Topogrametri

Topogrametri prensibi ile ölçüm yapan sistemler dijital kamera ve projektörden oluşur. Bu sistem ile taraması yapılacak olan parçanın üzerine değişik faz açılarına karşılık gelen çizgiler düşürülerek parçanın 3 boyutlu geometrisini ölçülür. Bu metot ile elde edilen veriler nokta bulutu formatında olup genellikle formlu yüzeylerin ölçülmesinde tercih edilir. Ürün, parça, kalıp, aparat ve fiktür gibi çok farklı cisimlerin ölçülendirilmesinde kullanılmaktadır.

İstenilen hassasiyete ve ürünün büyüklüğüne göre değişik görüş alanları kullanılarak ölçümler yapılır. Sistem üzerinde kullanılan dijital kameranın 1.3, 4 veya 6 mega piksel olarak değişik çözünürlükleri mevcuttur. 4 veya 6 mega piksel kameralar çoğunlukla küçük veya aşırı kompleks parçaların ölçülmesinde tercih edilmektedir.

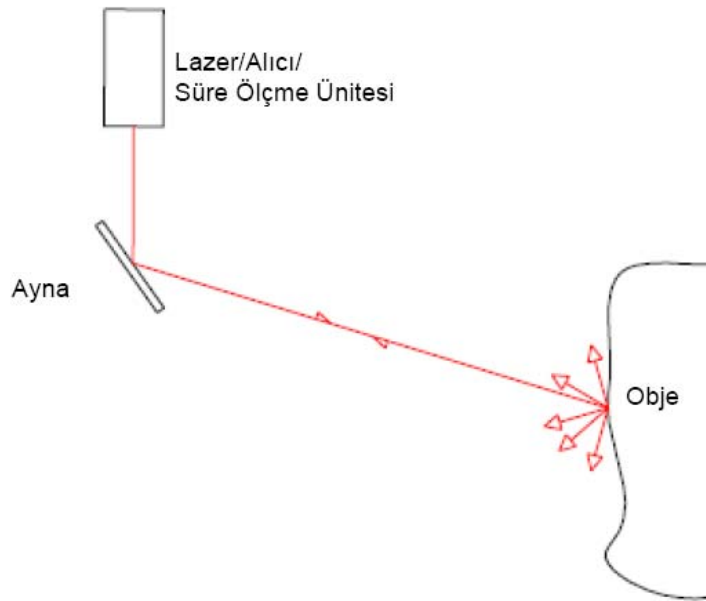
3.5. 3D Tarama Cihazları Çeşitleri ve Çalışma Prensipleri

3.5.1. Menzil Tarayıcılar

Bir lazer pulsunun uçuş süresi: Objeye bir lazer pulsu gönderilir ve sinyalin iletilmesi ve alınması arasındaki dolaşım süresi yardımıyla iletilen ile yansıtan yüzey arasındaki mesafe ölçülür. Bu prensip, elektronik takometrelerden hatırlanabilir. Gerçekte motor tahrikli eksenli bir takometre bir tarama cihazı olarak kullanılmak üzere programlanabilir. Cihazın kütlesinden dolayı ölçüm hızları çok düşük olabilir, eksen etrafındaki aşamalı rotasyon kademeleri yeterince hızlı yerine getirilemeyebilir, sinyal işleme genellikle çok uzun bir süre alır ve açısal değerlerin kodlanmış dairelerden okunması sorun teşkil edebilir. Tarayıcılar lazer ışınının açısal sapması için dönel küçük cihazlar kullanır (en azından iki açıdan biri için) ve yetersiz hassasiyet değerlerine neden olabilen menzil hesaplaması için daha basit algoritmalarından faydalanır. Uçuş süreli tarayıcılar ile menzil ölçümlerinin tipik standart sapmaları birkaç milimetre mertebesinde. Menziller nispeten kısa olduğu

için bu hassasiyet tüm obje boşluğu için yaklaşık olarak aynıdır. 3 boyutlu hassasiyet ışının açısal yöneliminin hassasiyeti tarafından da etkilenir.

Faz karşılaştırma yöntemi: Bu yöntem takometrik cihazlardan da iyi bilinir. Bu durumda iletilen ışın armonik bir dalga tarafından değiştirilir ve mesafe iletilen ve alınan dalga arasındaki faz farkı kullanılarak mesafe hesaplanır. Kullanıcının bakışı açısından, yöntem uçuş süresi yönteminden çok da farklı değildir. Daha komplike sinyal analizlerinden dolayı sonuçlar daha hassas olabilir (ölçüm hızına göre). İyi tanımlanmış bir dönüş sinyaline gereksinim olduğundan, faz karşılaştırma yöntemini kullanan tarayıcılar indirgenmiş bir menzile sahip olabilir ve daha fazla sayıda hatalı nokta oluşturma eğilimindedir. Aşağıda uçuş süreli prensibi gösterilmiştir.

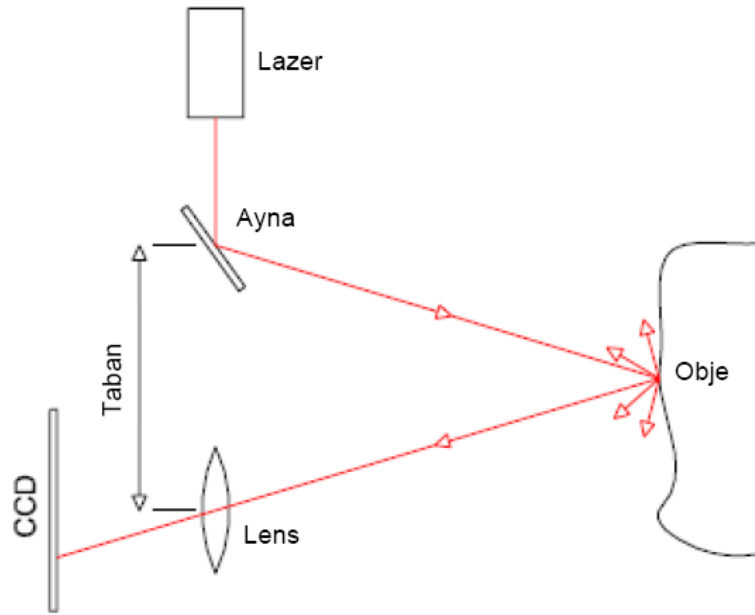


Şekil 3.8; Uçuş süreli prensibi

3.5.2. Üçgenleme Tarayıcılar

Tek kameralı çözüm: Bu tip tarayıcı tanımlı, adım adım değişen açıyla mekanik bir desteğin bir ucundan objenin üzerine bir lazer ışını gönderen bir iletim cihazı ve bu desteğin diğer ucunda da objenin üzerindeki lazer noktasını (veya çizgisini) tespit eden bir CCD kameradan oluşur. Yansıtan yüzey elemanının 3

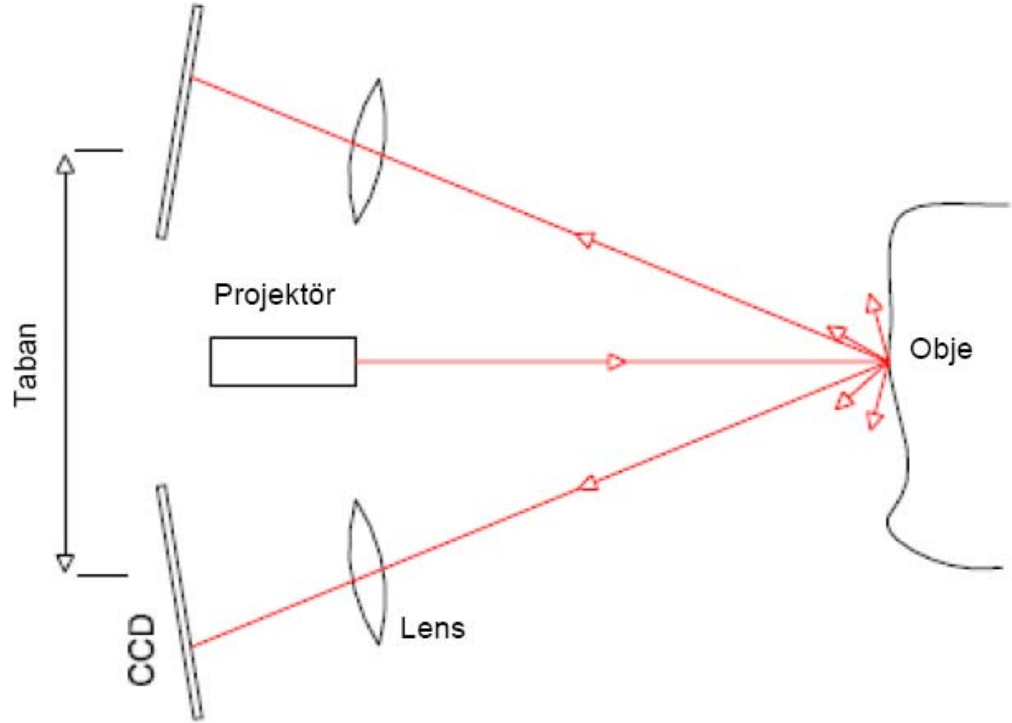
boyutlu konumu sonuç üçgeninden çıkarılabilir. Bu prensip, sabit destekli telemetrelerin kullanıldığı araştırmaların seleflerine sahiptir. Buradan cihaz ile obje arasındaki mesafenin hassasiyetinin, bu mesafenin karesi ile azalacağı da iyi bilinmektedir. Açıkça, tatbiki nedenlerden dolayı destek uzunluğu isteğe göre arttırılamaz. Bununla beraber, bu cihazlar menzil tarayıcılarından çok daha hassas oldukları kısa mesafeler ve küçük objeler için önemli bir rol oynarlar. Şekil 3.9’da tek kameralı çözüm şeklinde üçgenleme prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.9; Üçgenleme prensibi: Tek kameralı çözüm

Çift kameralı çözüm: Üçgenleme prensibinin bir başka kullanım çeşidi de her biri desteğin bir ucunda olacak şekilde iki CCD kameranın kullanılmasıdır. Tespit edilecek nokta veya model herhangi bir ölçme fonksiyonu olmayan ayrı bir ışık projektörü ile oluşturulur. Daha geniş bir çözüm yelpazesi de mevcuttur. Projeksiyon hareketli şerit modellerin hareketli ışık noktasını veya çizgisini veya statik bir keyfi modeli içerebilir. Geometrik çözüm, tek kamera prensibi ile aynıdır ve bu sayede aynı hassasiyet karakteristikleri ile sonuçlanır. İki kamera kullanan tüm cihazlar yüksek nokta oranları sunmaz ve hepsi gerçek zamanda 3 boyutlu koordinat oluşturamaz. Şayet yüksek nokta oranları ve gerçek zaman işleme sağlanırsa bu cihazlar yukarıda belirtilen tarama cihazlarına bir alternatif olarak kullanılabilir ve

belirli koşullar altında 3 boyutlu tarayıcı olarak düşünülebilir. Şekil 3.10'da ise üç kameralı çözüm şeklinde üçgenleme prensibi anlatılmıştır.

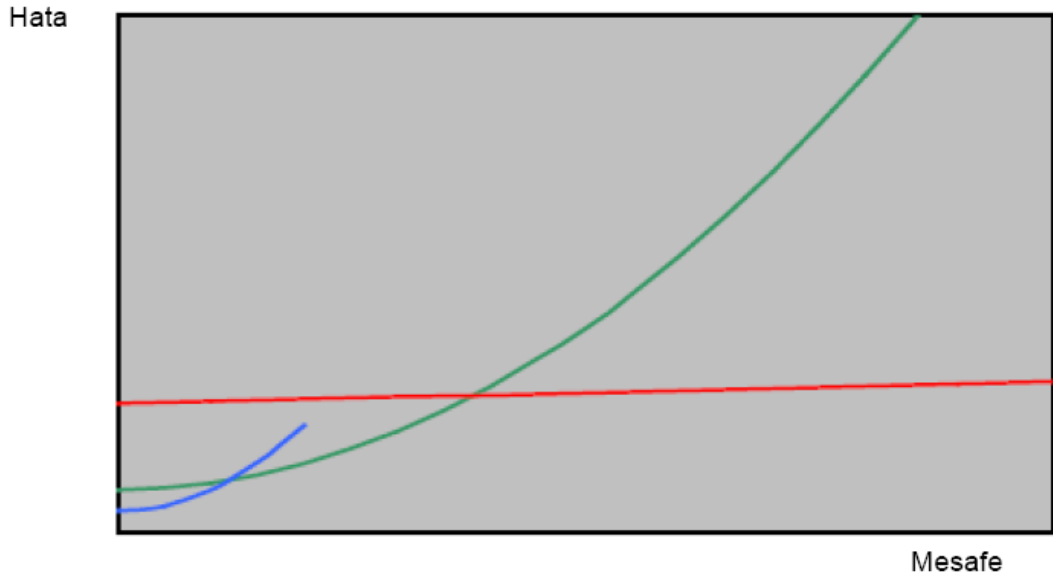


Şekil 3.10; Üçgenleme prensibi: Üç kameralı çözüm

3.5.3. Hassasiyet

Hassasiyet, kültürel miras dokümantasyonunda her zaman önce gelen bir nokta değildir. Tek bir taranmış yüzey noktası için birkaç milimetrelik standart bir sapma, şayet bu nokta düzgün bir geometriyi (düzlem, silindir veya benzeri) işleyen bir elemanın parçası ise ve bu elemanı bir CAD gösteriminde tanımlayan parametreleri bulmak için kullanılıyorsa o kadar önemli değildir. Eğer düzgün olmayan yüzeyler modellenecekse (genellikle bir ağ gözü gösterimi ile) bilhassa kenarların varlığı tüm tesviye işlemlerine izin vermiyorsa karışık nokta bulutları işleme esnasında bir sorun oluşturabilir. Bu nedenle tarama prosedürü belirli bir objenin boyutu ve menzili için uygun olan en hassas tarayıcı ile yapılmalıdır.

Kültürel miras dokümantasyonunda pek çok farklı boyuttan objeler söz konusu olduğundan, tüm işler için gerçekte tek bir tarayıcı önerilemez. Bunun yerine 0.1 ila 1 m, 1 ila 10 m ve 10 ila 100 m aralıklarını kapsayan üç farklı tarayıcı tercih edilmelidir. 1 metrenin altında büyük bir tarayıcı yelpazesi mevcuttur; 0.1 mm ve altında tek bir nokta hassasiyeti beklenebilir. 1 ila 10 metre aralığındaki orta menziller için MENSİ S10 ve S25 üçgenleme tarayıcıları halihazırda optimum seçenek olarak görünmektedir (S25 modelinde 2m için 0.5 mm, 10 m için 2 mm). Daha büyük mesafeler için mümkün olan maksimum menzillerine bağlı olarak birkaç milimetre ile birkaç santimetre arasında bir hassasiyet veren iyi bir cihaz seçeneği yelpazesi mevcuttur. Şekil 3.11’de tarayıcı hassasiyeti grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11; Tarayıcı hassasiyeti (Küçük parabol: Kısa tabanlı üçgenleme tarayıcı. Büyük parabol: Uzun tabanlı üçgenleme tarayıcı. Düz çizgi: Menzilleme tarayıcı)

3.5.4. Ek Bilgiler

3.5.4.1. Genel

Araştırmacılar ölçüm cihazlarını kıyaslarken hassasiyeti baskın bir nokta olarak görme eğiliminde olsalar da tatbiki kullanımda belirli proje ön koşulları altında kesin olabilecek diğer karakteristikler de mevcuttur. Bu durum kültürel miras

çakıştırma projeleri için 3 boyutlu tarama ekipmanının uygunluğu konusu için de geçerlidir.

3.5.4.2. Hız

Yüksek veri elde etme oranlarına rağmen, yüksek obje çözünürlüğü için yüksek nokta yoğunluklarına ihtiyaç duyulduğunda tarama işlemi fazla zaman alan prosesler olabilir. Saniyede 100 nokta halen yavaş bir oran olarak düşünülebilir. Saniyede 1000 nokta pek çok durumda tatmin edici olarak kabul edilebilir. Bununla beraber, gereken ilave zaman (mesela farklı gözlemleme noktaları arasında nakliye, tarama prosesini hazırlama ve kontrol noktası ölçümü için) hızlandırılmayacağı ve bu nedenle tüm çalışma zamanı oranını arttıracığı için aynı projenin 10 kat daha hızlı tamamlanacağı sonucu çıkarılmamalıdır. Aynı nedenden dolayı her saniye on ila bin ölçüm takviyesi gerçekte büyük bir gelişme anlamına gelmez.

3.5.4.3. Çözünürlük ve Nokta Boyutu

Obje çözünürlüğü teorik olarak ölçüm ışınının açısal artışlarının boyut fonksiyonudur. Bu lokal çözünürlüğü sınırlandıracığından, daha yalın anlatımla yansıma alanının (nokta boyutu) boyutudur. Şayet yüksek çözünürlüğü gereksinim varsa ışının ne kadar iyi odaklandığı ve değişken aralıklar için otomatik bir odaklama prosedürünün sağlandığı dikkatlice kontrol edilmelidir.

3.5.4.4. Menzil Sınırları ve Karışan Işınımın Etkisi

Menzil özelliklerine her zaman şüpheyle bakılmalıdır. Olası menziller malzemenin kendi yansıma özelliklerine, atmosferin temizliğine ve yansıyan güneş veya obje üzerindeki yapay ışınım veya objenin yakınındaki karışan kaynaklar tarafından neden olunan ilave ışınımaya bağlıdır. Genel olarak uçuş zamanlı cihazları nispeten sağlamdır, üçgenleme cihazlarının CCD'lerinde faz ölçümü ve sinyal tespiti daha duyarlıdır ve gece vakti ölçümlere gerek duyulabilir.

3.5.4.5. Görüş Alanı

Rotasyon için motorize ekseni olmayan sabit tarayıcılar (kamera görüşlü tarayıcılar) sınırlı bir görüş açısına sahiptir. Tipik olarak yaklaşık 0.5 steradyana (tam bir küre 4π veya yaklaşık 12.6 steradyan) tekabül eden 40'ar derecelik bir alanı tarayabilirler. MENSİ SOISIC gibi tek eksenli tarayıcılar yaklaşık 45 ila 320 dereceyi veya 4.5 steradyan değerini tarayabilirken iki eksenli cihazlar (panorama görüşlü tarayıcılar) yaklaşık 11.7 steradyanlık bir görüş alanı bırakarak en aşağı nokta etrafındaki 30 derecelik konik bir alan hariç her yeri tarayabilir. Büyük görüş alanları personelin nezareti (mesela gece boyunca) tarayıcıların tek bir gözlem noktasından büyük miktarda veri topladığı kapalı odalarda büyük önem teşkil eder.

3.5.4.6. Çakıştırma Cihazları

Farklı gözlem istasyonlarından kısmi taramalar birleştirilmek ve/veya ortak bir koordinat sistemine dönüştürülmek zorundaysa (çakıştırma), obje boşluğunda tarama yazılımı ile kolaylıkla tespit edilebilen özel hedeflerin (küreler, yüksek yansıma özelliğine sahip düzlem hedefleri) bulunması tercih edilir. Bu hedefler, takometre ve fotogrametrik görüntüleme için olan hedefler gibi uygun olmalıdır.

3.5.4.7. Görüntüleme Kameraları

Pek çok uygulama, objenin geometrik tanımının yanında objenin doku bilgisini de gerektirir. Şayet bu dokular 3 boyutlu modele eşlenirse foto-realistik bir görüş sağlanabilir. Bazı tarayıcılar dönüş sinyali için yoğunluk değerlerini kaydeder. Genellikle bu doku eşlemesi için yeterince iyi bir doku bilgisi sağlamak için yeterli değildir. Aynı durum görüntüleme için değil de nokta tespiti için optimize edilmiş olan üçgenleme tarayıcılarının kameraları için de geçerlidir. Bazı kullanıcılar tarayıcı ekipmana yüksek kalitedeki (renkli) kameraların ilave edilmesini isterken bazı kullanıcılar da bu ekstra özellik için ek bir ödeme yapmak istemezler. Tarayıcıya bir kamera yerleştirme adaptörleri bir çözüm olabilir. Bu durumda tarama sonuçlarını ve görüntüleri sıraya koyma işlemini kolaylaştıracak şekilde tarayıcının ve kameranın bağlı pozisyonları kalibre edilebilir.

3.5.4.8. Taşıma Kolaylığı

İdeal olarak tarama ekipmanı küçük ve hafif olmalıdır. Pek çok orta ve uzun menzilli tarayıcılar halen hantaldır. Bu nedenle, örneğin, bu tarayıcıları ticari uçuşlarda kabin bagajı olarak taşımak mümkün değildir. Bilhassa uzak konumların yaygın olduğu kültürel miras dokümantasyonunda ekipmanın sağlamlığına ve bununla sağlanan taşıma çantasının kalitesine önem verilmelidir.

3.5.4.9. Güç Kaynağı

Bataryalarla çalıştırılan tarayıcılar, akım hattına gereksinim duyanlardan daha kolay kullanımlıdır. Akım hattı söz konusu olduğunda portatif tarayıcılar işe yarayabilir ancak iç kısımlarda veya oyuklarda çalışırken uzun güç kabloları kullanmak gerekli olabilir. Ayrıca, jeneratörler ve kablolar taşınacak ekipmana fazladan yük bindirir.

3.5.4.10. Tarama Yazılımı

Yerinde kullanılması gereken yazılım tarama pencereleri ve çözünürlük değerleri tanımlamak için hızlı ve basit ara yüzler sunmalıdır. Taramanın ilerleme durumunu görme ve kalan tarama süresini tahmin etme olanağı mevcut olmalıdır. Yapay bağlantı ve kontrol noktalarının otomatik hedef tespiti gibi daha sofistike özellikler ve çözünürlüğün dinamik ayarlanması tercih edilir. Şayet büyük objeler kaydediliyorsa taramanın tamamlanma kontrolü için farklı gözlem noktalarından alınan nokta bulutlarının en azından kaba bir kaydı yerine getirilmelidir.

3.6. Mevcut Cihazların Listesi

Mevcut cihazların bir listesi aşağıdaki tabloda verilmiştir. Halihazırda bazı şirketlerin yeni cihazları üretme aşamasında oldukları bilinmektedir. Sık sık güncellenen bir liste <http://scanning.fh-mainz.de> adresinde bulunabilir.

Tablo 2.1; Menzil olarak sınıflandırılmış mevcut tarayıcıların listesi (tof = time of flight (uçuş süresi ve tri = triangulation (üçgenleme)).

	Üretici	Tip	Menzil	Prens.
Orta Menzil	Optech	ILRIS-3D	800	tof
	Riegl Laser Measurement Systems	LMS-Zxxx	450	tof
	Mensi	GS 100	100	tof
	Callidus Precision Systems	Callidus	80	tof
	MetricVision	MV 200	60	tof
	Zoller+Froehlich GmbH	IMAGER 5003	55	tof
	Cyra Technologies	Cyrax 2500	50	tof
	Mensi	S10, S25	25	tri
	3rdTech	DeltaSphere	12	tof

	Üretici	Tip	Menzil	Prens.
Yakın Menzil	Arius3D	Arius3D	6	tri
	Breuckmann	optoTOP	5	tri
	Digibotics	Digibot	1.8	tri
	GOM mbH	ATOS	1.6	tri
	ABW GmbH	Kombi-640	1.5	tri
	MEL Mikroelektronik GmbH	M2D	1.2	tri
	Minolta	VI	1.2	tri
	3D Digital Corporation	Model 100, 200, 300	1	tri
	Cyber F/X	various	ca. 1	tri
	Cyberware	various	ca. 1	tri
	Intelligent Automation	4DI	ca. 1	tri
	Laser Design	DS, RE, PS	1	tri
	Vitronic	Vitus	ca. 1	tri
	micromasure GmbH	various	0.8	tri
	Polhemus	FastScan	0.8	tri
	Steinbichler Optotechnik	various	0.8	tri
	TC2	Body Scanner	0.8	tri
	Genex	Rainbow 3D	0.7	tri
	Shape Grabber	various	0.7	tri
	SCAN technology	various	0.6	tri
	DLR German Aerospace Center	Laser Range Scanner	0.3	tri
	INO	3D Laser Profiling Sensor	0.3	tri
	INTECU	Cylan	0.3	tri
	Nextec	Hawk	0.3	tri
	Roland	Picza	0.3	tri
	3D Scanners, Nvision	ModelMaker	0.2	tri
	Kréon	KLS	0.2	tri
	Metris	LC 50, LC 100	0.2	tri
	3DMetrics	3DFlash!	0.1	tri
	Hymarc	Hyscan 45c	0.1	tri
	Perceptron	Contour Probe Sensor	0.1	tri

3.7.3 Boyutlu Tarama Yazılımı

3 boyutlu tarama için yazılım gerçekte çok farklı tipten birkaç yazılım modülünü içerir. Veri toplanmasından nihai ürüne kadar tüm prosesi ele alırsak, kaba bir ayırım şu şekilde yapılabilir:

- Tarayıcı kontrolü için yazılım
- Nokta bulutu işlemi için yazılım
- Basit şekillerin nokta bulutuna yerleştirilmesi için yazılım
- Kompleks yüzey modellerinin oluşturulması için yazılım
- Doku ve görüntüleme eşleme için yazılım
- Veri ve proje yönetimi için yazılım

Bu yazılım modüllerinin kalitesi nihai 3 boyutlu modelin kalitesi ve bu sonucu elde etmek için gereken zaman üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır. Bu nedenle 3 boyutlu taramanın kabulü için temel gereksinim düzgün bir biçimde çalışan yazılım ürünüdür.

Bazı tarayıcıların performansı gerçekten etkileyici iken bu cihazlarla beraber sunulan yazılım genellikle hayal kırıklığı yaratmaktadır. Hiçbir şirket şu ana dek donanımı ile birlikte tatmin edici bir yazılım modülü sunmamıştır. Gereken bazı modüller (mesela yüzey modelleme için) bir nebze kompleks olduğu için üreticilerin yazılım geliştirme departmanları istenenleri vermek için çok küçüktür. Öte yandan tarama projelerinde karşılaşılan çok sayıda noktayı yönetme kapasitesi açısından eksik olan piyasada güçlü CAD ve 3 boyutlu modelleme yazılım paketleri yaygın olarak bulunmaktadır. Bundan ayrı olarak bazı küçük şirketler 3 boyutlu tarayıcı verilerinin işlenmesi için tek başına çalışan yazılım üretme kararı aldılar. İşin ticari yönünden bakarsak, nispeten az sayıda kopyanın satılabileceği göz önüne alınınca aynı modülleri pek çok yerde geliştirmek gereksiz gibi görünmektedir.

Halihazırda hızlı ve yüksek kalitede veri işleme arayışında olan kullanıcılar veri işleme esnasında pek çok yazılım ürünü arasında gidip gelmek zorundadır. Belirli işler için kendi modüllerini geliştirmek gerekliliği doğabilir. Bir yanda büyüyen

pazarı ve öbür yanda da ekonomik kısıtlamaları ele alırsak, yakın zamanda daha iyi yazılım çözümlerine (ve desteğine) ve böylece 3 boyutlu modelleme için bir yöntem olarak 3 boyutlu taramanın geçerliliğini arttırmak için belirli bir takviye ve konsantrasyonun oluşması beklenebilir.

3.7.1. Tarayıcı Kontrolü için Yazılım

Motorize ekseni olmayan sabit bir tarayıcı için çok basit bir çözüm, önceden ayarlanmış çözünürlüklü sabit bir pencerenin kullanımı olacaktır. Bu durumda tek bir kontrol elemanı bir çalıştırma butonu olabilir ve tarama yazılımının tek amacı ölçülen elemanlardan 3 boyutlu koordinatların hesaplanması ve bunların önceden tanımlanmış dosya ve formatta saklanmasıdır.

Daha sofistike bir yaklaşımla, bilhassa eksenli cihazlarda olası çözümler arasından bir çözüm yapmak ve bir veya daha fazla münferit tarama penceresinin seçilmesi mümkün olmalıdır.

Tarama prosesi çok daha akıllıca organize edilebilir. Olası gelişmeler şöyle sıralanabilir:

- Farklı pencere tanımlama imkanı (dijital giriş, lazer ışınının kendisini kullanarak veya bir kamera görüntüsünde bir çerçeveleme fonksiyonu kullanarak)
- Kıvrılmış uzun yapıları izleyebilen “hareketli” pencereler (mesela borular),
- Obje boşluğunda tespit edilen çakıştırma hedefleri için tarama çözünürlüğünün otomatik veya yarı otomatik ayarı,
- Tarayıcıdan farklı uzaklıklardaki yüzeyler üzerindeki sabit ızgara boyutlarını elde etmek veya obje tanımına bağlı (düz alanlarda düşük çözünürlük, kenarlarda yüksek çözünürlük) tarama çözünürlüğünün otomatik ayarı.

3.7.2. Yerinde Canlandırma ve Çakıştırma

Yerinde tarama prosesi sırasında taramanın ilerlemesi ve tamamlanması ile ilgili güvenirli bilgiler elde edilmesi tercih edilir. Pek çok görünmeyen bölgesi olan 3 boyutlu kompleks yapılar incelendiğinde bu durum tamamen kontrol dışına çıkabildiğinden, hem pek çok nokta bulutunu kaydetmek için bir araç hem de bir nokta bulutu izleyici ve kaba yüzey ağ gözünü oluşturmak için de en azından basit bir araç bulunmalıdır.

Tarama prosesini kontrol eden bilgisayarda bu özelliklerin sağlanması, bu özellikler bir şekilde işlem yazılımının bir parçası olduğu için gerçekte teknik bir problem değildir. Genellikle işlem yazılımı bir tarama kampanyası sırasında önceki bir proje için evde ve ofiste gereklidir. Bu nedenle sadece bir lisans alınmışken bile lisanslama politikası bu araçları hem taramada hem de ofis bilgisayarında sağlamalıdır.

3.7.3. Nokta Bulutu İşleme için Yazılım

3.7.3.1. Canlandırma

İlk işlem aracı olarak nokta bulutlarının gösterimi için hem uzaysal rotasyon ve gezdirme hem de yakınlaştırma ve uzaklaştırmaya izin veren bir görüntüleyici olmalıdır. Çok sayıda nokta ile uğraşılabilceğinden, bu aracın performansı nokta seyreltmeyi de içerecek şekilde (sadece görüntüleyicide) optimize edilmelidir. Özellikten bağımsız renk kodlaması (gözlem noktasına, uzaklığa veya yansıma değerlerine bağılı olarak) verinin bu ilk yorumlanmasını destekleyebilir.

Tarama sonuçlarını gözden geçirmek amacıyla müşteriler tarafından pek çok durumda gerekli olabileceğinden, bu araç da herhangi bir ekstra lisans ücretine gerek duymadan mevcut olmalıdır.

3.7.3.2. Tek Nokta Bulutlarında Veri Temizleme

Bir tarayıcının tek nokta ölçümleri münferit olarak denetlenmediği için seçilen obje yüzeyini temsil etmeyen olası nokta çakıştırmaları için pek çok neden vardır. Bunların arasında:

- arka planda objelerden yansımalar,
- tarayıcı ile obje arasındaki boşluktan kaynaklanan yansımalar (ön plandaki ağaçlar ve diğer objeler, hareketli insanlar veya trafik, toz veya yağmur gibi atmosferik etkiler),
- kenarlarda sadece lazer noktalarından kaynaklanan kısmi yansımalar,
- ışının çoklu yansımaları,
- yüzey elemanlarının farklı yansıma özelliklerinden dolayı sistematik menzil hatalarından kaynaklanan menzil farklılıkları,
- çok parlak objelerden kaynaklanan hatalı noktalar (ışıklar).

Bu yanlış noktalardan bir çoğu, en iyi biçimde pek çok nokta bulutu kaydedilmeden önce yok edilebilir. Hiçbir otomatik yöntem olası tüm takımları öngöremediği için, yok etme prosesi interaktif olarak yapılmalıdır. Akıllı yazılım özellikleri bu prosese katkıda bulunur ve bu sinir bozucu düzenleme prosesini hızlandırır.

Ön ve arka plandaki noktalar menzil sınırlarının tanıtılmasıyla kolaylıkla yok edilebilir (dijital olarak veya grafik araçlarının yardımıyla). Çoklu yansılardan kaynaklanan hatalı noktalar genellikle bu yöntemle de yakalanabilir.

Tespit edilmesi daha zor olan noktalar, kenarlardaki yanlış noktalardır. Kenarda yansıyan lazer noktasının oranına bağlı olarak sonuç ötelemesi çok büyük veya küçük olabilir. Etki sistematik olduğundan (mesela üçgenleme tarayıcılar için hatalı nokta her zaman tarayıcıdan kenara kadar ışının uzantısında bulunabilir), yazılım bu tip adayları aramalı, bunları öne çıkarmalı ve bunları tutması veya silmesi işlemini operatöre bırakmalıdır.

Bazı testler belirli tarayıcıların yüzey malzemesinin yansımaya bağlı olarak menzile sapmaları gösterdiğini belirlemiştir. Bu hataların otomatik bir düzeltme prosesi oluşturmaya yetecek kadar hassas bir biçimde modellenip modellenmediği araştırılmalıdır.

3.7.3.3. Veri Filtreleme ve Nokta Seyreltme

Önceki bölümde tanımlanan ağır hatalara ilaveten tarama sonuçları ölçülen elemanların sınırlı hassasiyetine bağlı olarak belirli bir parazit oluşturacaktır. Şayet obje parçasının düzgün olduğu biliniyorsa, düşük geçirgenlikli veya orta bir filtrenin uygulanması durumu önemli ölçüde düzeltebilir. Bununla beraber, filtrelemenin tüm obje parçalarını aynı şekilde etkileyeceği unutulmamalıdır. Eğer obje hem düz parçalara hem de kenarlara sahipse, filtreleme prosesi bu noktada önerilmez.

Eğer orta bir yüzeyden büyük sapmalara sahip bu noktalar tercihen silinecekse, nokta seyreltme de filtreleme ile benzeri bir etki gösterebilir. Şayet birkaç tarama farklı gözlem istasyonlarından alınmışsa, karşılaştırma prosesindeki tüm ölçümler birleştirilene kadar nokta seyreltmesi ile beklenmesi tavsiye edilir.

3.7.3.4. Çakıştırma

Çakıştırma, iki farklı amaç için gereklidir:

- Farklı gözlem noktalarından alınan nokta bulutlarının birleştirilmesi
- Objenin küresel bir koordinat sisteminde referans edilmesi

Nokta bulutunda tanımlanan düğüm ve kontrol noktaları bu işlemi yerine getirmek için gereklidir. Bu noktalar dikkatlice seçilmiş konumlardaki obje özellikleri (mesela köşeler) veya özel hedefler (küreler, yüksek yansıma özellikli düz hedefler) olabilir. Küresel koordinat durumunda bu hedefler arazi ölçümü yöntemleri veya yakın menzile fotogrametri ile incelenebilir. Her halükarda bir nokta bulutundaki yeterli sayıda bilinen nokta (üç, hatta dört) bulutları düğüm noktaları ile dikmekten daha iyi sonuçlar verecektir. Öte yandan eğer üst üste binme yeteri kadar büyükse,

pek çok yüzey noktası sadece yüzey koşullarını kullanan çözüme yeterince geometrik mukavemet verecektir. Her halükarda hata dağılımı pek çok tek tarama içeren uzun objeler ve iç veya dış kapalı yüzeyler için olumsuz olacaktır.

Tek objeler, koşullar ve hassasiyet gereksinimleri durumdan duruma çok farklılık gösterebilir ve ideal bir çakıştırma yazılımı hem özel hedefler tarafından hem de üst üste binen nokta bulutları (veya her ikisinin bir kombinasyonu) tarafından kayda izin vermelidir.

3.7.3.5. Çakıştırmalı Nokta Bulutlarında Veri Temizleme

Önceki temizleme prosesinde bazı hatalı noktalar kalmış olabilir veya çakıştırmadan sonra hata olarak yorumlanabilirler. Bunlar, prosesin bu aşamasında yok edilmelidir.

3.7.3.6. Çakıştırmadan Sonra Nokta Seyreltme

Noktaların bol olduğu örtüşme bölgelerinden ve ayrıca tarayıcıdan farklı uzaklıklardan ve lazer ışını ve yüzey normali arasındaki farklı açılardan dolayı nokta yoğunluğu obje içinde büyük ölçüde farklılık gösterecektir. İyi bir nokta seyreltme yazılımı sadece yüzeye göre eşit nokta dağılımını hesaba katmamalı, aynı zamanda yetersiz gelme açısından veya tarayıcıdan olan büyük mesafelerden kaynaklanan yetersiz hassasiyete sahip noktaları da silmek için seçmelidir (bilhassa üçgenleme tarayıcılarında özel bir öneme sahiptir).

Nokta seyreltme için diğer bir koşul da düz yüzey bölgelerinde, kenarların komşu olduğu yerlerden daha az noktaya ihtiyaç duyulması gerçeğine dayanır. Bu koşul prosesin bu aşamasında – bilhassa bir üçgensel ağ gözünün sonradan oluşturulması durumunda – veya daha sonraki bir proses aşamasında sunulabilir.

3.7.3.7. Nokta Bulutlarından Türetilen Basit Çizimler

Genellikle nokta bulutları nihai bir dokümantasyon sonucu için yeterli değildir. Nokta bulutları bir objenin geometrisini arşivleme aracı olarak düşünülebilirler, bununla beraber, aynı şekilde fotogrametrik görüntüler de sonraki prosesler için arşivlenebilir. Şayet planlanan buysa, nokta bulutu verileri dikkatli bir biçimde değerlendirilmeli ve veriler arşivlenmeden önce yukarıda belirtilen prosedürlerin (temizleme, filtreleme, kaydetme, seyreltme) uygulanıp uygulanmayacağı ve uygulanacaksa bunun nasıl yapılacağını tanımlayan standartlar istenmelidir.

Şayet kesitlere ihtiyaç varsa, bunlar bölgenin gerekli olduğu düzlemin yakınında ince bir nokta tabakası seçilerek nokta bulutlarından türetilir. Şayet tarama yazılımı ile birlikte uygun bir araç tedarik edilirse veya seçilen noktaları bir CAD programına aktardıktan sonra noktaları birleştiren doğruların oluşturulması 2 boyutta gerçekleştirilebilir.

3.8. Basit Şekillerin Uydurulması için Yazılım

Şayet taranan obje geometrik basit şekillerden oluşan parçalar ihtiva ediyorsa (düzlemler, silindirler, koniler, küreler, v.s.) veya geometrisi böylesine basit bir gösterime indirgenecekse, bu basit şekiller ilgili obje parçasına ait nokta bulutlarına uydurulmalıdır. Gerçekte uygun araçları sağlaması gereken CAD programları halihazırda 3 boyutlu tarayıcılar tarafından sağlanan çok fazla sayıdaki tek noktaları idare edecek durumda değildir. Geliştiriciler için bu yazılım ürünlerinin performansını 3 boyutlu tarama tekniklerinden doğan yeni gereksinimlere adapte etmenin çok zor olmadığı kanısındayım.

3 boyutlu taramalar için sağlanan yazılım çözümlerini uydurma prosesi, performans göz önüne alındığında önemli ölçüde farklılık gösterir. Şayet basit şekillerin önceden bilinen bir toplanması söz konusu ise (mesela endüstriyel bir ortamda standart çaplara sahip boruların düzenlenmesi halinde) çok az manuel giriş ve düzeltme gerektiren otomatik uydurma yöntemleri mevcuttur. Bu durum, eğer

sadece belirli çeşitler tüm objenin parçaları olarak mevcutsa çok daha komplike yapılar (flanşlar, pompalar ve çelik kirişler gibi) için de geçerlidir. Bazı yazılım ürünleri ilgili 3 boyutlu CAD kataloglarına bağlantı bile sağlamaktadır. Eğer farklı parametrelere sahip basit şekiller beklenecekse, yazılım uydurulacak basit şekle ait olan nokta bulutunun bu parçalarını manuel olarak önceden seçebilme araçları sunmalıdır. Bu seçim iki boyutlu bir ekranda üç boyutlu olarak sağlanmak zorunda olduğundan bu işin kolaylıkla yürütülmesi ve ön seçimde hatalı olarak yer alan noktalara karşı toleranslı olması önem kazanacaktır.

3.9. Kompleks Yüzey Modellerinin Oluşturulması için Yazılım

3.9.1. Poligonal Ağ Yapısı

2½ boyut – 3 boyut: Poligonal ağ yapısı, düzensiz bir yüzeyin geometrik tanımlamasını yapmak için standart bir yöntemdir. Yöntem araştırmacılara ve fotogrametri uzmanlarına topografik uygulamalardan dolayı aşina gelmektedir. Bununla beraber topografi için 2½ boyutlu çözümlerin yeterli olacağı göz önüne alınmalıdır, mesela tüm geometri yükseklik değerlerini (bir referans düzleminden dikey uzaklıklar) bu düzlemde tanımlanan 2 boyutlu köşelere eklemek şeklinde tanımlanabilir. Bazı 3 boyutlu tarama yazılımlarında ağ yapısı alternatifi olarak yer alan bu yöntem yarı kabartma gibi sadece 2½ boyutlu objeleri modellemek için kullanılabilir. Öte yandan gerçek 3 boyutlu poligonal ağ yapısı heykel gibi kapalı objeler için uygulanabilir olmalı ve içi boş ve açık obje yapılarının (sözgelimi bir testinin içi ve kulpu) modellenmesine olanak tanımalıdır. Bu bir nebze daha komplike bir proses olduğu için halihazırda sunulan çözümlerin çok da tatmin edici olmadığı açıktır. Hesaplama süresi çok uzun olabilir ve sonuçların geometrisi her zaman orijinal nokta bulutunda yer alan bilgi genişliğini göstermez.

Nokta seyreltme: Nokta seyreltme prosedürü örtüşen tarama alanlarından veya tarayıcıdan olan kısa obje mesafelerinden dolayı yüksek nokta yoğunluğundan kaynaklanan fazla noktaları yok etme amacını taşır. Bu seyreltme koşulları tarama geometrisine dayandığı için bu prosesi ağ yapısı prosesinden önce yürütmek tavsiye

edilir. Bununla beraber, tüm seyreltme işlemi adımları ağ gözü üçgenleme prosesinden hemen önce gerçekleştirilen tek bir prosedürde birleştirilebilir. 3 boyutlu modellemede nokta seyreltme için koşulların farklı olduğu unutulmamalıdır: Aynı objenin düz bölgelerinde sadece birkaç noktaya gereksinim duyulurken kıvrımların ve kenarların yakınında yoğun bir nokta modeli bırakmak ekonomik bir yaklaşımdır. Bu durum, tüm objenin üzerinde eşit bir nokta modeli gerektiren bazı 3 boyutlu ağ yapısı programlarının algoritmalarına terstir.

İşletim ve performans: Teoride ağ yapısı için tüm üçgenleme prosesi, kullanıcı oluşturulacak 3 boyutlu objenin çözünürlüğünü bir şekilde tanımlayan parametreyi ortaya koyduktan sonra otomatik olarak yürütülmelidir. Gerçekte pek çok yazılım ürünü, $2\frac{1}{2}$ boyutlu lokal bir ağ yapısının gerçekleştirilmesi gerektiği yerlerde objenin kısmi bölgelerini ardışık olarak tanımlama gerekliliğinden dolayı operatör tarafından çok fazla etkileşim gerektirir. Bölgede yeterli sayıda nokta bulunmasına karşın sıklıkla aşırı üçgenler oluşturulur veya ağ yapısında delikler bırakılır.

Kenarlar: Şayet tarama çözünürlüğü yeteri kadar yüksekse, yazılım kenarlara yakın noktaların silinmemesini ve ağ yapısı üçgenlerinin kenarlarının bir kenar ile çakışmaması sağlanarak yazılım kenarları kendi başına tespit eder. Kenarlar her zaman mükemmel bir biçimde tanımlanmadığı için kullanıcı bu koşulların zorlanması gerektiği yerlerde kenarları tanımlama fırsatına sahip olmalıdır.

Düzenleme: Hem tarama prosesinden kaynaklanan bazı problemler (hatalı noktalar, parazitli veriler veya gizlenmiş bölgeler gibi) hem de ağ yapısı üçgenlemesi sonucu çıkan problemler (delikler, aşırı üçgenler), üçgensel ağ yapısını düzenleme ihtiyacını doğurur. Makul bir süre zarfında tatmin edici bir sonuca ulaşmak için hem problemleri tespit eden prosedürler hem de akıllı düzenleme araçları sağlanmalıdır.

Harcama: 3 boyutlu poligonal ağ yapısı için pek çok yazılım ürünü mevcuttur. Bunların esnekliği ve performansları önemli ölçüde değişkenlik gösterir. Diğer ürünler tekrar problemi tam olarak çözme kapasitesinde değilse de kabul

edilebilir bir sonucun üretilmesi (mesela düzenlemeyi ihtiva eden) başka bir ürüne kıyasla bir ürünle sürenin %10'unda gerçekleştirilebilir.

3.9.2. NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline – Üniform Olmayan Rasyonel B-Eğri)

Bir yüzeyin NURBS modellemesi seçildiğinde yüzeyi tanımlamak için ayrıık ağ yapısı noktaları yerine eğri parametreleri kullanılır. Bu sayede veri saklama boşluğu önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca, yüzeyin düzgün olduğu bilindiğinde NURBS modellemenin kullanılması taramadan kaynaklanan paraziti giderebilir. NURBS modelleme 3 boyutlu modelleme için bazı yazılım paketleri ve hatta 3 boyutlu tarama verilerini kullanmak için geliştirilmiş yazılım paketleri ile birlikte tedarik edilir. Bu durum nispeten küçük teknik parçalar için (mesela araba çamurluğu) için çok kullanışlı gibi görünür ancak noktaların sayısı ile bunların ilişkilendirildiği eğrilerin büyük, kompleks objelerde kullanılmasında halihazırda bir limit mevcuttur.

3.9.3. Doku ve Görüntü Eşleme

Doku eşleme: Yüzeylerin herhangi bir canlandırmasını mümkün kılan sadece dokudur. En basit durum olan beyaz doku objeye su mermeri görünümü verebilir. Bununla beraber bu durum sadece bir veya daha fazla ışık kaynağı sanal bir aydınlatma için tanımlanmışsa geçerlidir. Ayrıca, malzemelerin daha kaba veya parlak bir yüzey görünümü ile neticelenen yansıtma özellikleri de (direkt ve dağınık yansıma arasındaki ilişki) tanımlanmalıdır. Daha karmaşık dokular ve daha sofistike aydınlatma prosedürleri tarama yazılımı ile tedarik edilebilir, şayet büyük ve kompleks objeleri idare edebilecekse tek başına çalışan 3 boyutlu modelleme yazılımı da kullanılabilir.

Tarayıcı verileri ile görüntü eşleme: Görüntü bilgisi tarama prosesi ile sağlanabilir. Menzil tarayıcıları durumunda geri gönderilen sinyalin gücünü gösteren bir özellik mevcut olabilir. Eğer düzeltme yapılırsa (farklı menzil ve farklı geliş açılarının etkileri hesaba katılırsa), bu değer objenin gri tonlu bir görüntüsünü

oluşturmada kullanılabilir. Üçgenleme tarayıcılarının kameraları benzeri bir bilgiyi sağlayabilir veya hatta tüm bakış açısının bir görüntüsünü kaydedebilir. Pek çok durumda bu basit cihazlar dokümantasyon işi için gereken yüksek kaliteli görüntüleri sağlayamaz.

Ayrı kameralardan görüntü eşleme: Yüksek görüntü kalitesi, bilhassa renkli görüntüler için eşleme için görüntü oluşturmak üzere ayrı kameraların (dijital veya film) kullanılması tavsiye edilir. Tarayıcı konumlarına yakın kamera konumları eşleme prosesini kolaylaştırır. Yönelim parametreleri (konumlar, rotasyonlar) değerleri en azından yaklaştırır ve yerinde kaydedilmelidirler. Aydınlatma mümkün olduğu kadar üniform olmalıdır (istemesi kolay, yapması zor).

Görüntü projeksiyonu ve mozaikleme: Görüntüler objenin üzerine tekrar yansıtılmalıdır. Her ne kadar yazılım özdeş noktaları kullanarak görüntüleri objenin üzerine herhangi bir fotogrametri katmadan yerleştirmek için uygun olsa da fotogrametrik teknikler (kalibre edilmiş kameralar, yığın ayarlarından yönelim parametreleri) kullanılırsa sonuç daha hızlı elde edilebilir (ve daha iyi bir geometrik kalite ile). Topografik uygulamalar için mozaiklere kıyasla, gerçek 3 boyutlu objeler için kullanılan proses çok daha karmaşıktır. Bu ise örneğin bilginin hangi mevcut görüntüden alınması gerektiğine karar veren her küçük yüzey elemanı için yeni bir proses ihtiva edebilir. Görüntü elde etme sırasında aydınlatma koşullarının objenin her yüzey elemanında aynı ön koşulu sağlamayacak olması nedeniyle parlaklık, kontrast ve renk dengesi ile ilgili radyometrik düzeltmeler de çok zor olacaktır. Görüntü eşleme oldukça güç bir prosedür olduğundan ve yazılım geliştiricileri için pek çok yeni yama üretilmesi gerekeceğinden ekleme yapmaya gerek yoktur. Bu da tarayıcı üreticileri, bu alanda uzmanlaşmış ufak ölçekli şirketler veya CAD ve 3 boyutlu modelleme ile uğraşan büyük yazılım firmaları tarafından gerekli profesyonel ve ekonomik kaynakların tedarik edilip edilemeyeceği sorusunu akla getirmektedir.

3.10. Veri ve Proje Yönetimi için Yazılım

3.10.1. Veri İzleme ve Kalite Kontrol

Bir dizi nokta bulutundan ve inceleme sonuçları veya görüntülerinden nihai bir 3 boyutlu gösterime uzanan ilave veriden gelmek için pek çok proses adımı gerekebilir. Bu adımlar sırasında gözlemler değiştirilir, ayarlanır veya silinir. Çakıştırmalar, proje esnasında uygulanan tüm uygulamaları belgelemeye devam ettirilmelidir. İşin içine ayar prosesleri girince standart sapma gibi istatistik değerleri de tedarik edilmelidir. Orijinal nokta bulutu ve nihai model arasındaki farklılıkları görüntülemek için kullanılan grafik araçları nihai kalite değerlendirmesi açısından özel önem taşır. Eğer tarayıcı imalatçısının yazılımı kullanıldığında bilhassa farklı tip tarayıcılardan (sözelimi farklı çözünürlük sunanlar) veri entegre edilirken bu yazılımı diğer tarayıcılar için kullanma talebi doğabilir. Taranan noktaların Kartezyen koordinatları bir veri ara yüzü olarak yeterli değildir çünkü uzaklık ve bir noktanın tarandığı doğrultu ile ilgili bilgi içermezler. Bu bilgiler temizlik, seyreltme, ağ yapısı ve görüntü eşleme gibi sonraki operasyonlarda önemli olabilir.

CAD ve 3 boyutlu modelleme yazılımı: Sonuçlar daha ileri proses ve/veya saklama için CAD ve 3 boyutlu modelleme yazılımına aktarılmak zorunda olduğundan, en yaygın sistemler için uygun olan aktarma araçlarını bulundurmak gerekir. Genellikle tarama sonuçları mevcut veri modelleri ile kıyaslanmalıdır.

3.11. Mevcut Yazılım Ürünleri

3 boyutlu tarama yazılımı gerçekte çok farklı amaçları olan geniş bir modül topluluğu anlamına gelir. Bunlardan bazıları belirli bir tarayıcıya, bazıları da genel olarak 3 boyutlu taramaya özgüdür, bazıları herhangi bir tip 3 boyutlu modelleme için gereken araçlardır. Halihazırda tüm 3 boyutlu tarayıcı üreticileri bir dizi modül sunmaktadır. Ancak bunlardan hiç biri tam ve tatmin edici olarak kabul edilemez. Talep açık olduğundan ve pazar büyüdüğünden 3 boyutlu tarama için bazı tek başına çalışan yazılım ürünleri mevcuttur.

Tablo.2.2; Tarama üreticilerinden ayrı olarak sunulan 3 boyutlu tarama yazılımı

Üretici	Tip
3D Veritas	3D-Veritas
InnovMetric Software	Polyworks Modeler
INUS Technology	RapidForm 2001
metrologic group	Metrolog II
octocom AG	OctoCAD
Raindrop Geomagic	Geomagic Studio
SDRC	Imageware Surfacar
Z+F UK Ltd	Light Form Modeller

3.12. Tersine Mühendislik ve Araştırma için Otomasyon Lazer Tarama Sistemi

Geleneksel mühendislik prosesi tasarım konsepti ile başlarken bir ürün gerçek parçanın şekli ile tasarlanır. Serbest bir yüzeye sahip parça genellikle tersine mühendislik prosesi ile geliştirilir. Fiziksel bir parçanın şekil verilerinin elde edilmesi tersine mühendislikte gerekli bir prosestir. Tekrar oluşturulan yüzey modelinin kalitesi hem ölçülen nokta verisinin çeşidine ve hassasiyetine hem de ölçüm cihazının çeşidine bağlıdır.

Halihazırda CMM ve 3 boyutlu bir lazer tarayıcı şekil tersine mühendisliği ve kalite tespiti alanlarında sıkça kullanılmaktadır. Pek çok CMM tetikleyici tip prob kullanır ancak mekanik analog tarama problemleri olanlar da mevcuttur. Tetikleyici tip CMM probu parçaya dokundurarak nokta verilerini elde eder, böylece az sayıda nokta verisi gerektiren basit şekilli parçaların ölçümü için uygundur. Tarayıcı-tip CMM'ler dokunma tetikleyici-tip olanlardan daha fazla örnekleme noktası toplayabilir ve görüntü sensörlerinden daha iyi bir hassasiyete sahiptir. Bunlar

serbest şekilli parçaları ölçmek için de kullanılabilir ancak yumuşak malzemelerden yapılmış bir parçayı ölçemezler ve lazer tarayıcılara kıyasla daha düşük tarama hızına sahiptir. Öte yandan lazer tarayıcılar temassız yöntem ile kısa bir sürede büyük ölçüde nokta verisi elde edebilir. Lazer tarayıcının hassasiyeti gelişme gösterdiği için endüstride pek çok uygulama için geniş ölçüde benimsenmektedirler.

Kompleks 3 boyutlu parçaların lazer taramasında cihazın derinlik bölgesi (DOF), görüş alanı (FOV) ve kendi kendine oklüzyon gibi pek çok optik sınırlaması olduğundan gerekli tarama sayısını, taramaların doğrultusunu ve tarama yollarını belirlemek güçtür. Parçalar elle taranırken deneme ve yanılmadan dolayı çok fazla zaman ve para harcanır. Bu sorunu çözmek için tarama planının oluşturulmasının ve taramanın otomatik olarak gerçekleştirildiği otomasyon bir ölçüm sistemi gereklidir. Üstelik yansıtıcı veya saydam malzemelerin taranması için uygun bir spreyle ön işleme gereklidir.

Bu araştırmada tersine mühendislik ve serbest şekilli bir yüzeyin incelenmesi için otomasyon bir tarama sistemi geliştirilmiştir. Sistem gerekli tarama sayısını, tarama doğrultularını ve ekipmanın muhtelif parametrelerini hesaba katarak tarama yollarını içeren optimum bir tarama planı oluşturur. Bir otomasyon sistemi gerçekleştirmek için otomasyon parçasının yerleştirilmesi gereklidir ve bu amaçla motorize döner bir tabla kullanılır. Ölçümde döner tablanın eksenleri bilinmektedir ve parçaya tam olarak yönelmesi için tabla otomatik olarak döndürülmektedir. Ardından oluşturulan tarama yolları lazer tarayıcıya indirilmekte ve tarama işlemi gerçekleştirilmektedir. Toplanan nokta verisi otomatik olarak kaydedilmekte ve nokta verisinin kalitesi analiz edilmektedir.

3.12.1. Arka Plan ve Araştırmanın Kapsamı

3.12.1.1. Lazer Tarama Sisteminin Temelleri

Bu araştırmada kullanılan 3 boyutlu lazer tarayıcının mekanizması aşağıda verilmiştir. Yüzeyin üzerine bir lazer şeridi düşürülmekte ve yansıtılan ışın CCD kameralar ile tespit edilmektedir. Görüntü işleme ve üçgenleme yöntemi ile üç

boyutlu koordinatlar elde edilmektedir. Lazer probu üç eksenli bir taşıma mekanizmasının üzerine monte edilir ve önceden belirlenmiş doğru parçaları dizisinden oluşan tarama yolu boyunca hareket eder. İki yönde de döner.

Lazer tarayıcı bir görüntüyü yakalayınca sistem otomatik olarak bir optik odak bulur ve mesafeyi korur. Lazer şeridinin uzunluğu ve mesafe operatör tarafından değiştirilemez. Lazer tarayıcı optik sensörler ve mekanik olarak hareketli parçalar içerdiğinden parça üzerinde belirli bir noktayı ölçerken muhtelif sınırlamalar uygulanmalıdır. Bu bölümün amacı aşağıdaki önemli sınırlamaları yerine getiren optimum bir tarama planı oluşturmaktır:

1. Görüş açısı: lazer ışınının geliş açısı ile ölçülen bir noktanın yüzey normali maksimum görüş açısından $-\gamma$ – daha düşük olmalıdır:

$$d_i \bullet N_i \geq \cos(\gamma),$$

$$d_i = \frac{L - P_i}{|L - P_i|}.$$

2. FOV: ölçülen nokta bir lazer şeridinin uzunluğu dahilinde konumlandırılmalıdır

$$(-d_i) \bullet B_i \geq \cos\left(\frac{\delta}{2}\right),$$

burada δ FOV açısıdır.

3. DOF: ölçülen nokta lazer kaynağından belirli bir aralık dahilinde olmalıdır

$$l_{\text{STAND}} - \frac{l_{\text{DOF}}}{2} \leq |L - P_i| \leq l_{\text{STAND}} + \frac{l_{\text{DOF}}}{2},$$

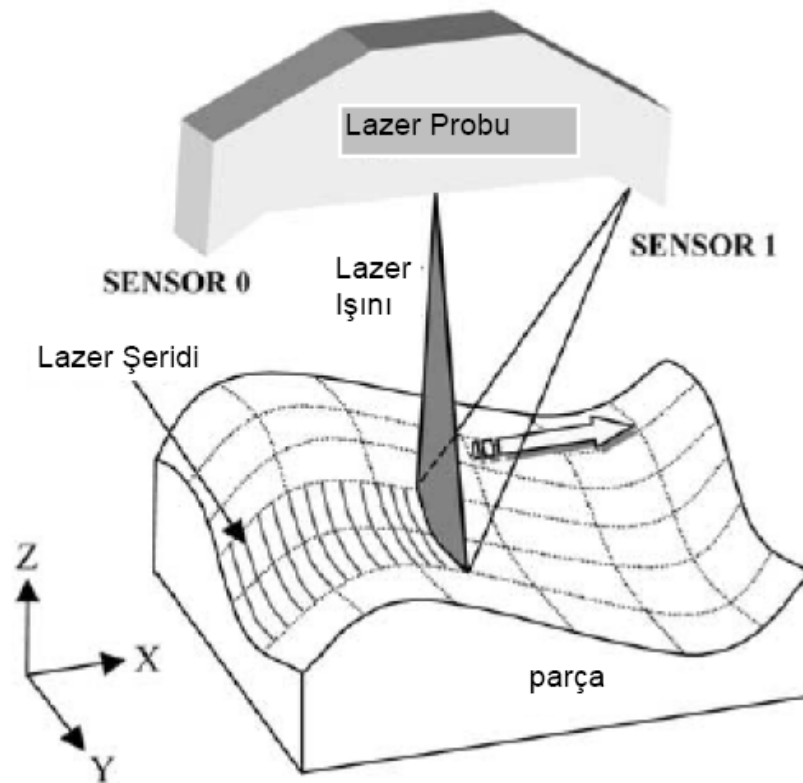
burada l_{STAND} ve l_{DOF} standdan olan uzaklık ve DOF uzunluğunu temsil etmektedir.

4. Oklüzyon: hem geliş açısı hem de yansıtılan ışın parçanın kendisi ile çakışmamalıdır.

5. Lazer probu çarpışmadan arındırılmış bir yol boyunca seyretmelidir.

6. Şayet parça parlak veya saydam ise spreyleme gibi ön işleme gereklidir.

Şekil 3.12’de lazer tarama mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.12; Lazer tarama mekanizması

3.12.1.2. Araştırmanın Kapsamı

Bu araştırmanın nihai amacı serbest şekilli yüzeylere sahip bir parçanın minimum insan etkileşimi ile otomatik olarak taranmasıdır. Tüm proses üç bölümden oluşur: tarama planının oluşturulması; tarama ve karşılaştırma/analiz.

Tarama planının oluşturulması aşamasında muhtelif ölçüm sınırlamaları göz önüne alınarak optimum tarama planı hesaplanır. Tarama planı gerekli tarama sayısını, tarama doğrultularını ve tarama yollarını içerir. Bu çalışmada parçanın CAD modelinin mevcut olduğu varsayılmaktadır. Optimum taramanın hesaplanması için tahmin ve modifikasyon yöntemlerinden yararlanan algoritmaların kullanılmasını öneriyoruz.

Parçanın oluşturulan tarama planı boyunca taranması için parça düzeneği ile ilgili problemler ve tarama yollarının koordinat dönüşümü incelenmelidir. Tarama için parça iki eksenli motorize bir döner tabla ile düzenlenir ve koordinat dönüşümü öteleme ve dönme matrislerinin bir kombinasyonu ile gerçekleştirilir. Hesaplanan tarama yolları tarayıcıya indirildikten sonra parçanın taraması yapılır.

Tarama tamamlandıktan sonra farklı tarama doğrultularından alınan veriler tek bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir ki buna karşılaştırma adı verilir. Top (veya küre) gibi elemanları kullanarak geleneksel karşılaştırma yöntemi çok zaman alır. Bu çalışmada karşılaştırma işlemi döner tablanın dönme açıları kullanılarak otomatik olarak yapılır. En sonunda CAD modeli ile taranan verileri arasındaki farklılıklar hesaplanarak taranan verilerin kalitesi gerçekleştirilir.

3.12.2. Tarama Planının Oluşturulması

3.12.2.1. Tüm Prosedür

Bir tarama planının oluşturulması için kompleks bir parça fonksiyonel yüzeylere ayrılmalıdır, böylece her yüzey yolu için tarama planı oluşturulacaktır.

Tüm yüzeyle uğraşmak yerine yüzey, yüzeyden örneklenen bir nokta takımı ile yaklaştırılmış ve minimum tarama sayısı ile örneklenen tüm noktaların taranması bu algoritmanın nihai amacı olmuştur. Örneklenen noktaları kullanarak birlikte taranamayan nokta çiftleri elde edilmiş ve görüş açısı sınırlamaları dikkate alınarak gerekli tarama sayısının tahmin edilmesi için kullanılmıştır. Tarama doğrultularını ve her tarama doğrultusu için tarama yollarını içeren ilk tarama planı oluşturulur ve ardından DOF ve oklüzyon sınırlamaları test edilir. Şayet bazı noktalar taranamıyorsa geometrik şekle göre ilave bir doğrultu veya değiştirilmiş bir doğrultu hesaplanır. Bu yeni doğrultular için nihai bir tarama planı oluşturulana dek aynı prosedürler tekrarlanır.

3.12.2.2. İlk Tarama Doğrultusunun Belirlenmesi

Örneklenen nokta sayısı bir tarama planının uygulanabilirliğini etkilediği için uygun bir nokta sayısı örneklenmelidir. Komşu noktalar arasındaki mesafe algoritmanın kriteri olarak kullanılır. Örneklenen komşu noktalar arasındaki uzaklık bir lazer şeridinin uzunluğundan daha az olmalıdır.

İki noktayı aynı taramada taramak için iki noktanın normal vektörleri arasındaki açı görüş açısından iki misli düşük olmalıdır. Sınırlamaları yerine getirmeyen noktalar kritik noktalar olarak adlandırılır. Kritik noktaların varlığı yüzeyin bir seferde taranamayacağı anlamına geleceğinden gerekli tarama sayısı kritik noktalara göre tahmin edilir. Tüm kritik noktaların bulunmasının ardından normal vektörlerinde görüş açısından daha düşük açı sapmasına sahip olanlar gruplandırılır. Grup sayısı gerekli tarama sayısını gösterir.

Bir sonraki adım kritik nokta gruplarına dayanarak ilk tarama doğrultularının hesaplanmasıdır. İlk önce, normal vektörlerinde maksimum açı sapmasına sahip maksimum sapma noktaları C_{1-1} ve C_{2-1} kritik noktalar arasından belirlenir. Normal vektörü maksimum sapma noktasına göre kullanıcı tanımlı açıdan daha küçük bir açı sapmasına sahip tüm örnekleme noktaları bulunarak her bir bölge oluşur. Bu açı bölgelerin boyutları arasındaki değiş tokuş ve taranan verilerin kalitesi göz önüne alınarak seçilmelidir. Nihai olarak gruptaki noktalardaki tüm normal vektörlerin

global ortalaması, ilk tarama doğrultusu olarak belirlenir. Yani, ilk tarama doğrultusu şu şekilde gösterilir:

$$ISD_i = \sum_{j=1}^n D_j / n_i$$

İlk tarama doğrultusu

Burada D_j her bir örnekleme noktasının birim normal vektörü ve n_i de i bölgesindeki nokta sayısıdır.

Genel olarak en iyi tarama verileri tarama doğrultusu ile yüzey normal vektörleri birbirine paralel olduklarında elde edilir. Global ortalama doğrultu tarama doğrultusu ile yüzey normalleri arasındaki açıyı minimize eder, bu sayede en iyi tarama doğrultusu olarak kabul edilebilir.

3.12.2.3. Tarama Yolunun Oluşturulması

Tarama yolu tarama sırasında lazer probuna kılavuzluk eden doğru parçalarının birleşimidir. Bu araştırmada kullanılan lazer tarayıcının tarama yolu bir sıralama ID, bir başlangıç noktası ve bir bitiş noktası içerir. Genel olarak yüksek taranabilirlik tarama yolunun uzunluğuna, tarama yolu sayısına ve düzenek değişimi sayısına bağlıdır. Bu algorithmada toplam tarama yolu uzunluğu ve tarama yolu sayısı yüksek taranabilirlik sağlamak üzere en aza indirilmiştir.

İlk önce aynı doğrultuda taranabilecek örnekleme noktaları sırasıyla gruplanmalıdır. Ardından nokta takımları tarama doğrultusuna dik olan 2 boyutlu bir düzleme yansıtılmalıdır. İkinci olarak, en küçük alanlı bir sınırlayıcı dikdörtgen hesaplanır. Yaklaştırma nedeniyle oluşan olası hataları telafi etmek için sınırlayıcı dikdörtgen $l_{\text{şerit}} / 2$ kadar ötelenmelidir. Lazer şeridinin ve tarama yolunun doğrultusu y- ve x- eksenlerine sırasıyla paralel olduğu için sınırlayıcı bir dikdörtgenin kenarları da y- ve x- eksenine paraleldir. Sınır verilerinin elde edilmesi ve yüzey uydurma işlemini kolaylaştırmak için y- eksenini boyunca bir alt dikdörtgenin genişliği lazer şeridinden 1-2 mm daha kısadır.

Taranan alan, tarama yolu boyunca lazer şeridi tarafından süpürülen alandır. Bu nedenle tüm örnekleme noktaları tarama alanına dahil edilmelidir.

3.12.2.4. DOF Ve Oklüzyon Kontrolü

Tarama yolunun oluşturulmasının ardından tarama doğrultusunun doğrulanması için DOF ve oklüzyon sınırlamaları kontrol edilmelidir. Işının yüzey ile temas ettiği tüm noktalar DOF bölgesinde yer alıyorsa bölge taranabilir.

Oklüzyon kontrolü DOF kontrolü için kullanılabilecek bir algoritma kullanır. Pratikte bir nokta yansıtılan ışın sensörlerden birine ulaşana dek taranabilir. Bununla beraber daha güvenilir sonuçlar için bir noktanın sadece yansıtılan ışın probun her iki sensörüne de ulaşınca taranabilir olduğu varsayılır. İki CCD kamera sensörünü bağlayan üçgen ve taranacak nokta oklüzyon kontrolü için kullanılır. Şayet üçgenin herhangi bir kenarı yüzeye müdahale ediyorsa bir oklüzyon söz konusudur.

Pek çok düz yüzey için bir başlangıç tarama planı iyi işler. Bununla birlikte tarama planı uygulanabilir değilse sorunu çözmek için bir geri bildirim algoritması uygulanmalıdır. Geri bildirim algoritması problemin olduğu yerdeki bölgenin şeklini dikkate katarak izlenecek yolu belirler.

Bir DOF veya oklüzyon problemi oluştuğunda taranamayan noktaların tarama planındaki diğer tarama doğrultuları kullanılarak taranıp taranamayacağı araştırılmalıdır. Şayet tarama yapılabiliyorsa ilk tarama planı halen geçerlidir. Şayet bu noktalar herhangi bir diğer doğrultu ile taranamıyorsa tarama doğrultusu değiştirilmeli veya ilave bir tarama doğrultusu oluşturulmalıdır.

DOF koşulunun ihlali nedeniyle taranamayan noktalar, tarama doğrultusunu x- ekseni etrafında döndürerek taranabilir. Bununla beraber oklüzyondan dolayı taranamayan noktalar, tarama doğrultusu y- ekseni etrafında döndürülerek taranabilir. Bazı noktalar her iki koşulun da ihlali nedeniyle taranamaz ki bu durum

her iki eksenin rotasyonunu gerektirir. Taranamayan tüm noktalar için dönme doğrultuları birbirleriyle çakışırsa yeni bir tarama doğrultusu ilave edilmelidir.

Değiştirilmiş doğrultu veya yeni ek doğrultu belirlendikten sonra tarama sınırlarını kontrol eden aynı prosedür uygulanır ve uygun tarama planı oluşturulana dek geri bildirim döngüsü yürütülür.

3.12.3. Otomasyonlu Lazer Tarama

3.12.3.1. Lazer Tarama Sistemi ve Parça Düzeneği

Otomasyonlu tarama sistemi bir lazer tarayıcı ve motorize döner bir tabla kullanılarak gerçekleştirilir. Lazer tarayıcı üç ortagonal taşıma eksenli ve döner problu şerit tipi bir cihazdır. Bir parçayı herhangi bir doğrultudan taramak için sistemin altı serbestlik derecesi olmalıdır. Lazer tarayıcının dört serbestlik derecesi olduğundan geri kalan iki serbestlik derecesi döner tabla ile sağlanır.

Tarama planını ve tarama yolunu doğrulamak için bir alüminyum iş parçası makinede işlenerek hazırlanır. Test parçası kompleks bir serbest yüzey ve beş düzlemsel yüzeyden oluşur. Test parçasının serbest yüzey yaması kasıtlı olarak tasarlanmıştır, böylece üç eksenli CNC tipi lazer tarayıcı kullanılarak bir seferde taranamaz.

Taramayı ve toplanan nokta verilerinin kaydını otomasyonlu hale getirmek için bir parça düzeneği prosesi gereklidir. Test parçası motorize döner tablanın üzerine yerleştirilmelidir. İlk önce döner tablanın her eksenli lazer tarayıcının üzerine monte edilmiş skala göstergesi kullanılarak lazer tarayıcının eksenli ile hizalanmalıdır. İkinci olarak özel olarak tasarlanmış bir fikstür döner tablanın üzerine yerleştirilir. Test parçası fikstürün içine yerleştirilecektir.

Döner tablanın her eksenli arasındaki ilişki ve özellikler zaten bilinmektedir. Bu nedenle test parçasını yerine tespit etmek için döner tablanın en az iki dönme merkezi gereklidir. Bu çalışmada döner tabla X- eksenli ve Z- eksenli etrafında

döndürülmektedir. Döner tabla X- ve Z- eksenini etrafında döndürülürken hassas bir takım bilyesi bir kaç defa taranır. Merkez noktaları bir çembere uydurularak her eksen için dönme merkezi hesaplanır. Nokta verileri bir küreye uydurularak takım bilyesinin merkezi de hesaplanır. Sonuç olarak parçanın yerinin tespiti için bütün eksen bilgileri hazırlanır. Ardından oluşturulan tarama yolları eksen bilgileri kullanılarak lazer tarayıcının koordinat sistemine eşlenmelidir.

3.12.3.2. Tarama Yollarının Koordinat Dönüşümü

Yukarıda belirtildiği gibi tarama yolları lazer tarayıcının koordinat sistemine eşlenmelidir çünkü yüzey modelinin ve lazer tarayıcının kendi koordinat sistemleri vardır. Farklı sistemleri kesiştirmek için koordinat dönüşümü gereklidir. Dönüşüm için tarama doğrultusundan her eksen için dönme açısı ve koordinat dönüşümü için kullanılan aktarım değeri hesaplanır.

Koordinat dönüşüm matrisi şu şekildedir:

$$[M] = [T]_{\text{Model}}^{\text{Rotary table}} [R]_{X\text{-axis}}^{\theta} [R]_{Y\text{-axis}}^{\phi}$$

$[T]_{\text{Model}}^{\text{Rotary table}}$ matrisi tarama yollarını model ekseninden döner tablanın eksenine aktarır ve

$[R]_{X\text{-axis}}^{\theta}$ matrisi de tarama yollarını x- eksenini boyunca θ kadar döndürür.

Bu nedenle nihai tarama yolları $[M]$ matrisi kullanılarak hesaplanabilir ve dönüşümün matris formu şu şekildedir :

$$[\text{Son tarama yolu}] = [\text{Tarama yolu}]_{\text{Model}} [M]$$

$[Tarama\ yolu]_{Model}$ matrisi tarama yolu oluşturma modülünde oluşturulan tarama yollarıdır. Sonuç olarak lazer tarama sistemine indirilen son tarama yolları hazırlanır.

3.12.3.3. Otomasyonlu Tarama ve Çakıştırma

Pek çok ölçüm sistemi kendi tarama yazılımlarına ve dosya formatlarına sahiptir. Bu nedenle tarama planını tarama sisteminin okuyabileceği belirli bir dosya formatına çevirmek gerekir. Bu çalışmada kullanılan lazer tarayıcı DATASCULPT adı verilen özel bir yazılım paketi ile çalıştırılır ve bu yüzden oluşturulan plan SCN ikili dosya formatına çevrilir.

Çevrilmiş tarama planını lazer tarama sistemine indirdikten sonra test parçasının otomasyonlu bir tarama operasyonu gerçekleştirilir. Lazer ışının beklenmeyen yansımalarını önlemek için test parçasının üst yüzeyine beyaz pudra püskürtülür. Lazer tarayıcı 15 mm genişliğinde yarı iletken bir lazer probu kullanır ve bu prob her tarama için 240 nokta toplayabilir. Test parçası iki doğrultuda tarandı ve toplam tarama süresi 0.5 mm adımla yaklaşık 10 dakika sürdü.

Tüm yüzeyi taradıktan sonra tüm yüzey modelini tekrar oluşturmak için taranan nokta verisi bir koordinat çerçevesi altında kaydedilmelidir. Bu proses otomatik olarak gerçekleştirilebilir çünkü eksen bilgisi halihazırda bilinmektedir. Bunun gibi otomasyonlu bir çakıştırma prosesi sıkıcı veri prosesleme işini önleyerek süreden kazanç sağlayabilir. Bununla beraber elde edilen nokta verisi çok büyük olduğu için daha sonra yapılacak yüzey modelleme ve NC kodu oluşturma işlemlerinden önce boyutunun azaltılması gerekir.

3.12.3.4. Tarama Verilerinin Analizi

Taranmış nokta verisi genellikle hareketli sistemden, sensörden ve konumlama sisteminden dolayı hata içerir. Hatalar, eğriliklerde ve uydurulan yüzeyin normal vektörlerindeki değişiklikler kullanılarak gözlemlenebilir.

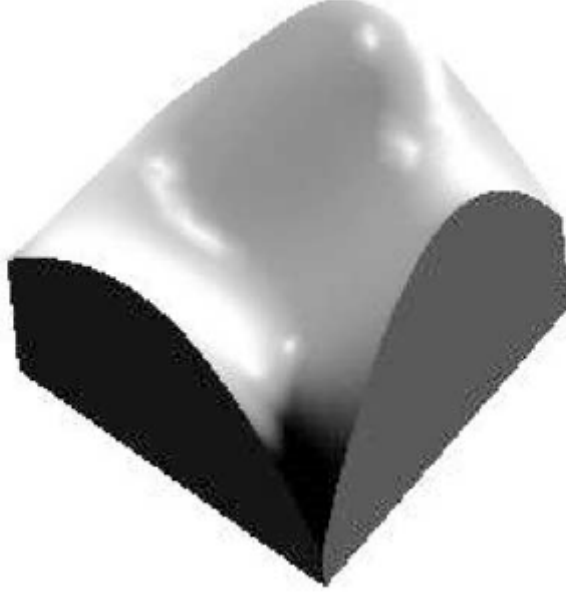
Lazer tarama sisteminin ve çakıştırma prosesinin hassasiyetini doğrulamak için nominal CAD modeli ile her noktada ölülen nokta verisi arasındaki sapma doğrudan hesaplanır. Sapma haritası parça için açık bir ölüm hata aralığı verir.

Ölçülen nokta verisinin kalitesini analiz etmek için bir veri lokalizasyon prosesi yürütülmelidir. Veri lokalizasyonu aynı referansta CAD modeli gibi öllmş bir nokta verisi belirler. Tipik olarak öllen veriler 3-2-1 uydurması, en küçük kareler uydurması veya min-maks. uydurma gibi değişik tip veri uydurma yöntemleri ile bir hedef geometrisine veya CAD modeline aktarılır. Veri lokalizasyon yönteminin seçimi parçanın şekline ve gerekli toleransa bağlıdır.

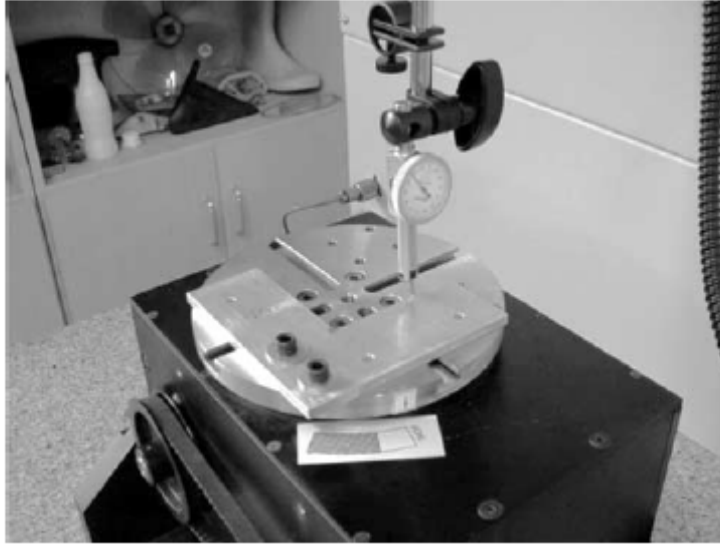
Bu sistemde veri lokalizasyon prosesi koordinat dönüştürme yöntemi kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilir çünkü öllen veri ile CAD modeli arasındaki ilişki zaten hesaplanmıştır. şekil 3.13’de lazer tarama sistemi gösterilmiştir. şekil 3.14’de test parçası gösterilmiş ve şekil 3.15’de de fikştrn ve döner tablanın düzenlenmesi gösterilmiştir.



şekil 3.13; Lazer tarama sistemi



Şekil 3.14; Test parçası

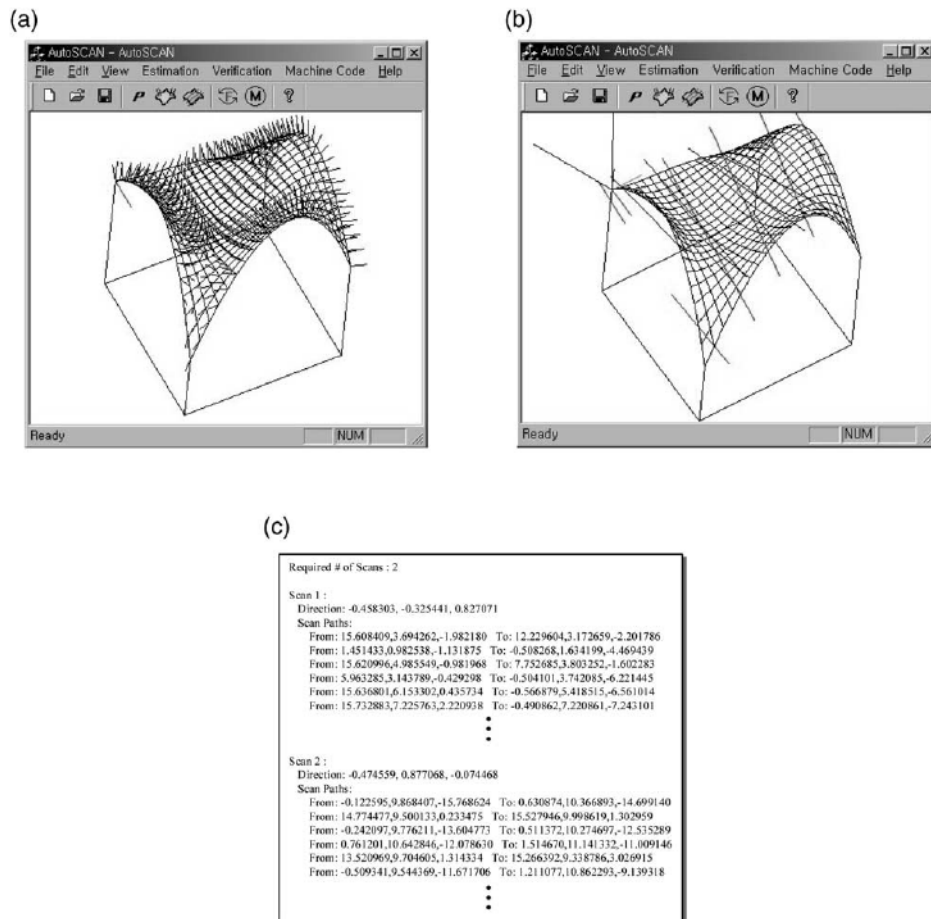


Şekil 3.15; Fikstürün ve döner tablanın düzenlenmesi

Son hata ise döner tabladan, lazer tarayıcıdan, fikstürden, spreyl malzemesinden ve parça düzeneği yönteminden alınan tüm hata kaynaklarının ilave edilmesidir. Ölçülen verinin hassasiyetini arttırmak için tarama cihazının, parça düzeneğinin seçimi ve tarama planının oluşturulması çok önemlidir.

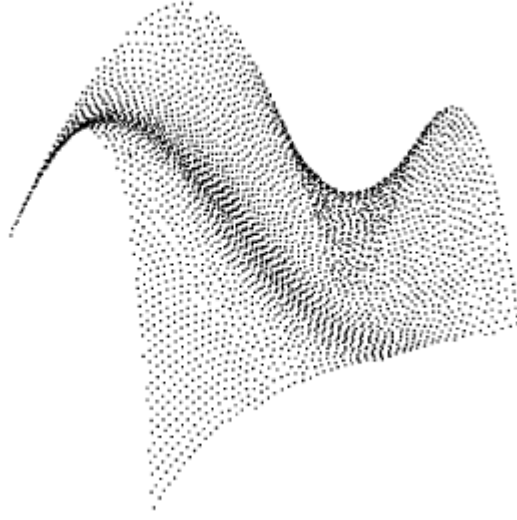
3.12.4. Değerlendirme

Otomasyonlu bir lazer tarama sisteminde CAD modeli verilmiş kompleks bir serbest parçayı inceleyerek otomatik olarak bir tarama planı oluşturabilir. Tarama planı tarama sayısı, tarama doğrultusu ve tarama yollarını içerir. Ayrıca, dönme açısı ve koordinat dönüşümü için gerekli aktarma değeri tarama doğrultusu bilgisinden çıkarılır. Bu değerler yardımıyla parça otomatik olarak konumlanabilir ve motorize bir döner tabla ile kısa bir sürede kesin olarak taranabilir. Otomasyonlu parça konumlama sistemi zamandan tasarruf sağlayabilir ve toplanan verilerin kalitesini arttırabilir. Ayrıca, çakıştırma prosesi basitleştirilir ve gereksiz veri prosesleme etkili bir şekilde azaltılarak operatör tarafından neden olunan hatalar en aza indirilebilir. Aşağıda oluşturulan tarama planı verilmiştir.

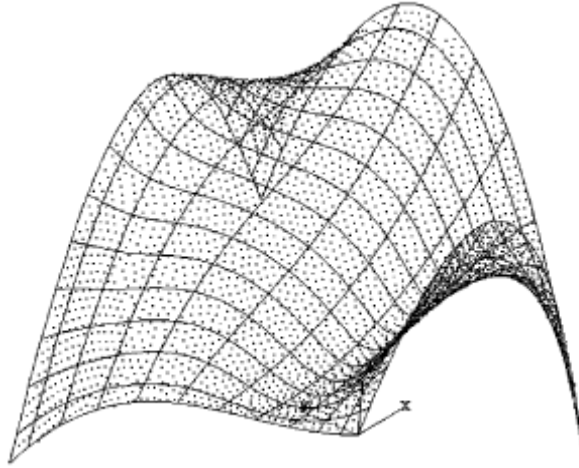


Şekil 3.16; Oluşturulan tarama planı : (a) normallerle yüzey modeli ; (b) tarama doğrultuları ve (c) tarama yolunun tarama rotası

Şekil 3.17’de çakıştırma tarama verisi verilirken Şekil 3.18’de de veri lokalizasyonunun sonuçları gösterilmiştir.

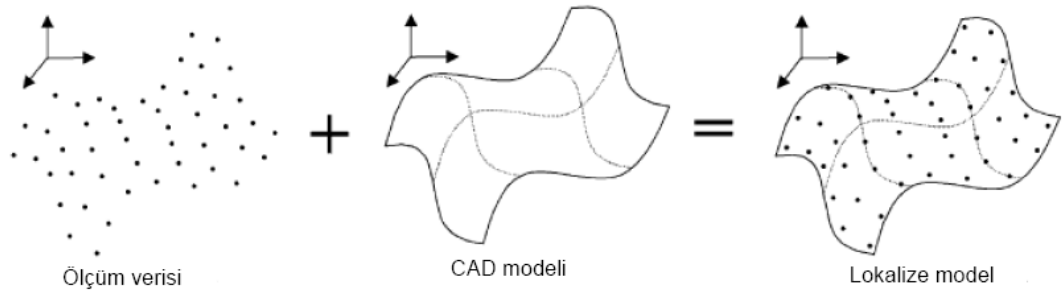


Şekil 3.17; Çakıştırma tarama verisi



Şekil 3.18; Veri lokalizasyonunun sonuçları

Şekil 3.19’da da veri lokalizasyonu şematik olarak ve aşamalar halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.19; Veri lokalizasyonu

3.13. Bir Video Kameradan Yararlanan Üç Boyutlu Tarayıcı Yazılımı

Bugünlerde lazer sistemlerini kullanarak objelerin üç boyutlu modellerini oluşturabilen yazılımlar mevcuttur ancak bunlar veri toplama için (lazer tarayıcı) için kullanılan yüksek teknolojiden dolayı oldukça pahalıdır (120.000 Euro'ya varan miktarlar). Öte yandan bu çalışmada bahsedilen yazılım veriyi basit bir dijital video kamera ve motorize bir tabanla toplayan (1200 Euro) yeni bir proses geliştirmiştir. Bu sayede objenin 1300'den fazla görüntüsü elde edilir. Bu görüntülerin tümünün kenarlarının sonradan analiz edilmesi objenin geometrisini tam anlamıyla verecektir. Yani bu yazılım yüz ile bir milyon nokta arasında değişen bir çözünürlükle bu yazılım hassas dijital modeller oluşturabilecektir. Bu üç boyutlu modelleri aktarmak için yazılım VRML veya ASCII dosyaları oluşturur. Bu modeller bilgisayar grafiği, mimarlık, mekanik, otomatik eşleme / tesis yönetimi gibi dallarda oldukça kullanışlıdır.

Bu çalışmanın amacı araştırma algoritmalarının uygulaması için geliştirilmiş yazılımın işletimi, farklı fazları ve fonksiyonelliğini göstermektir. Bu yazılımın baz aldığı algoritma patentlenmiştir.

Bu yazılım küçük objelerin basit ve ucuz bir yolla üç boyutlu modellerinin yapılmasına olanak tanır (üç boyutlularda yaklaşık 50 cm). Halihazırda lazer sistemlerine dayanan çok daha pahalı yazılımlar bulunmaktadır.

Kullanılan malzeme geleneksel bir dijital video alıcısı ve ses çakıştırma cihazı (Sony DCR-TRV30E) ve motorize bir stand ihtiva eder ve bu şekil 3.20’de gösterilmiştir (televizyon için motorize tepsi).



şekil 3.20; Motorlu platform

3.13.1. Metodoloji

Bir objenin üç boyutlu koordinatlarını elde etmek için bu çalışmada önerilen metodoloji birbirine benzeyen noktaların tanımlanması için stereoskopik görüntü aracılığı ile manuel bir şekilde veya görüntü korelasyonunu kullanarak otomatik bir şekilde olmak üzere iyi bilinen teknikleri baz almaz. Prosedürün prensibi objenin üç boyutlu modelini elde etmek için yer aldığı tüm görüntülerde objenin çevresini tanımlayan (arka plan ile obje arasındaki sınır) geometrinin incelenmesini içerir.

şekil 3.20’deki motorize bir platform kullanılarak prosedür şu şekilde açıklanabilir: kontrol noktalarının koordinatları bazı görüntülerde tanımlanır, bu kontrol noktaları modellenenecek objenin yerleştirildiği platformun üzerine konumlanır (bu işlem manuel olarak yapılması gereken tek işlemdir). Ardından sistem geometrisinin tam bir ayarlaması yapılır, yani platformun koşullarını ve geometrisini tanımlayan tüm değişkenler matematiksel bir ayarlama ile bilinen yaklaşık değerler dengelenir. Bu parametreler bilinince objenin modellenmesi iki aşamada elde edilir. İlk adım objenin videonun her görüntüsünde çıkarılması ve korelasyon, uzay alanında filtreler ve süreksizliklerin tespit edilmesi gibi pek çok yöntem ile sınırlarının belirlenmesidir. İkinci adımda tüm videoda her görüntünün sınırının her

noktasını tanımlayan izdüşüm ışınlarından objeyi modellemek üzere bir algoritma üzerine çalışılmıştır.

3.13.2. Veri Toplama

Video çekimi, 50 cm maksimum ölçülere sahip bir objenin 360 derecelik tam bir dönüş sonucu verilerinin toplanmasıdır. Bunun için kamera bir üç ayağın üzerine yerleştirilmiştir ve obje kendisine adapte edilmiş motorlu bir platform yardımı ile 360 derece tamamlanan dek yavaşça döndürülmektedir. Platform, yaklaşık 53 saniyede tam bir dönüş yapacak şekilde 0.12 rad/s bir hızla dönmektedir. PAL sisteminin kullanıldığı (saniyede 50 kare, sadece çift veya tek kareler kullanılmaktadır) göz önünde bulundurulunca tam bir dönüşün yaklaşık 1325 görüntü anlamına geleceği düşünülmelidir. Hem platformun açısal hızı hem de kare oranı iki seri bölge arasında fazladan bilgiyi barındırmayacak biçimde 0.5 ila 1 piksellik görüntü değişimi sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Bu örnekte 40 cm yüksekliğinde bir büst kullanacağız. Şekil 3.21’de de görüleceği üzere modellenen obje motorlu platformun üzerine yerleştirilmiştir. Ardından, platform hareket halinde iken video çekimi gerçekleştirilir. Sonuç, yaklaşık 53 saniyelik bir video çekimi olacaktır.

Kamera kaydedici çıkıştırma için miniDV formatını kullanmaktadır. Bu dijital format her görüntü için 720x576 piksellik (PAL) bir çözünürlük ve yaklaşık 3.5 MB/s’lik bir aktarım hızı ile MPEG2 formatından daha yüksek bir kaliteye sahiptir.

Bir sonraki adım, videonun bilgisayara aktarımı olacaktır. Bu işlem, piyasadaki herhangi bir yazılım kullanılarak yapılabilir (mesela adobe premier veya videonun spesifik bir yazılımı). Bu sayede objenin her dönüşünde 185 MB’lık bir dijital video dosyası elde edilecektir.

Sonuç olarak, metodolojinin uygulanması için platformun iki tam dönüşüne gereksinim vardır; ilki Şekil 3.21(a)’da görüldüğü gibi kameranın geometrik ayarının ve kalibrasyonunun yapılması ve ikincisi de daha yüksek bir platform olmadan

objenin yaklaşık 2 dakika boyunca tamamen görünür olmasını sağlamak ve bu sayede sınırları tespit etmektir (üst platformun ayaklarının görüntüsünün otomatik olarak yok edilmesi, oldukça zor bir dijital görüntü işleme gerektirir. Böylece, bu araştırmanın temel amacına ulaşmak oldukça güçleşebilir).

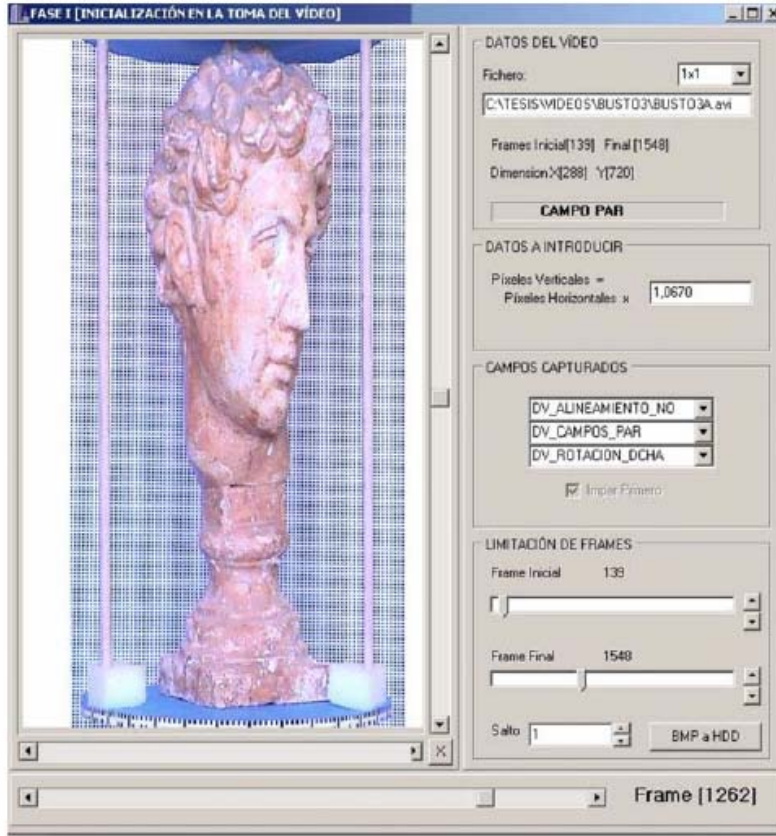
Bu yüzden objenin üç boyutlu çalışmasını yürütmek için videonun süresi yaklaşık 2 dakika olacaktır ki bu miniDV formatında 420MB'lık bir dosya boyutu anlamına gelmektedir (sıkıştırma olmadan 3600 MB).

Bu ilk adımda objenin ilk turuna tekabül eden görüntü dizisi belirlenmelidir. Şekil 3.22'de de görüldüğü üzere bu örnekte ilk görüntü 139. kareye ve sonuncu da 1548. kareye tekabül etmektedir. Her görüntü 720x288 piksellik bir çözünürlüğe sahiptir.

Bir sonraki adım sistem geometrisinin ayarlanmasıdır. Bu amaçla sadece video dizisinin bazı görüntüleri (altı veya yedi) kullanılmaktadır.



Şekil 3.21; Büstten modele (a) ilk tur, (b) ikinci tur



Şekil 3.22; Video çekiminin başlangıcı

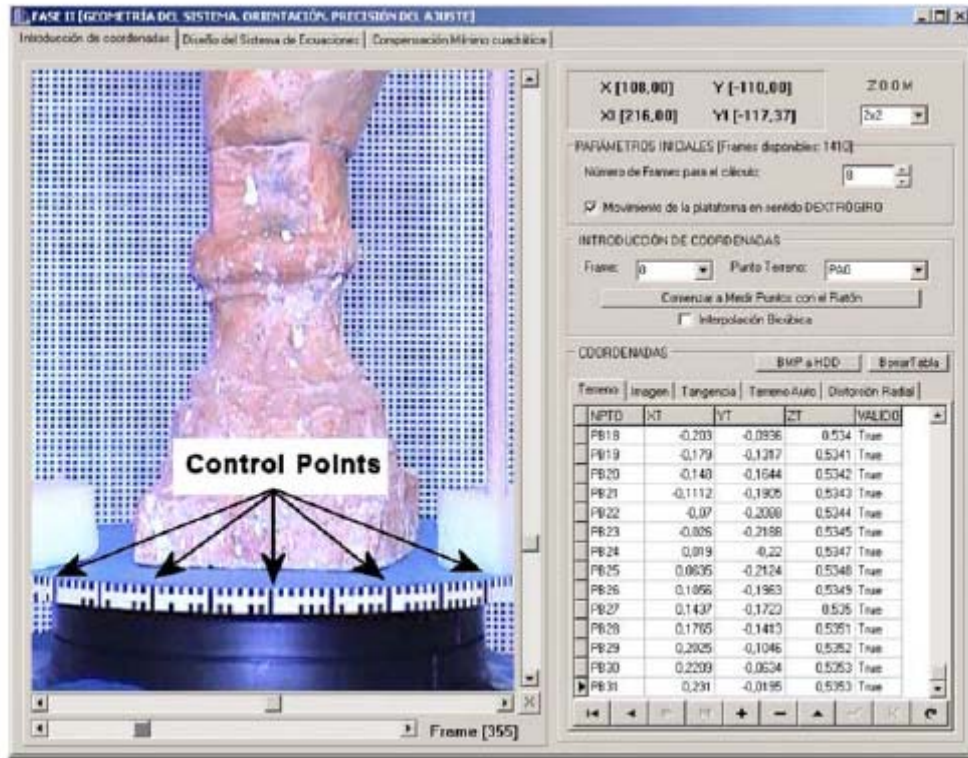
3.13.3. Sistem Kalibrasyonu

Bu aşama matematiksel açıdan en kompleks bölümdür. Video dizisinin bazı görüntülerindeki tanımlanmış bazı kontrol noktalarından başlayarak (6-8 görüntü), program kameranın parametrelerini hesaplayacaktır (odak uzaklığı, geometrik distorsiyon). Kameranın motorlu platformun pozisyonunu tanımlayan tüm parametreleri (kameradan platforma olan uzaklık, platformun hızı, platformun eğikliği) otomatik bir şekilde hesaplanacaktır.

Kontrol noktalarının tanımlanması, kullanıcın manuel olarak yapması gereken tek görevdir. Şekil 3.23, görüntü üzerinde ölçülen bazı kontrol noktalarını göstermektedir. Tanımlanmasını kolaylaştırmak için platformun sınırlarına kodlu etiketler yerleştirilmiştir. Büst örneğinde ölçülen kontrol noktalarının görüntü numaraları şöyledir: 0, 176, 353, 529, 705, 881, 1058 ve 1234 (seri iki görüntü

arasındaki ayrım yaklaşık 45 derece). 0 numaralı kare aslında 139 numaradır (ilk dönüşün başlangıcı).

Ölçülen tüm bu noktalarla yazılım ikinci dereceden minimum bir ayardan yararlanarak kalibrasyon sisteminin değerlerini hesaplar.



Şekil 3.23; Kontrol noktaları (görüntü karesi 355)

3.13.4. Obje Sınırlarının Belirlenmesi

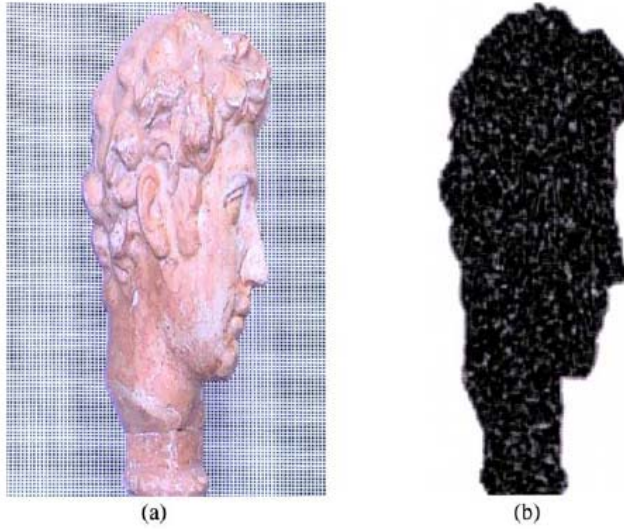
Objenin sınırlarını belirlemek ve ilgili koordinatları bir veri tabanında saklayarak prosesin sonraki aşamasında bunları kullanmak için objenin görüntülerini ve video dizisindeki tüm görüntülerdeki arka planı tanımlamak gerekir.

Bunun için Şekil 3.21(b)'deki gibi platformun ikinci turuna tekabül eden görüntüler kullanılacaktır. İlk görüntü 2363 no'lu ve sonuncu da 3735 no'lu kareye

denk gelmektedir. Bu yolla büstün sınırlarının tespit edileceği 1373 görüntü bulunmaktadır.

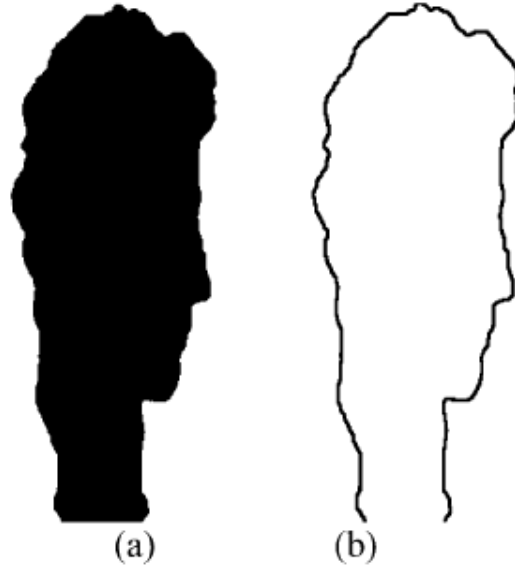
Obje görüntüsü ile arka planı ayırmanın en iyi yolu objenin arkasına objeden çok farklı bir yapıya sahip bir panel yerleştirmektir. Bunun için beyaz ve siyah karelerden oluşan bazı yapıları barındıracak şekilde bir panel tasarlanmıştır. Bu karelerin boyutları yaklaşık 2 pikseldir (bu boyut 3x3 veya 5x5 piksellik bir matris ile korelasyon algoritmalarını kullanmak için uygundur). Objeye sınırını gerektiği gibi belirleme prosedürü aşağıdaki adımlardan oluşur:

Uygun boyutlu bir matris kullanılarak arka plan görüntülü korelasyon operatörünün uygulanması. En iyi sonuçlar, Şekil 3.24(b)'deki gibi üç renkli bant ve sonradan ortalama kullanılarak 5x5 boyutunda bir matris ile elde edilir.



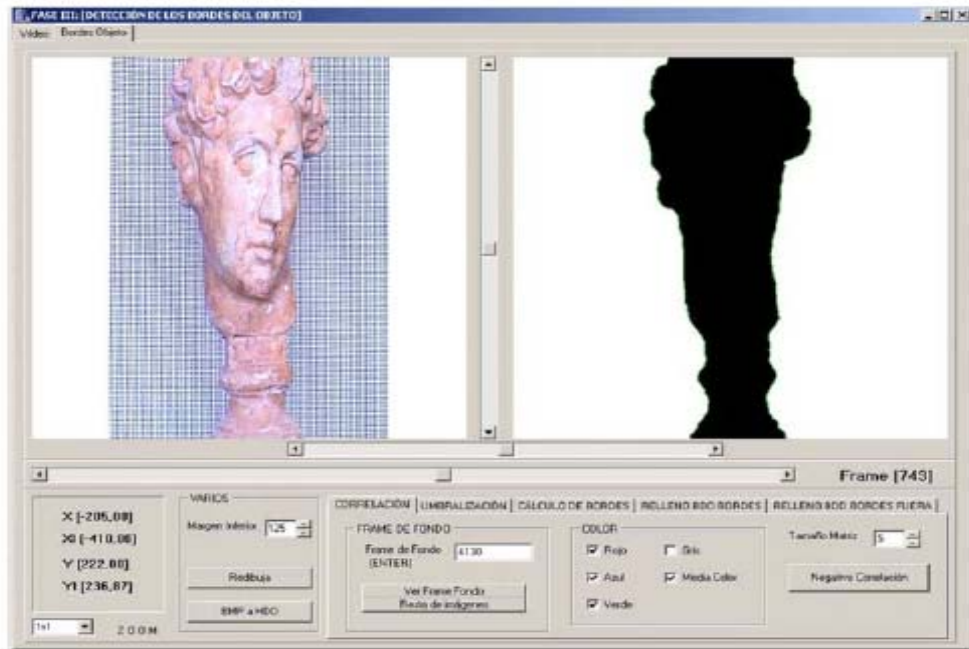
Şekil 3.24; Orijinal görüntü (a) ve kontrol görüntüsü (b)

Görüntüdeki olası parazitlerin giderilmesi ve bir basamak uygulaması ile ikili bir görüntünün oluşturulması için uzay alanında bir filtrenin seçilmesi Şekil 3.25(a)'da gösterilmiştir. Sınırın görüntü piksellerinin lokalizasyonu ise Şekil 3.25(b)'de verilmiştir.



Şekil 3.25; İkili görüntü (a) ve sınır tespiti (b)

Şekil 3.26, tüm bu görevlerin bir görüntüye uygulanması için geliştirilmiş araçları göstermektedir. Açıklanan proses obje sınırlarının piksel koordinatlarını bir veri tabanında saklayacak şekilde tüm video dizisi için otomatik olarak tekrarlanmıştır.



Şekil 3.26; Obje sınırlarını belirleme aracı

Bu durumda yazılım tüm video dizisinde objenin sınır parçalarını oluşturan 1.5 milyondan fazla nokta tespit etmiştir. Tüm bu noktalar objenin üç boyutlu modelini otomatik olarak hesaplamak için kullanılır.

3.13.5. Objenin Modellenmesi

Çalışmanın bu aşamasında Şekil 3.27’de verildiği üzere tüm video dizisi görüntülerinin sınır piksel koordinatları ile bir veri tablosu oluşturulmuştur. Bu örnekte her biri (1373 görüntü) 1.5 milyondan fazla noktaya sahip bir veri tablosu içeren yaklaşık 1200 sınır noktası içerir. Önceden, yazılım en küçük kareler yöntemi ile sistem kalibrasyon parametrelerinin değerini hesapladı. Bu yolla kameranın uzayda X, Y, Z koordinatlarını ve ayrıca her bir sınır noktasını konumlamak mümkündür.

CORRELACIÓN UMBRALIZACIÓN CÁLCULO DE BORDES RELLENO BDD BORDES					
Frame actual	FRAME	NPTO	XI	YI	
Frame actual -> BDD	0	0	141	91	
Todos los frames -> BDD	0	1	142	91	
Para el proceso	0	2	143	91	
Puntos Totales:	0	3	144	91	
1649137	0	4	145	91	
Tiempo	0	5	146	91	
Tiempo					

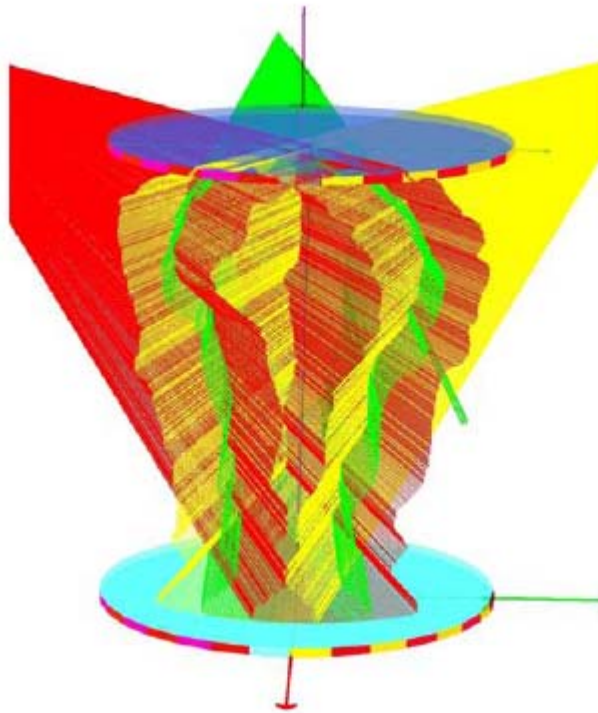
Şekil 3.27; Sınır noktaları (1.649.137 sıra)

Yazılımı kolaylıkla tanımlamanın en iyi yolu açıklayıcı grafikler kullanmaktır. Şekil 3.28 (üst görünüş) ve Şekil 3.29 (yan görünüş) kameranın pozisyonunu üç farklı görüntüye tekabül eden tüm sınır noktaları ile birleştiren düz çizgileri göstermektedir (ikinci platform turunun 642, 698 ve 752 numaralı görüntüleri).

Tüm bu düz çizgiler Şekil 3.29’daki gibi büstü modele göre maskeler; bu sayede sadece üç görüntüyü kullanmak yerine mevcut 1373 görüntü kullanılırsa obje, tüm video dizisi görüntüleri tarafından oluşturulan tüm kapsama alanları arasından kesişim veya ortak bir alanla tanımlanacaktır.



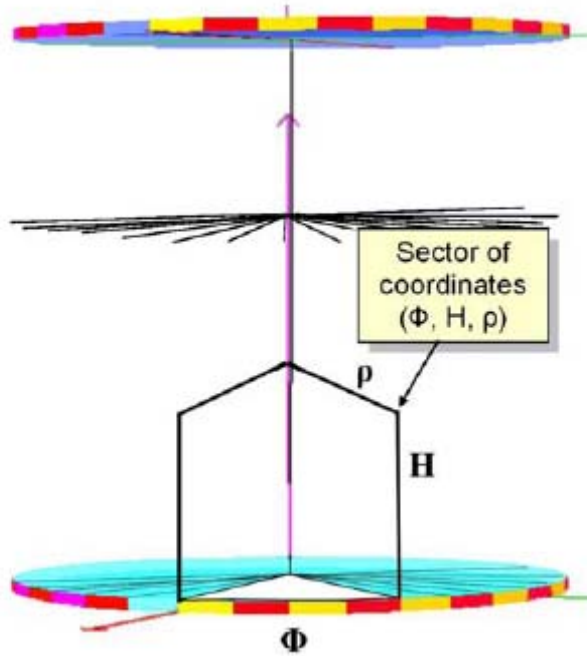
Şekil 3.28; Kamera ve obje arasındaki düz çizgiler (üstten görünüş)



Şekil 3.29; Kamera ve obje arasındaki düz çizgiler (yandan görünüş)

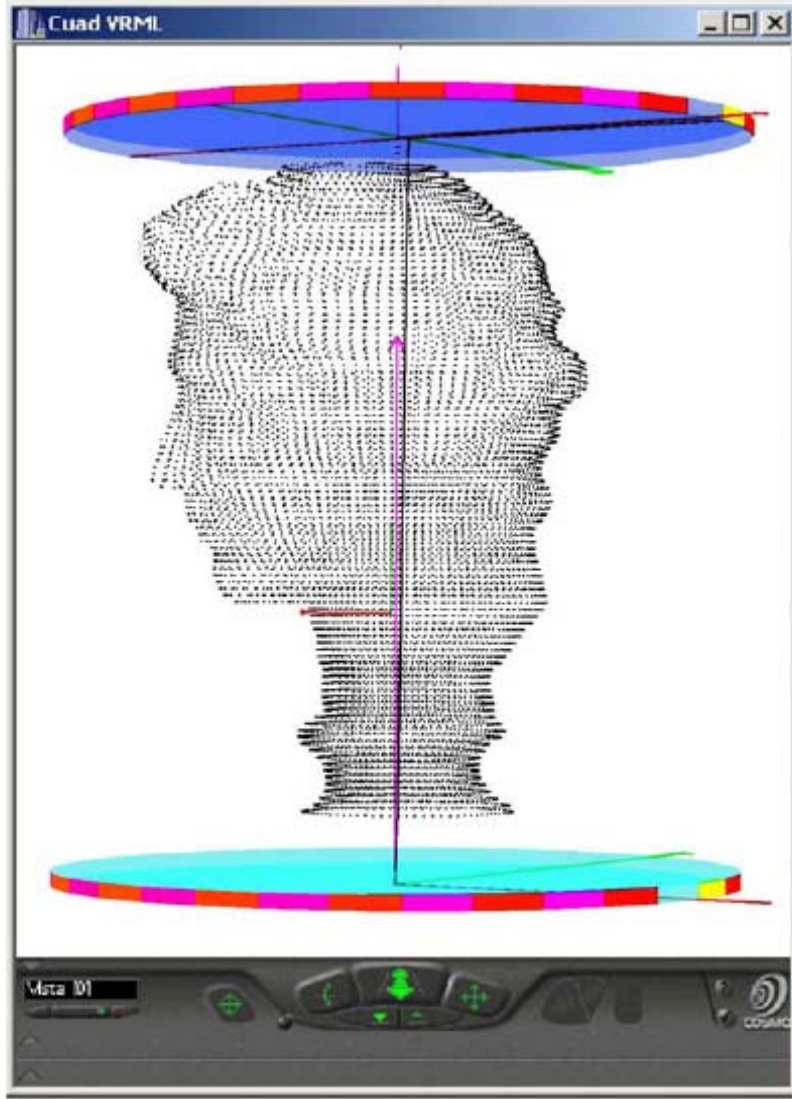
Bu kesişimleri gerçekleştirmek için kullanılan koordinat sistemi Şekil 3.30'daki gibi silindirik bir sistemdir; yani model belirli bir çözünürlüğe sahip

sektörler ile oluşturulacaktır (her yatay düzlemdeki sektör sayısı ve yatay düzlem sayısı). Her sektör, yüzeyi üzerinde, x-ekseni üzerinde bir (Φ) açısı, alt platformdaki bir yükseklik (H) ve z-ekseninde bir yarıçap (ρ) ile tanımlanan bir noktada obje ile kesişecektir.



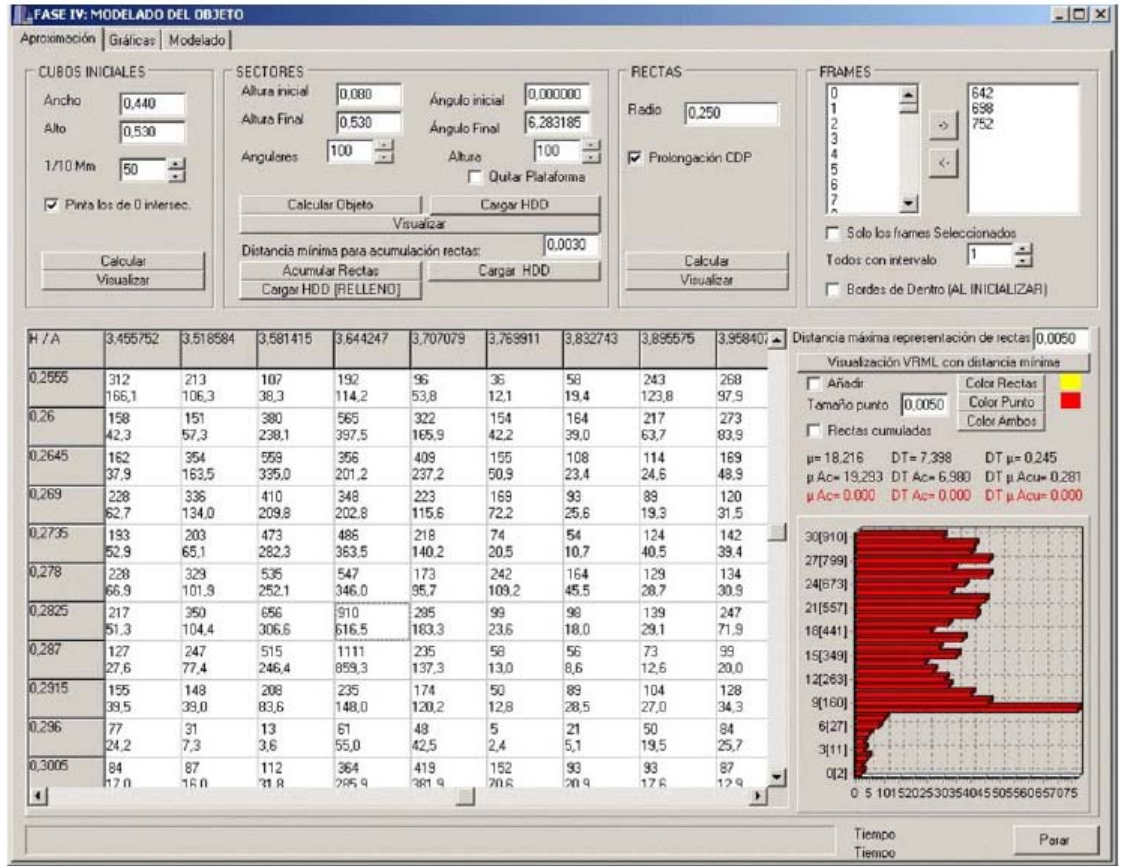
Şekil 3.30; Kullanılan koordinat sistemleri

Bu yolla objenin üç boyutlu modellemesinin çözünürlüğü sektör sayısına göre tanımlanabilir. Bu değişkenler Şekil 3.32'deki yazılımda yapılandırılmıştır. Bu durumda modeli oluşturmak için kullanılan nokta sayısı 10.000 olacaktır (100x100 sektör). Modelin hesaplanma süresi çözünürlüğüne bağlıdır. Şekil 3.31'deki gibi 10.000 noktalı bir model yaklaşık 1 dakika ve 500.000 noktalı bir model de yaklaşık 6 dakika sürer (bu süreler sıradan bir kişisel bilgisayar kullanılarak belirlenmiştir).

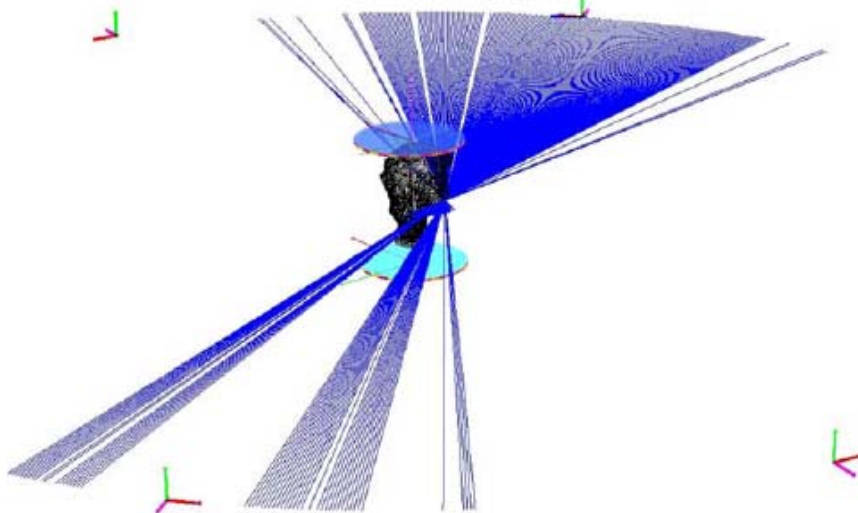


Şekil 3.31; 10.000 nokta kullanılarak modellenen büst

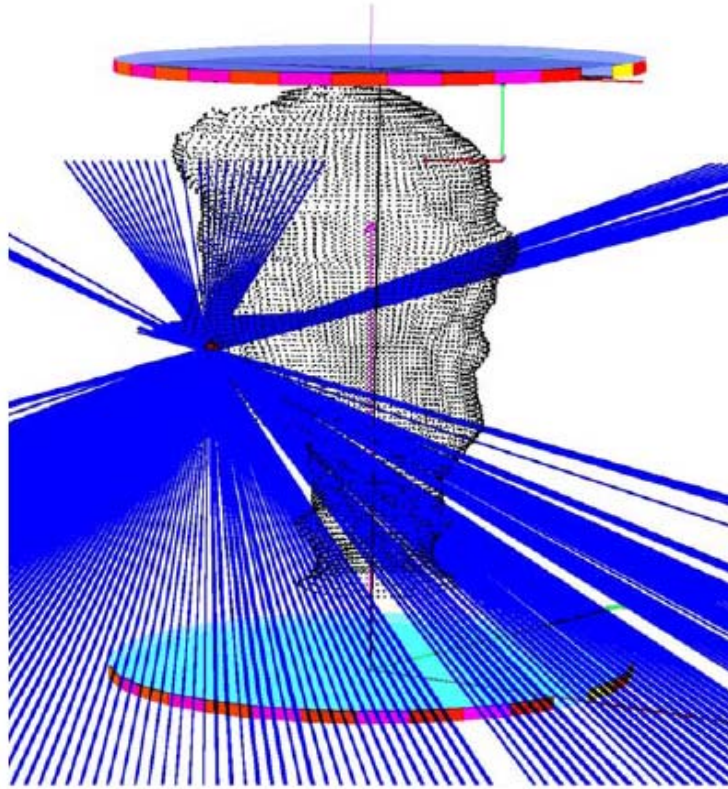
Şekil 3.32'deki ızgara modelin her bir noktasını hesaplamak için kullanılan düz çizgi sayısını göstermektedir. Örneğin, koordinat sektörlerini hesaplamak için $(3.644247 \Phi, 0.2825 H)$ yazılım 910 düz çizgiden yararlanmıştır. Şekil 3.33 ve 3.34 bunların hangilerinin düz çizgi olduklarını grafiksel bir yolla göstermektedir.



Şekil 3.32; Modelleme aracı



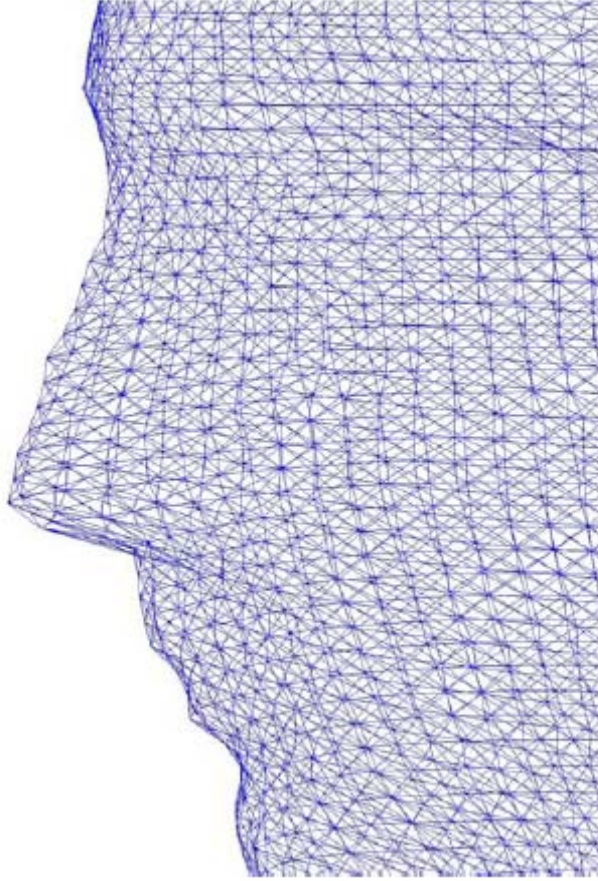
Şekil 3.33; Bir model noktası tanımlamak için kullanılan düz çizgiler (yanal görüş)



Şekil 3.34; Bir model noktasını tanımlamak için kullanılan düz çizgiler (yan görünüş)

3.13.6. VRML Çıkış Dosyaları

Tüm sonuçların grafiksel gösterimi için VRML formatı kullanılmıştır. Bu sayede üç boyutlu modeli piyasadaki diğer yazılımlarla kullanabiliriz. Bu çalışmada sunulan yazılım noktaların Şekil 3.31'deki gibi üç boyutlu gösterimini, Şekil 3.35'deki gibi ağ yapısını, Şekil. 3.36'daki gibi yüzleri ve yapıları (görüntü piksel rengini kullanarak) oluşturabilmektedir.



Şekil 3.35; Ağ yapısı modeli (40.000 üçgen)



Şekil 3.36; Yapısal model (270.000 üçgen)

3.13.7. Değerlendirme

Bu çalışmada açıklanan yazılım gerçekleştirilmiş bir hassasiyet (2 mm)ve kullanıcı için daha basit bir yöntemle bir objenin üç boyutlu koordinatlarını elde etmeye olanak tanır. Bu yazılım lazer teknikleri ile yeni ve pahalı üç boyutlu tarayıcılara bir alternatiftir.

Sıradan bir cihaz kullanarak (dijital video kamera) verilen bir çözünürlük ve yüksek bir hassasiyet ile küçük objelerin üç boyutlu modellerini oluşturmak oldukça kolaydır.

Yazılım VRML veya ASCII dosyaları oluşturur. Bu modeller bilgisayar grafikleri, mimari, mekanik gibi alanlarda oldukça kullanışlıdır.

3.14. GOM Firmasının Ürünlerine Genel Bir Bakış

GOM firmasının ATOS ürünleri, genel anlamda bir 3 boyutlu sayısallaştırma sistemi olup fiziksel modelin yüksek hassasiyetle yüzeysel ölçümünü yaparak, topoğrafyasını çıkarmaktadır. Buradan elde edilen veriler ölçülen nesnenin 1:1 3-boyutlu modelini tanımlamakta ve başlıca aşağıdaki mühendislik çalışmalarında başarı ile kullanılmaktadır:

- Tersine Mühendislik; parçadan CAD modeli oluşturma
- Kalite Kontrol (3 boyutlu ölçüm ve CAD model ile karşılaştırma)
- Hızlı Prototipleme (Hızlı Prototip makinelerinden doğrudan üretim)
- Hızlı Frezeleme (STL veriden hızlı CNC program çıkarılması ve frezede üretim)
- Sayısal Model (CAD modeli olmayan parçaları bilgisayar ortamında montajlarda kullanma)
- Animasyon (karmaşık figürleri sanal ortamda temsil etme)

3.14.1. ATOS Sistem Tanıtımı

GOM 3D Sayısallaştırma çözümlerinde yüksek çözünürlükteki dijital fotoğraf makineleri ile çeşitli açılardan elde edilen görüntüler, gelişmiş fotogrametri tekniklerini kullanan Linux tabanlı özel bir yazılım ile IGES ve STL gibi 3 boyutlu standart veri formatlarına dönüştürülür. Bu sistemler yüksek hassasiyeti, kullanım kolaylığı ve hızı ile Dünya çapında birçok firmada başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar.

GOM 3D sayısallaştırma sistemleri ile bir parçanın 3D CAD verisinin elde edildiği "tersten mühendislik" uygulamalarına ek olarak, orijinal CAD verisi ile bu veriye bağlı olarak imal edilmiş parçanın 3D sayısallaştırma verisinin karşılaştırıldığı kalite kontrol uygulamaları da gün geçtikçe artmaktadır. Bu yönüyle GOM sistemleri

klasik CMM cihazlarından çok daha kolay, esnek, hızlı ve hassas bir şekilde gün geçtikçe artan karmaşık parçaların kalite kontrol ihtiyaçlarına çözüm sağlamaktadır. GOM 3D sayısallaştırma sistemlerinin rakiplerine olan önemli üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Kullanımı basit ve kolaydır
- Yansıtıcı (retro) işaretleyiciler (marker) yanında ucuz kağıt işaretleyiciler de başarıyla kullanılabilir.
- ATOS sistemlerinde ölçüm alanını değiştirmek ve yeniden kalibrasyon yapmak çok hızlı ve kolaydır.
- ATOS ölçüm kafası az yer kaplayan ve oturaklı bir yapıya sahiptir.
- Tarama sonrasında çok iyi bir veri kalitesi elde edilir.
- Hassas ve kolay kullanımlı geometrik özellik tespiti vardır.
- Elde edilen tarama verisinin bütünüyle ve parçalı olarak işlenmesi mümkündür.
- Her ölçüm sonrasında veri bütünlüğü açısından geri bildirim alınabilmesi.

ATOS sisteminde iki göz bulunması sayesinde çevrim içi görüntüleme yapılarak çekim sırasında parça veya kameranın titremesinden oluşan hatalar anında tespit edilerek yazılım tarafından ölçümün tekrarlanması tavsiye edilir.

- Kararlı bir işletim sistemi (Linux) üzerinde çalışan yine kararlı bir veri işleme yazılımı problem çıkarmadan ve kontrolsüz kilitlenmeler yaşamadan çalışır.

Elde edilen 3D tarama verisinin yeni yapılacak tasarımlarda referans olarak kullanılacağı tersten mühendislik uygulamalarında çok yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulmaz. Fakat günümüzde pazar payı sürekli artan kalite kontrol uygulamalarında ise en yüksek çözünürlük ve hassasiyete ihtiyaç duyulur. GOM sistemleri, özellikle birden fazla açıdan tarama yapılarak sonuçların entegre edilmesi gerektiği serbest formlu, karmaşık yüzeyli parçaların kalite kontrol amaçlı taranması konusunda en yüksek çözünürlük, hassasiyet ve hıza sahip olmasıyla dünyada rakipsizdir. Başka hiçbir CMM ve lazer tarayıcı bu performansa sahip değildir.

3.14.2. Atos Sistem Tipleri

GOM firmasının 3D sayısallaştırma sistemi ATOS'un 3 tipi mevcuttur. Bunlar ; ATOS I (0,8 M Pixel) , ATOS II (1,3 milyon pixel) ve ATOS III (4 milyon piksel ve kuvvetli ışık kaynağı).

3.14.2.1. ATOS II

ATOS II, ATOS model aralığının üst uç versiyonudur. Her tarama görünüşü 1.3 milyona kadar veri noktası yakalar.

Ölçüm hacmi 100x80x80mm³ ila 1200x960x960mm³ bir aralık arasında çeşitlilik göstermektedir. Yeni bir saçak projeksiyon prensibi kullanılarak veri kalitesi ATOS Standart versiyona kıyasla artırılmıştır. İlaveten kompleks objelerin sayısallaştırılması kolay ve hızlı bir hale gelmiştir.

ATOS II	
Ölçüm hacmi	100x80x80mm ³ ila 1200x960x960mm ³
Ölçüm mesafesi	200mm ila 1600mm
Kamera çözünürlüğü	1280 x 1024 piksel 12 bit (dijital)
Ölçüm süresi	yaklaşık 7 saniye
Ölçüler	520 x 220 x 110 mm ³ (Diğer uzunluklar: 700 mm, 940 mm)
Ağırlık	4.0 kg
Ölçüm noktası mesafesi	0.04 ila 1.0 mm
Ölçüm paraziti	0.002 ila 0.02 mm
Sonuçlar	parça dış çizgisi, nokta bulutları (ASCII), kesitler ve özellik çizgileri (VDA / IGES), poligon ağ yapıları (STL)

3.14.2.1.1. ATOS II FireWire

ATOS II FireWire teknolojisinden yararlanan bir diz üstü bilgisayar ile de çalıştırılabilir.

Taşınması kolay bu kurulum, gerekli tüm ekipmanın bir tek çantada muhafaza edilmesi ile uçuş bagajı şeklinde düşünülebilir. Bir diz üstü bilgisayar kullanılır. ATOS II FireWire'in kullanılabilirliği ve performansı ATOS II modelleri olan 400 ve 600 ile karşılaştırılabilir.

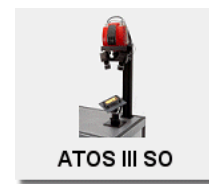
3.14.2.2.2. ATOS III

ATOS II, ATOS model aralığının üst uç versiyonudur. Her tarama görünüşü 4 milyona kadar veri noktası yakalar.

Ölçüm hacmi $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ ila $2000 \times 2000 \times 2000 \text{ mm}^3$ bir aralık arasında çeşitlilik göstermektedir. Yeni bir saçak projeksiyon prensibi kullanılarak veri kalitesi ATOS Standart versiyona kıyasla artırılmıştır. İlaveten kompleks objelerin sayısallaştırılması kolay ve hızlı bir hale gelmiştir.

ATOS III	
Ölçüm hacmi	300x300x300mm ³ ila 2000x2000x2000mm ³ .
Ölçüm mesafesi	750mm ila 2700mm
Kamera çözünürlüğü	2048 x 2048 piksel 12 bit (dijital)
Ölçüm süresi	yaklaşık 7 saniye
Ölçüler	500 x 300 x 120 mm ³ (Diğer uzunluklar: 730 mm)
Ağırlık	5.0 kg
Ölçüm noktası mesafesi	0.15 ila 1.0 mm
Ölçüm paraziti	0.002 ila 0.02 mm
Sonuçlar	parça dış çizgisi, nokta bulutları (ASCII), kesitler ve özellik çizgileri (VDA / IGES), poligon ağ yapıları (STL)

Tablo 3.1; ATOS II ve ATOS III Karşılaştırması



Ölçüm Hacmi		
[mm ³ / Ölçüm]	300x300x300 2000x2000x2000	- 60x60x40 - 200x200x150
[inç ³ / Ölçüm]	12x12x12 - 80x80x80	2.4x2.4x1.6 - 8x8x6
Uzaklık		
[mm]	750 - 2700	300
[inç]	30 - 105	12
Boyutlar		

[mm ³]	500/730x300x120	600x800x450
[inç ³]	20/29x12x5	24x32x18
Ölçüm Noktaları		
	4 000 000 nokta - 8 saniye	4 000 000 nokta - 8 saniye
Nokta Boşluğu		
[mm]	0.15 - 1.0	0.03 - 0.1
[inç]	0.006 - 0.04	0.001 - 0.004
Ölçüm Paraziti		
[mm]	0.002 - 0.02	0.001 - 0.004
[inç]	0.00008 - 0.0008	0.00004 - 0.00016
		
Ölçüm Hacmi		
[mm ³ / Ölçüm]	135x108x108 1700x1360x1360	-35x28x20 - 200x160x150
[inç ³ / Ölçüm]	5x4x4 - 67x53x53	1.4x1.1x0.8 - 7.8x6.3x5.9
Uzaklık		
[mm]	600 – 1600	230 - 300
[inç]	24 - 63	9 - 12
Boyutlar		
[mm ³]	520/700/940x220x110	600x800x450
[inç ³]	20/27/37x9x4	24x32x18
Ölçüm Noktaları		
	1 300 000 nokta – 7 saniye	1 300 000 nokta – 7 saniye
Nokta Boşluğu		
[mm]	0.08 - 1.0	0.03 - 0.15
[inç]	0.003 - 0.039	0.001 - 0.006

3.14.3. Sistem Genel Tanıtları

3.14.3.1. ATOS I Sistemi

Küçük ve orta büyüklükteki objeleri sayısallaştırma sistemi. Sistem şunları içerir:

- Kolay taşıma ve iyi koruma sağlamak üzere stabil bir muhafazada teslim edilen yüksek uç diz üstü bilgisayar tabanlı sayısallaştırma sistemi (2G CPU, 2G RAM, DVD-RW): 64 bit PC, 2x Opteron 2G CPU, 4 G RAM

- Sayısallaştırma sistemini doğrulamak ve kolayca kalibre etmek için modüllerle beraber ölçüm verilerini sayısallaştırma, işleme, görüntüleme ve gönderme, sayısallaştırılmış veri ile CAD verilerini karşılaştırma, verileri ölçme ve inceleme ve sonuçları gönderme için kullanma kılavuzu ile birlikte kurulu ATOS yazılımı

- ATOS I ölçüm kafasını tahrik etmek için 10 metre kablolu kompakt sürücü, 240/120 Volt

- İki dijital kameralı, 250 W saçak projeksiyon üniteli, gömülü denetleyicili, bir ölçüm hacimli ATOS ölçüm kafası (bir set lens ve bir kalibrasyon objesi, 1000x800, 500x400, 250x200 veya 125x100mm)

- Sabit sehpa sistemi ALFAE+, veya hafif stand ASLAI, ATOS kafasını ayarlamak için esnek ve stabil

- Aksesuar: lensleri ve kameraları, yedek lambaları, 3 tarama toz sprey

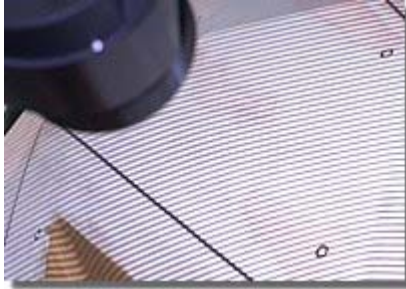
- Sistem için ATOS Kalibrasyon Raporu (her ölçüm alanı)

3.14.3.2. ATOS ile 3 Boyutlu Tarama İş Akışı



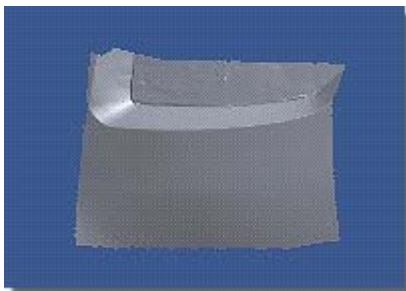
Kamera Yerleştirilmesi ve Ayarlar

Bir üçayak ya da kollu ayağa bağlanmış bulunan ATOS kamera kafası rahat bir şekilde, taranacak nesneye uygun şekilde yerleştirilir. Başka herhangi bir cihaza ihtiyaç yoktur. Ancak taranacak parça esnek ise, uygun bir düzenek ile sabit duracak hale getirilmelidir.



Tarama

Ölçüm; beyaz ışık kaynağından verilen çizgilerin nesne yüzeyinde oluşturduğu hatlar, dijital kameralar tarafından iki taraftan eş zamanlı olarak kaydedilir. ATOS yazılımı, bir kaç saniye içerisinde, taradığı yüzeyden 4 milyona kadar noktanın 3 boyutlu koordinatlarını hesaplayıp, görüntüler.



Tek Ölçüm Hacmi

Herbir tarama seansından elde edilen noktalar kümesi hemen görüntülenir. Hesaplama esnasında sistem kendi kalibre durumunu ve ölçme esnasında çevre koşullarındaki değişikliği algılayarak, ne kadarlık ölçme hatası yapacağını bize söyler. Böylelikle çok uygun olmayan ortam ve şartlarda dahi güvenilir, hassas ve hızlı ölçüm işlemi gerçekleştirilir.



Sonuç



Her bir ölçüm, ortak koordinat sistemine uygun şekilde kendi konumuna oturur. Elde edilen nokta verileri ek işlemlerden geçirilerek, istenilen formatta başka sistemlere taşınabilir ya da ATOS içerisinde kendi yazılımı ile ölçüm raporlamaları gerçekleştirilebilir.

3.14.3.3. ATOS ile Kalite Kontrol Uygulaması İş Akışı



Hazırlık

Ölçümü yapılacak cismin üzeri marker kullanılarak işaretlenir. Cismin hassas bir şekilde ölçümünün yapılabilmesi için bu işaretler ATOS yazılımı tarafından tanınır ve farklı ölçümlerin birleştirilmesi için kullanılır.



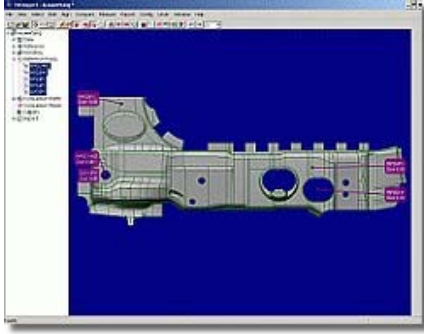
Tarama

ATOS sistemi cisim üzerine düşürdüğü ışık demetinden elde ettiği kesitler sayesinde yüzeyin yüksek sıklıkta noktalardan oluşan formunu kısa zamanda ve hassas bir şekilde çıkarır.



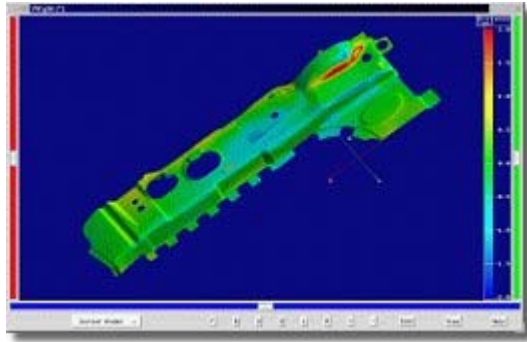
Hesaplama

Yapılan ölçümün sonuçları sisteme ait Linux ortamında çalışan özel bir yazılım vasıtasıyla matematiksel bir modele dönüştürülür.



CAD Model ile kıyaslama

Ölçüm verilerinin tasarım modeli ile karşılaştırılması için farklı metodlar uygulanabilmektedir. CAD modelden alınan bazı noktalar (delik merkezleri, yüzeyler v.s) vasıtasıyla ölçüm datası istenen koordinatlara taşınabilir.



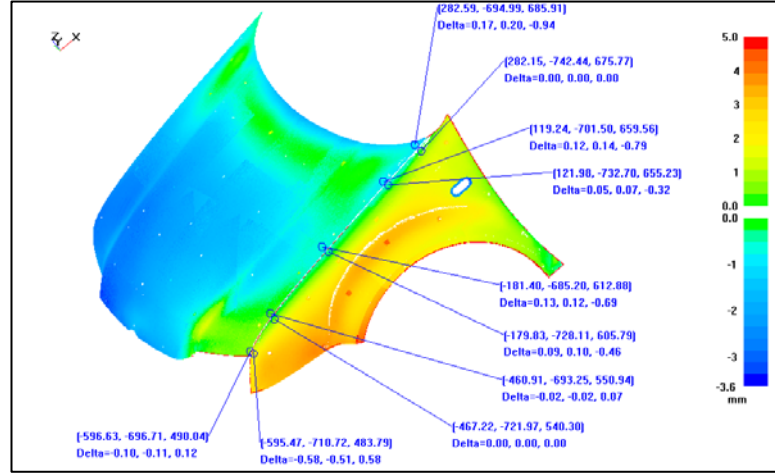
Bunun yanında endüstride sıkça kullanılan best fit metodu da yazılım tarafından çok hızlı bir şekilde yapılabilmekte, sonuçlar ise sapmaların açıkça gösterildiği bir renk dağılımı ile sunulmaktadır.

3.14.4. Kalite Kontrol ve Raporlama

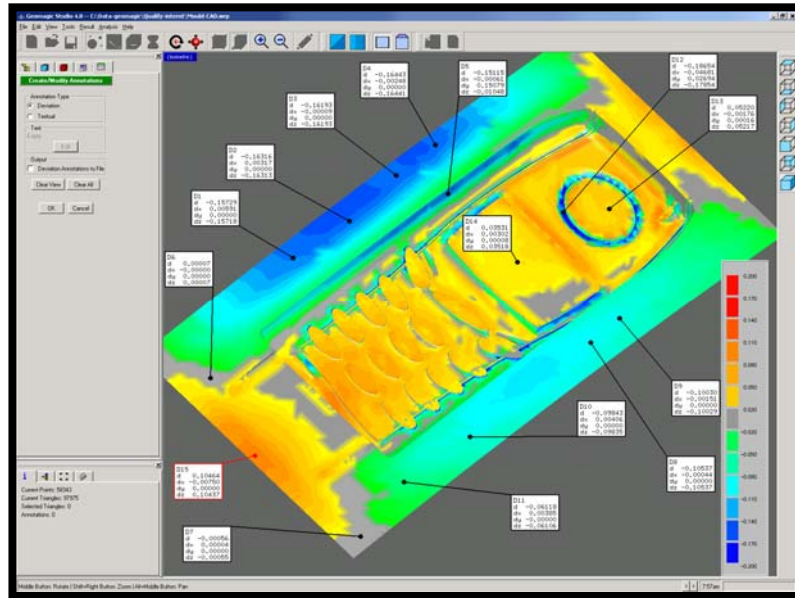
ATOS sistemi genel anlamda bir 3 boyutlu yüzey tarama (sayısallaştırma) sistemi olarak geliştirmiş ise de, müşterilerinin talep ve beklentileri yönünde CAD verisi ile karşılaştırma ve raporlama uygulamaları da kendi yazılımı içinde yer almaktadır.

Ancak ileri derecede ölçü raporlama ayrı bir uygulama olup, GOM firmasının da birlikte çalışmakta olduğu başka firmalar bu konularda geliştirme çalışmaları yapmaktadır. Geomagic firmasının Qualify yazılımı bunlardan bir tanesidir.

Yukarıda bahsedilen raporlama teknikleri, otoriteler tarafından yeni nesil raporlama teknikleri olarak kabul edilmektedir. Bunlarla bugüne kadar kullanılan sayısal raporlar yanında, hatalı yerlerin hızlı tanınmasını sağlayan renkli grafikler herkes için hızlı algılamayı kolaylaştırmakta, iletişimi ve verimi arttırmaktadır.



Şekil 3.37; ATOS yazılımı ile raporlama

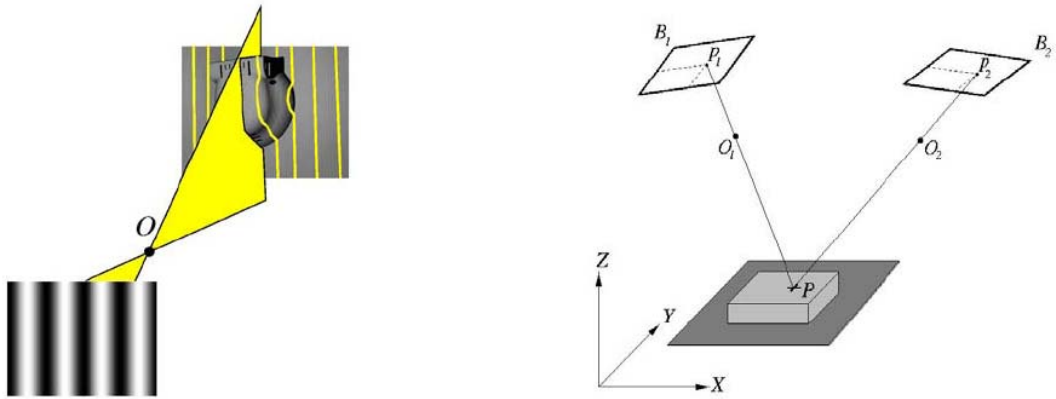


Şekil 3.38; Geomagic Qualify ile raporlama

3.14.5. Saç Metal İşlemede Optik Ölçüm Teknolojileri

3.14.5.1. ATOS, Optik 3D Sayısallaştırma

Prensip: ATOS sistemi üçgenleme prensibine dayalıdır: Şekil. 3.39'daki gibi sensör ünitesi farklı saçak örneklerini ölçülecek objenin üzerine yansıtır ve bunları iki kamera ile gözler. Optik transformasyon denklemlerine dayalı olarak bilgisayar otomatik olarak her bir kamera pikseli için yüksek hassasiyetle 3D koordinatları hesaplar. Kamera çözünürlüğüne bağlı olarak her bir münferit ölçüm için 4 milyon yüzey noktasına kadar nokta bulutu elde edilir.



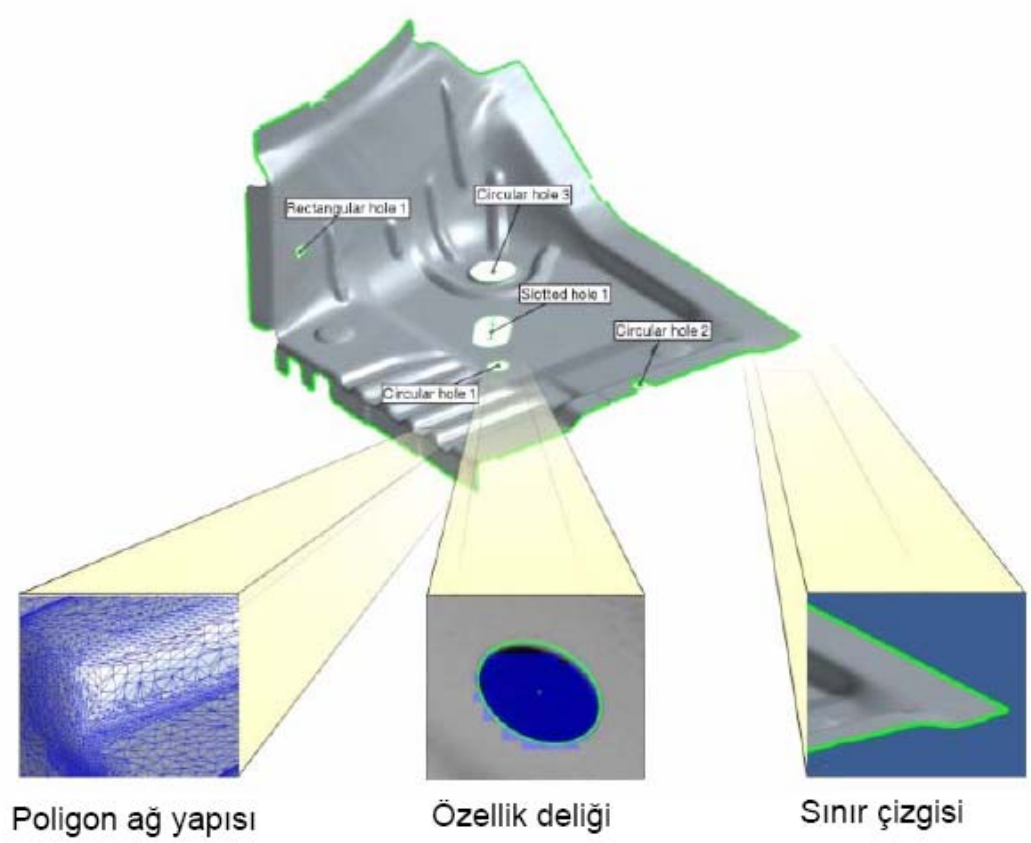
Şekil 3.39; Saçak projeksiyonu ve üçgenleme

Projeksiyon ünitesi ve kameralar kompakt ATOS sensör kafasına entegre edilir. Sistemin geometrik konfigürasyonu ve lens distorsiyon parametresi fotogrametrik yöntemlerle kalibre edilir. Kullanıcı sonra ilave bir teknolojiye gerek duymadan Şekil 3.40'da gösterildiği gibi parçanın önündeki standın üzerinde sensör kafasını konumlayabilir. Objenin kendisine veya fıkstüre uygulanan hedefler tarayıcı için referans noktası olarak görev görür.



Şekil 3.40; ATOS tarayıcının kullanımı

Bir objeyi tamamen sayısallaştırmak için çeşitli görüşlerden pek çok münferit ölçüm gereklidir. Küresel bir koordinat sistemine dönüşüm referans noktaları aracılığı ile otomatik olarak yapılır. Kullanıcı sayısallaştırma prosesini ekranda sürekli olarak görebilir. Her bir münferit ölçüm taranacak objenin 3D modelinin oluşumunu tamamlamaya katkıda bulunur. Sayısallaştırma prosesinin sonunda yüzeyin yüksek çözünürlüklü poligon bir ağ yapısı objeyi tamamen tasvir eder. Genel olarak bu ağ yapısı veriyi azaltmak için inceltilmiş eğrilik tabanlı bir yapıdır. İlaveten Şekil. 3.41'deki gibi saç metalin özellik delikleri ve sınır çizgisi gösterilir.



Şekil 3.41; Sayısallaştırma sonuçları

Araba gövdesi gibi daha büyük objeler için referans noktaları direkt olarak objeye uygulanır. Gerçek tarama prosesinden önce bu referans noktaları TRITOP adı verilen fotogrametri sistemi ile ölçülür. Bu amaçla Şekil. 3.42’de gösterildiği üzere obje dijital bir refleks kamera kullanılarak çeşitli görüşlerden kaydedilir. TRITOP herhangi bir boyuttaki objeler için bir referans veri seti oluşturur. 4 metrelik bir obje için 3D hassasiyet yaklaşık 0.1 mm’dir.

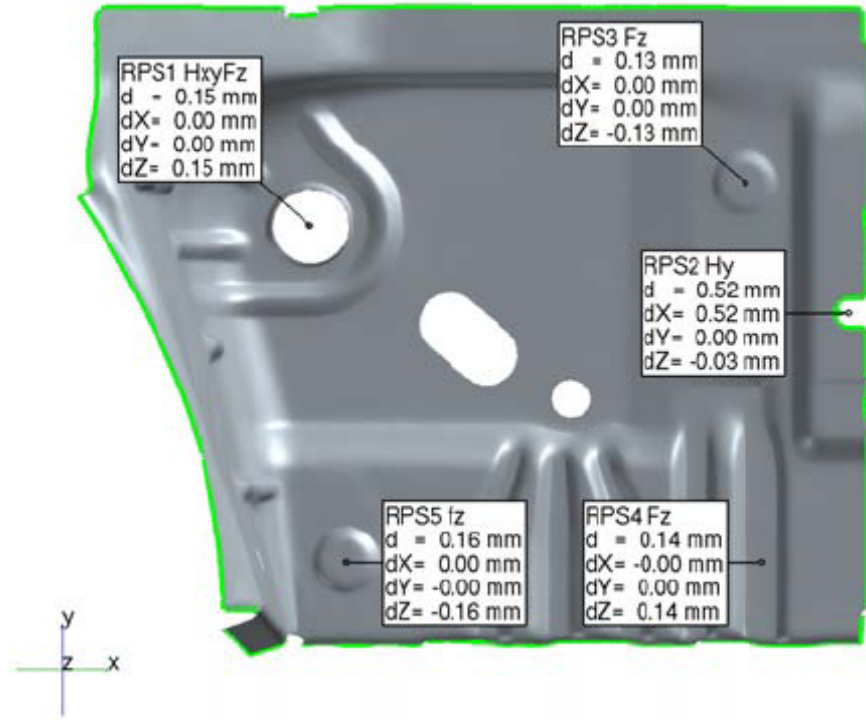


Şekil 3.42; TRITOP ile yan panel için bir referans veri setinin oluşturulması

3.14.5.2. Preslenmiş Parçaların Doğrulanmasında 3D Sayısallaştırma

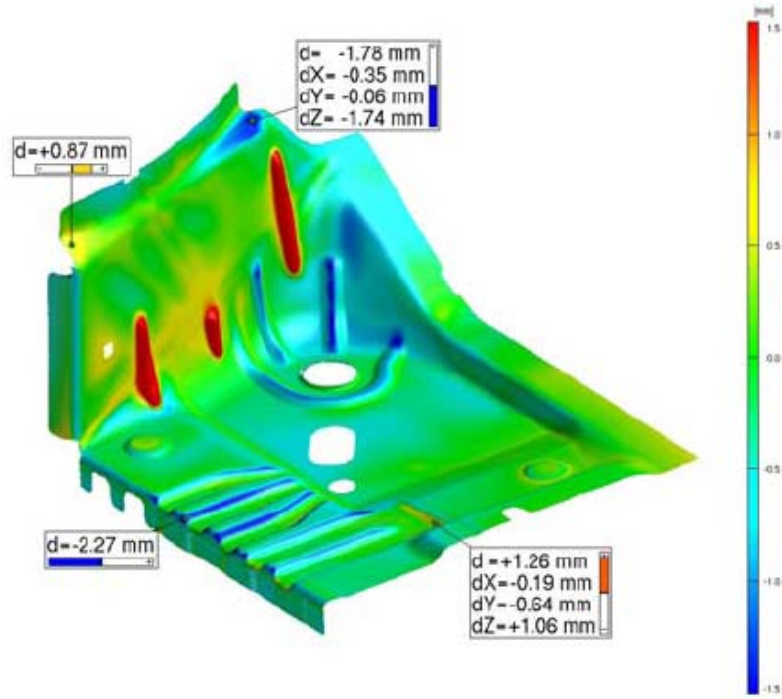
ATOS sistemi kullanılarak saç metal parçalarının analizi ve muayenesi bilhassa otomotiv endüstrisi ve tedarikçileri için ürünlerin ve üretim prosedürlerinin optimize edilmesi amacıyla hatırı sayılır bir potansiyel oluşturur.

Evvela saç metaller sayısallaştırılır. Ardından ölçüm verileri CAD modeli ile hizalanır. Bu hizalama dairesel delikler, yarıklı delikler, kenar noktaları veya yüzey alanları gibi özellikleri bir RNS sistemi (Referans Nokta Sistemi) ile verilen karakteristik noktalara dayanır. Bu özellikler hem ürün çiziminden veya doğrudan CAD dosyasından alınabilir. Şekil 3.43 bu tip RNS noktaları ile ölçüm verilerinin hizalanmasını göstermektedir.

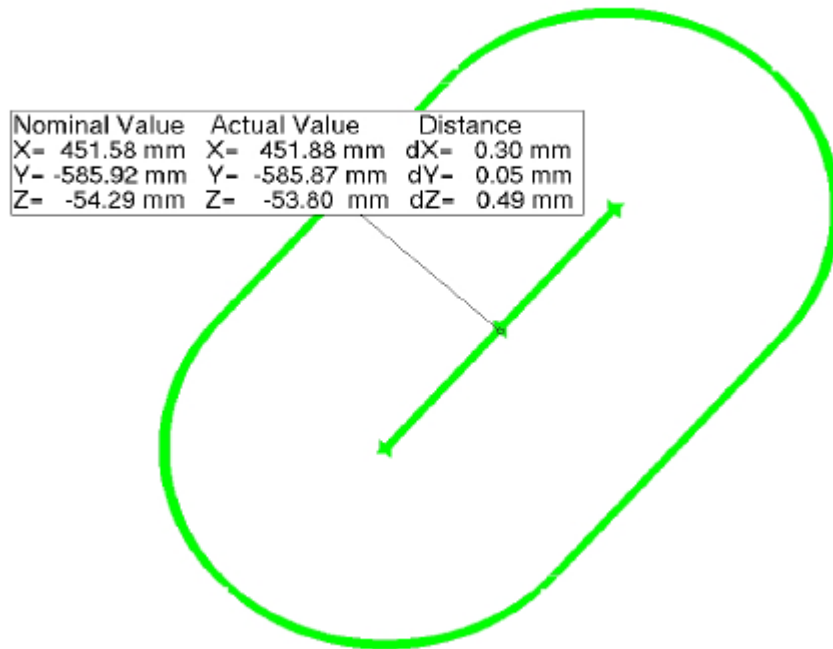


Şekil 3.43; Ölçüm verilerinin CAD verileri ile hizalanması

Hizalamanın ardından her bir tek ölçüm noktasının sapması nominal dış çizgiye göre hesaplanır. Şekil 3.44'deki gibi ölçüm noktaları yüksek yoğunluğa sahip olduğundan sapmalar yüzey renkli çizimleri şeklinde görüntülenebilir. Bu gösterim objenin seri ve hassas analizine olanak tanır.



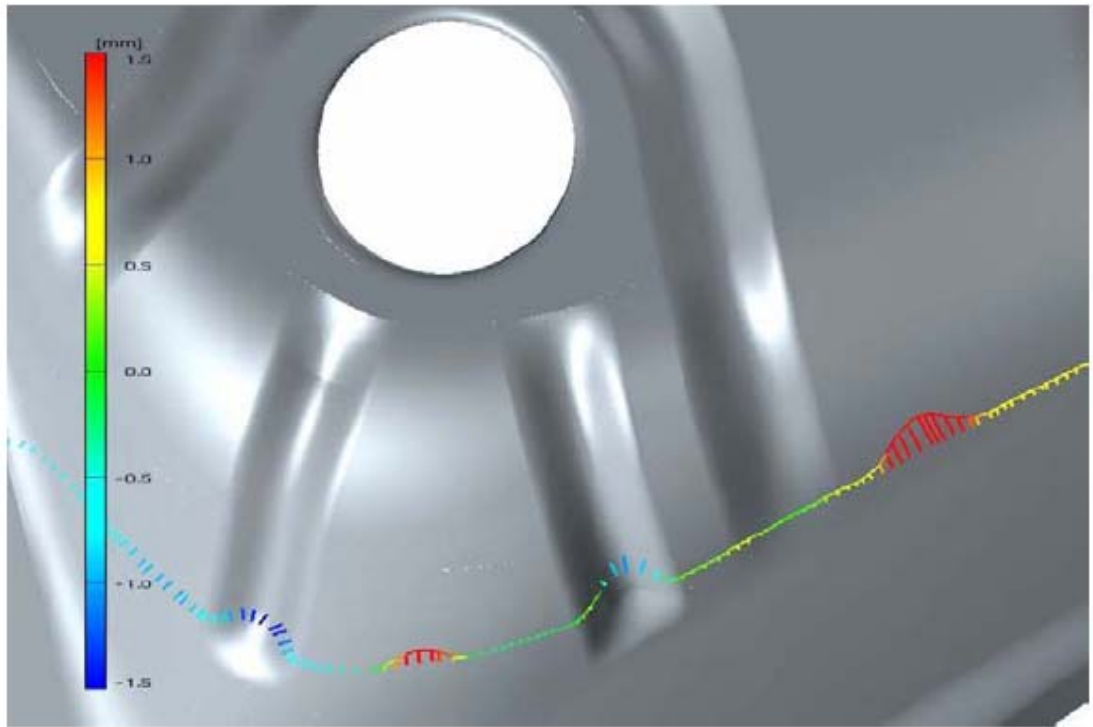
Şekil 3.44; Notlarla beraber renkli çizim



Şekil 3.45; Yarık deliğin pozisyon kontrolü

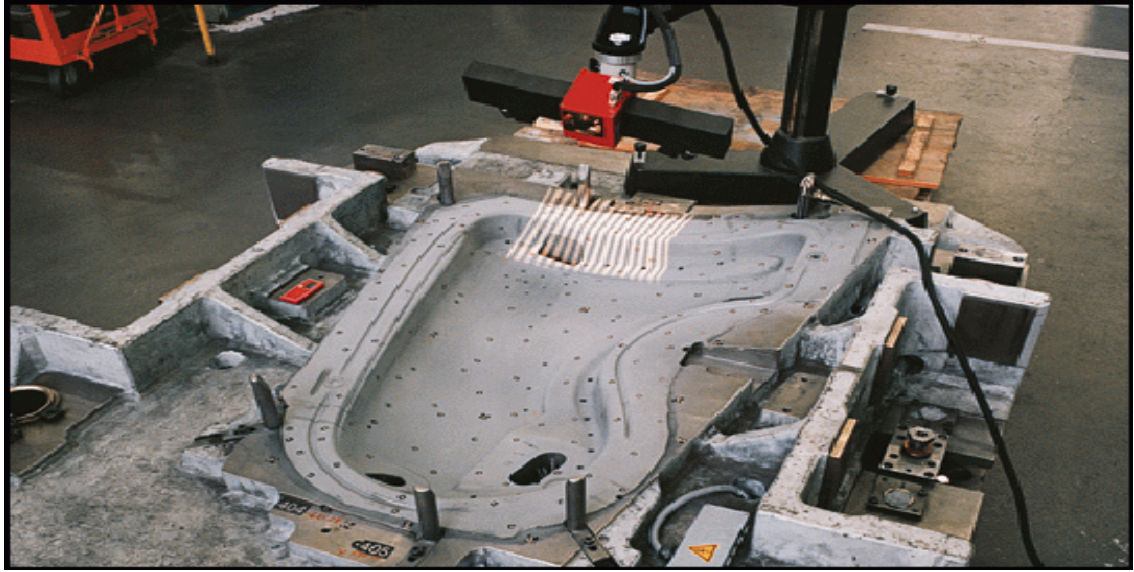
Yüzey gösterimine ilaveten deliklerin, yarıklı deliklerin, sınır çizgilerinin konumu belirlenebilir. Nominal değerlere göre uzayda sapma Şekil 3.45'deki gibi etiket veya tablo şeklinde gösterilebilir. Sıklıkla nominal ve gerçek değeri karşılaştırırken uyulması gereken tolerans değerleri belirtilir.

Ölçüm verileri objeyi tamamen tanımlarken herhangi bir pozisyonda kesitler oluşturulup nominal veriler ile karşılaştırılabilir. Sapmalar Şekil 3.46'da verildiği gibi sözgelimi renkli çubukların yükseklikleri ile görüntülenebilir.



Şekil 3.46; Kesit analizi

Tekrarlı ölçüm işleri ve büyük miktarlarla bağlantılı olarak özdeş veya benzer parçaların ölçümünde otomatik ölçüm prosedürlerine ve sonuç değerlendirmelerine olan talep gittikçe artmaktadır. Bu uygulamalar için ATOS kontrol ünitesi endüstriyel robotları ve dönme tablalarını destekler. Şekil 3.47'deki gibi ATOS sensör kafasını ticari bir robota yerleştirmek kolaydır.



Şekil 3.47; ATOS kafasının robotla entegrasyonu

3.14.6. 3D Tarama Cihazı Kullanarak Sac Kalıp Modifikasyonlarında Sürat ve Ekonomi ve Diğer Faydalar

Sayısallaştırma işlemi, kalıplarda değişiklik yapılması sırasında zaman ve maliyetten büyük ölçüde tasarruf sağlar

3.14.6.1. Kalıp Deneme

İstenen şeklin elde edilmesi amacı ile kalıp deneme aşamasında elle yapılan değişiklikler herhangi bir dokümantasyona tabi tutulmamakta ve CAD dataya yansıtılmamaktadır. Bu nedenle kalıbın gerçek şekli daha önceki orijinal ve temel tasarımdan tamamen farklı hale gelmektedir.

Seri üretime başlandığı sırada gerçekleştirilen ilave tasarım değişiklikleri

Küçük bir örnek vermek gerekirse, araç tavan çapraz kirişinin tavan çerçevesine kaynaklanması sırasında, kaynak bağlantılarında, kaynak hattında problemlere yola açan gerilimler görülmektedir. Bu gerilimleri önlemek için tavan çerçevesinin, önceden belirlenmiş bölgelerden bükülmesi gerekmektedir, ve bu işlem ilgili kalibrasyon kalıbının adapte edilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu ve diğer

ilave değişiklikleri Kalite Güvence Departmanı ve ben belirledikten sonra ön bölgede, çatı çerçevesinin 0.2 mm ile 0.7 mm arasında daha derin çekilmesi gerekmektedir. Hedef ise kalıptaki bu değişikliği en kısa zamanda gerçekleştirerek üretimdeki aksamayı minimumda tutmaktır.

Güncellenmiş CAD verileri, değişiklik işlemini ve üretimi büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır

Değişiklikler, bir takıma en verimli olarak frezeleme işlemi ile uygulanabilmektedir. Gerekli değişiklikler için kullanılacak NC programlarının hesaplanması için kalıp CAD yüzeyi baz alınmaktadır.

Fakat denemeler sırasında el ile gerçekleştirilen adaptasyon sebebiyle CAD modeli gerçek kalıba benzememektedir.

Kalıbın o anki durumu CAD verisi seti olarak elde bulunmadığı sürece gerekli olan değişiklik işlemi, kalıba zahmetli ve zaman alıcı bir yol ile gerçekleştirilebilir. Bu sebeple daha uygun bir metot olan CAD ve CAM kullanımı şansı ortadan kalkmaktadır.

3.14.6.2. Kırık Veya Çatlak Kalıp Tamiri

Buna ilaveten ikinci ve daha kritik bir durum ortaya çıkabilir. Eğer sac parçaların üretimi esnasında kalıp kırılırsa, kalıbın bağlı olduğu parçanın mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde tamir edilmesi veya değiştirilmesi gerekir. Fakat var olan CAD verisi takım ile uyuşmadığından takımın denenmesi ile ilgili tüm manuel adaptasyonun tekrar yapılması gerekir. Ayrıca başka firmalar tarafından üretilmiş olan kalıplarda yapılan tekrar çalışması genellikle kayda alınmaz. Bu sebeple eğer kalıbın zaman baskısı altında tekrar üretilmesi gerekiyor ise bu problem daha kritik bir hale gelir ve büyük mali zararlara ve üretimin durması gibi bir probleme de yol açabilir.

3.14.6.3. Kalıp Yüzeylerinin ATOS ile Sayısallaştırılması

En iyi çözüm, denenmiş ve alıştırılmış kalıp yüzeylerinin sayısallaştırılması ve bu verilerin CAD verisi şeklinde hazırlanmasıdır. Bu, kalıbın uygun şekilde değiştirilebilmesini ve –eğer gerekiyor ise– kalıbın verimli bir şekilde tamir edilmesini veya yeniden üretilmesini sağlamaktadır. ATOS ile yapılan hizmetin kapsamı; tüm karmaşık şekilli kalıpların doğrudan sayısallaştırılması, CAD verileri ile ölçülen verilerin karşılaştırılması ve kaydedilen sapmaların CAD verisi setinin içine yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Bu tip bir güncellenmiş CAD modelinden yola çıkılarak NC üretiminin yapılması mümkündür. Ayrıca CAD modeli, tasarım üzerinde gerçekleştirilecek olan ilave değişiklikler ve adaptasyonlar için de bir temel olarak kullanılabilir ve sayede bu değişikliklerin yeni veya halihazırda kullanılan kalıplara uygulanması sağlanabilir.

3.14.6.4. Sayısallaştırma Verisi Üzerinden CAM

Bilindiği üzere büyük saç parçaların üretimi için kullanılan kalıplar, döküm olarak imal edilmekte ve işlenmektedir. Bunun için önce strafor model yapılır.

Strafor modelin dökümhaneye gönderilmesi için gerekli ilaveler yapılarak döküme gönderilir ve döküm gövde elde edilir.

Dökümden gelen kalıplar üzerinde teorik olarak 10mm talaş payı kalması istenmesine rağmen gerçekte farklı çekmeler sebebiyle her yerdeki talaş payı aynı olmamaktadır. Bu da CNC freze üzerinde süratli bir kesme yapmamızı engellemekte ve takımın boşta gezmesine sebep olmaktadır.

Sayısallaştırma sistemi ile kısa bir sürede taranan kalıp CAD data ile üst konup her noktadaki talaş payı belirlenebilmektedir.

Sayısallaştırma sonucu belirlenen ‘stok’ (net olarak talaş kaldırılacak malzeme) CATIA - CAM içinde malzemeden kalkmadan işle komutu ile işlenebilmekte dolayısı ile daha yüksek süratlerde ve takımın boşta gezmesi

engellenerek bir kesme yapılmasını sağlamaktadır. Yapılan testlerde 48 saat süren talaş kaldırma prosesinin 40 saate kadar indirildiği görülmüştür.

Tezgah üzerinde parçanın hazırlanma sürelerinde (bağlama, sıfırlama v.b.) önemli iyileştirmeler sağlanmıştır.

3.14.6.5. Kalıp Dokümantasyonu ve Aşınma Kontrolü

Tezgah üzerinde veya indikten sonra takım aşınma kontrolü ve kalıp ölçümü yapılabilir

3.14.6.6. Kalıp Dokümantasyonu

Dişi, erkek ve pot çemberinin aynı koordinat sistemine oturtulması, pres baskı sırasındaki gerçek form verme durumunu göz önüne sermektedir

4. CMM VE OPTİK TARAYICI KARŞILAŞTIRMASI

Koordinat ölçüm cihazları ve optik ölçüm cihazları bilgisayar destekli tersine mühendislik ve otomatik inceleme alanlarında kullanılan en popüler sayısallaştırıcılardır.

Eski yöntem bir fikstür ve bazı kritik boyutların belirlenmesi ve bir kalite raporunun hazırlanması şeklindedir. Ardından fikstür oluşturulur ve parça cihazda konumlandırılarak bir CMM ile 10 ila 200 farklı çapın, uzaklığın veya açının ölçülmesi sağlanır. Sonra ölçülen noktalardaki sapma değerleri ile bir ölçüm raporu hazırlanır. Şayet parça ıskartaya çıkmışsa üretime haber verilir ve kalite raporu revize edilerek test yoğunlaştırılır (www.omagon.co.kr).

Eğer parça stabilse optik tarayıcı kullanılarak parçayı sayısallaştırmak için herhangi bir fikstüre gerek yoktur. Bu sayede tarayıcının seri ve esnek bir şekilde kullanılması sağlanır. Bu kolay tarama yolu parçayı fikstüre doğru eğmeyecek ve montajda sorun çıkarabilecek bir parça için iyi veriler oluşturacaktır. Buna ilaveten bu veri hizalama ve parça deformasyonlarından kaynaklanan sapmaları görüntülemek ve anlamak için farklı hizalama stratejileri kullanılarak parçanın kendi CAD verilerine karşı doğrulanmasına izin verir. Gerektiğinde parça kendi şeklini barındırmak için bir fikstürde de sayısallaştırılabilir. Eğer bir parça parçanın kendisi ve nihai konumu şeklinde iki kez sayısallaştırılırsa montajın neden olduğu deformasyon tanımlanıp analiz edilebilir. Bu deformasyon analizi tüm arabanın içini ve dışını sayısallaştırmak amacıyla ATOS tarayıcı kullanan pek çok otomotiv firmasında günlük bir analizdir [www.gom.com, 2005].

CCD kamera ile sayısallaştırma kısa sürede büyük modellerin toplanmasına olanak tanır. Bununla beraber sayısallaştırma verisi dokunma probu veya lazer sayısallaştırıcıda olduğu kadar hassas değildir. Optik bir tarayıcı ile toplanan daha kapsamlı veriye dayanarak grafiksel bir bakışla gerçek parçayı ve sapmalarını görüntüleyen sapmanın renkli bir çizimi kolaylıkla bulunabilir. Bu araçları kullanarak devam edip etmeme kararı alınır ve ilaveten proses gerçekleştirilebilir ve potansiyel

problemler zamanında tespit edilebilir. Bu sayede kapalı döngülü bir proses kontrolü, düşük üretim maliyetleri ile daha iyi üretim kalitesi ve üretimde kalite kontrolünün kolaylıkla yönetimi sağlanabilir [www.gom.com, 2005].

Optik tarayıcıların hassasiyetleri kullanılan video sistemine bağlıdır [Vardy et al, 1997]. Çözünürlük yüzey üzerinde aydınlatılmış alanın boyutu ile sınırlanabilen noktalar arasındaki uzaklıktan gelir. Prosesin hassasiyeti çözünürlük, sistem optiği ve sistemi oluşturan mekanik parçaların hassasiyeti gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Objenin kendisi de verinin hassasiyetini etkileyebilir. Koyu veya parlak yüzeylere sahiptir; veri beyaz ve matken olduğu kadar iyi olmayacaktır. Bu sebeplerden dolayı dikkatli olunması gerekir verinin hassasiyeti belirlenirken bir dizi faktör göz önüne alınmalıdır [Wohlers, 1995].

Oklüzyon gölgeleme veya engelden dolayı tarama ortamının bloke edilmesidir. Bu, optik tarayıcılarda birincil problemidir. Bu problemi bertaraf etmenin bir yolu çoklu tarama cihazlarının kullanılmasıdır. Ayrıca oklüzyon fikstürlerden de kaynaklanabilir, bu yüzden parçalar taramadan önce sabitlenmelidir. Fikstürlerin geometrisi tarama verisinin bir parçası haline gelir. Fikstür verisinin giderilmesi güçtür ve genellikle çoklu görünüş gerektirir. Çoklu görünüş elde edilen verilerde hatalara yol açar çünkü çakıştırma problemleri söz konusudur [Vardy et al, 1997].

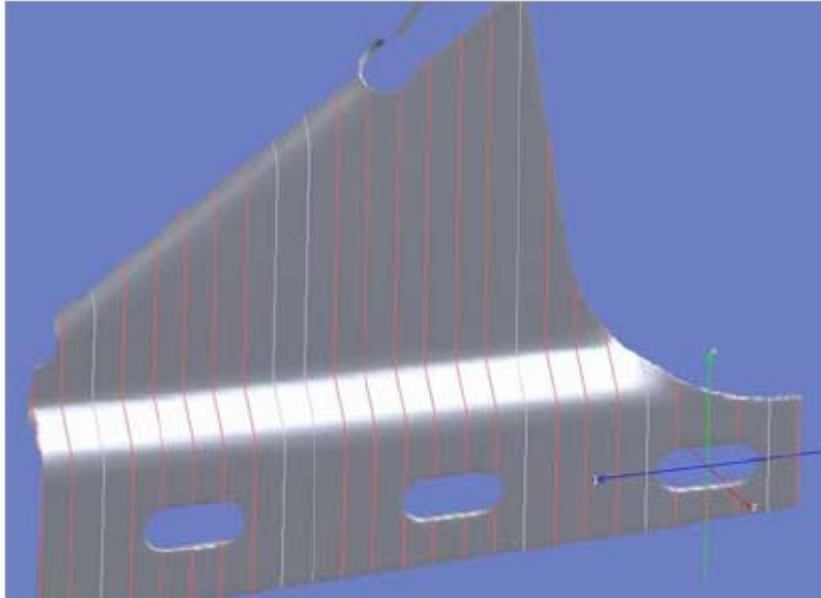
Optik 3D tarayıcılar keskin kenarların sınırlarındaki verinin 3D pozisyonunu tanımlamada zorluk çıkarır. Bu nedenle saç parçası gibi delikli ve sınırlı parçalar halen CMM veya ölçme kolları ile ölçülmektedir (www.gom.com).

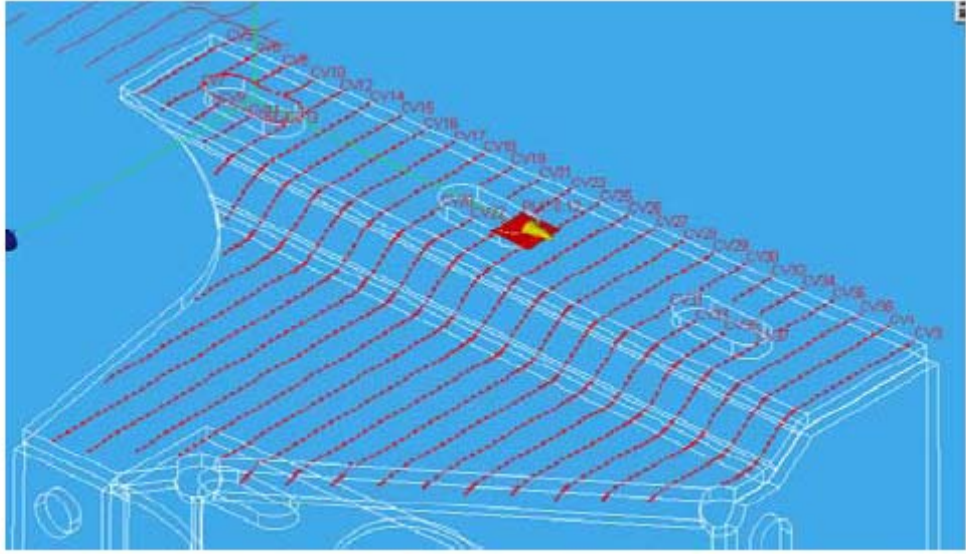
Son kademe de ölçülecek parçanın yüzey bitirmesidir. Pürüzler ve malzeme kaplaması veri elde etme prosesini ciddi biçimde etkiler. Dokunmatik veya optik yöntemler pürüzlü bir yüzeyde pürüzsüz olana göre daha fazla parazit oluşturur. Yansıtıcı kaplamalar da optik yöntemleri etkileyebilir [Vardy et al. 1997].

Kabul/ret tipi uygulamalar ve serbest şekilli yüzeyler için temel ölçüler, delik yerleri, çaplar, yassılık ve yuvarlaklık ölçümlerinin gerektiği geometrik parçaların ölçümünde CMM'ler daha uygundur. Aşağıdaki tablo teknik açıdan CMM'ler ile optik sayısallaştırma yöntemleri arasındaki bir karşılaştırmayı göstermektedir.

Tablo 4.1; CMM – Optik Sayısallaştırma Karşılaştırması

	CMM	Optik tarayıcı
Kullanılan teknoloji	Dokunmalı prob	Saçak projeksiyonu
Hassasiyet	0.003 mm	0.02 mm
Çözünürlük	0.5 μ m	1024 x 1280
İzleme hızı	0.3 m/s	7 s
Yumuşak malzeme	Sınırlı yeterli	Yeterli
Ölçüm uzaklığı	500x400x400	1700x1360x1360
İş parçasının ağırlığı	Bağımlı	Bağımsız
Yüzeyin parlaklığı	Bağımsız	Bağımlı
Sınırlar veya keskin kenarlar	Yüksek elde etme	Düşük elde etme

**Şekil 4.1; ATOS ile taranmış iş parçası**



Şekil 4.2; CMM ile taranmış iş parçası

5. TÜRBİN ÇARKININ ATOS I 3D TARAYICI İLE TARANMASI

3 boyutlu tarama ile ilgili olarak bu tez çalışmasında bir türbin çarkı kullanıldı. Burada amaç verilen bir türbin çarkının 3 boyutlu tarayıcıda taranarak CAD modelinin oluşturulmasıydı. Bu amaçla şu an piyasada gerek yazılım gerek donanım açısından diğer tarayıcılardan daha iyi bir konumda bulunan ATOS tarayıcısından yararlanıldı. Kullanılan ATOS I sistemi şayet çok kısa ölçüm süreleri ile sağlıklı veri elde edilmesi gerekiyorsa kullanılır ki bu da bizim parçamız için uygun bir tarayıcı özelliği göstermektedir. Ayrıca ATOS I sistemi kompakt ve katı bir tasarıma ve modern bir kontrol sistemine sahip olduğu için ayrıca bir tercih sebebidir. Bu tarayıcının teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo 5.1; ATOS I tarayıcısının teknik parametreleri

Sistem konfigürasyonu	ATOS I
Ölçülen Nokta Sayısı	800.000
Ölçüm Süresi	0.8 saniye
Ölçüm Alanı	125 x 100 – 1000 x 800 mm ²
Nokta Aralığı	0.12 – 1.0 mm
Sensör Boyutları	440/790 x 140 x 200 mm ²

Türbin çarkında tarama esnasında şu iş akışı izlendi:

1. *Sensörün Konumlanması:* ATOS sensör kafası ölçüm objesi olan türbin çarkının önündeki bir standı serbest bir şekilde yerleştirildi.

2. *Ölçüm*: Saçak örnekleri türbin çarkının yüzeyine bir beyaz ışık projeksiyonu şeklinde yansıtıldı ve bu durum iki kamera ile kaydedildi. Sistem otomatik olarak ortam şartlarının etkisini hesaplayıp kalibrasyon ayarını yaptı.
3. *Değerlendirme*: Saniyeler içinde yazılım ölçüm başına 4 milyona kadar obje noktasının yüksek hassasiyetli 3 boyutlu koordinatlarını hesapladı. Yüzeye ek olarak sistem kırpma ve delik örnek bilgisi de sağlamaktadır.

Her bir tarama seansından elde edilen noktalar kümesi hemen görüntülenmiştir. Hesaplama esnasında sistem kendi kalibre durumunu ve ölçme esnasında çevre koşullarındaki değişikliği algılayarak, ne kadar ölçme hatası yapacağını bize söylemiştir. Böylelikle çok uygun olmayan ortam ve şartlarda dahi güvenilir, hassas ve hızlı ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

4. *Sonuç*: İlave her bir ölçüm tam otomatik sistemde ortak bir obje koordinat sistemine aktarılır. CAD sistemindeki sapmalar da heaplanabilir. Daha fazla işlem için bütün 3D veri takımı ve karşılaştırma sonuçları standart formatlara çevrilebilir.

Kullanılan ATOS sistemi, beyaz ışık veren lazer tarama sistemidir ve DaimlerChrysler, Fiat, Ford, Volkswagen, Porsche, Rover, Italdesign, McLaren, Berndt gibi firmaların da kullandığı bir sistemdir.

Sayısallaştırma için türbin çarkının üzerine işaretçiler yerleştirildi. Bu işaretçilerin 3 boyutlu koordinatları yüksek çözünürlüklü dijital kameralar ve ATOS yazılımı kullanılarak hesaplandı. Bu yazılım sayesinde ölçüm verilerinin koordinat sistemi de dönüştürülerek türbin çarkının koordinat sistemi ile eşleştirildi. Ardından ATOS tarayıcı kullanılarak sayısallaştırma işlemi gerçekleştirildi. ATOS'un ölçüm alanı standart olarak $125 \times 100 \text{ mm}^2$ ve yüksek çözünürlüklü durumlarda $1000 \times 800 \text{ mm}^2$ olarak kalibre edilebilir. Türbin çarkının sayısallaştırılması sırasında ATOS sensörü gerekli tüm görüşlerin elde edilmesi için $350 \times 280 \text{ mm}$ değerlerindeki ölçüm alanında kısa bir çalışma mesafesinde kalibre edilmiştir. Detayların çıkarılabilmesi için ATOS sisteminin lensleri değiştirilmiş ve sistem $200 \times 160 \text{ mm}^2$ ve $100 \times 80 \text{ mm}^2$ ölçüm alanlarına kalibre edilmiştir.

Daha sonra türbin çarkının bütün verileri ATOS yazılımı kullanılarak bir STL dosyasına çevrilir. ATOS yazılımı STL dosyasını türbin çarkının düz bölgelerinde düşük veri yoğunluğu ve yüksek eğriliğe sahip bölgelerde de yoğun veri noktaları olacak biçimde düzenli bir ızgara yapısı ile hesaplamıştır. Bu sayede veri miktarı standart bir dosyaya indirgendiği için türbin çarkının sonuç verileri standart yazılım paketlerine gönderilebilir.

Elde edilen STL verisi ile model üzerinde değişiklik yapılabilir veya modele CAM uygulanabilir. Türbin çarkının ATOS tarayıcı ile elde edilen STL dosyası UNIGRAPHICS NX CAD programı kullanılarak parçanın katı modeli elde edilmiştir.

Bu aşamalar şu şekilde özetlenebilir:

- Türbin çarkının tam geometrik tanımı elde edilmiştir.
- STL formatında poligon ağ yapıları elde edilmiştir
- Ayrıca türbin çarkındaki delikler ve sınır çizgileri de elde edilmiştir
- Elde edilen kesitler IGES formatındadır
- Çözünürlük 0.1 ila 1 mm aralığındadır
- Toleranslar 0.01 ila 0.05 mm aralığına tekabül etmektedir
- Bu tarama cihazı ile 10 mm ila 10 m boyutundaki parçalar taranabileceğinden bizim parçamız bu sınırlar içerisindedir; bu nedenle sağlıklı ve güvenilir bir tarama elde edilmiştir

Kullanılan ATOS yazılımı tüm uygulamalar için pek çok fonksiyonellik sunmaktadır. Bu yazılımın avantajları, kullanım konumlarına bağlı olarak şöyle sınıflandırılabilir:

Ölçüm

- Her bir ölçüm için otomatik kalibrasyon doğrulaması
- Saçak projeksiyon kalitesinin doğrulanması

- Bir ölçüm ile çok parlak ve çok mat alanların sayısallaştırılması
- Çevrim içi pozisyon tespiti
- Çevrim içi stabilite ölçümü

Poligon Ağ Yapısının Oluşturulması

- Tüm tek ölçümlerin otomatik olarak hizalanması
- Tüm ölçümlerin tek bir yüksek kalite ağ yapısına etkin bir biçimde entegre edilmesi
- Asgari veri miktarı ile en küçük detayların bile gösterilmesi için eğrilik bazlı inceltme

Poligon Ağ Yapısının Düzenlenmesi

- Üçgensel verilerin (delik doldurma, inceltme,...) düzenlenmesi için etkin bir alet çantası
- Seri eğrilik tabanlı inceltme ile veri indirgeme

Kesitler

- Tekli ve çoklu kesitler
- Kesit verilerinin düzenlenmesi
- Kesit verilerinin alınması ve gönderilmesi

Özellik Çizgileri

- Özellik çizgilerinin kolay ve kesin tanımı
- Farklı delik boyutlarının hassas ve güvenilir bir biçimde tespiti

Basit Şekiller

- Basit şekiller (küreler, silindirler, düzlemler, çizgiler,...) ağ yapısı verilerinden oluşturulabilir

- Basit şekillerin kesişimi ve projeksiyonu
- Basit şekillerin IGES formatında aktarılabilmesi

Çakıştırma

- Referans verileri ile ön çakıştırma ve en iyi uydurma çakıştırması
- Referanslar veya CAD verileri ile basit şekil bazlı hizalama

Muayene

- CAD verilerinin aktarılması
- Ölçüm verilerinden referans verilerine olan sapmanın hesaplanması
- Renkli çizimlerle sapmaların görüntülenmesi
- Makro fonksiyonellik kullanılarak otomatik kalite kontrolü

Otomasyon

- Robotların, manipulatörlerin ve dönme tablalarının kolay entegrasyonu
- Sayısallaştırma ve veri değerlendirmede tekrarlı aşamaların kolay kaydedilmesi ve düzenlenmesi için makro fonksiyonellik

Renkli Ağ Yapıları

- Renkli STL verilerinin alınması ve gönderilmesi

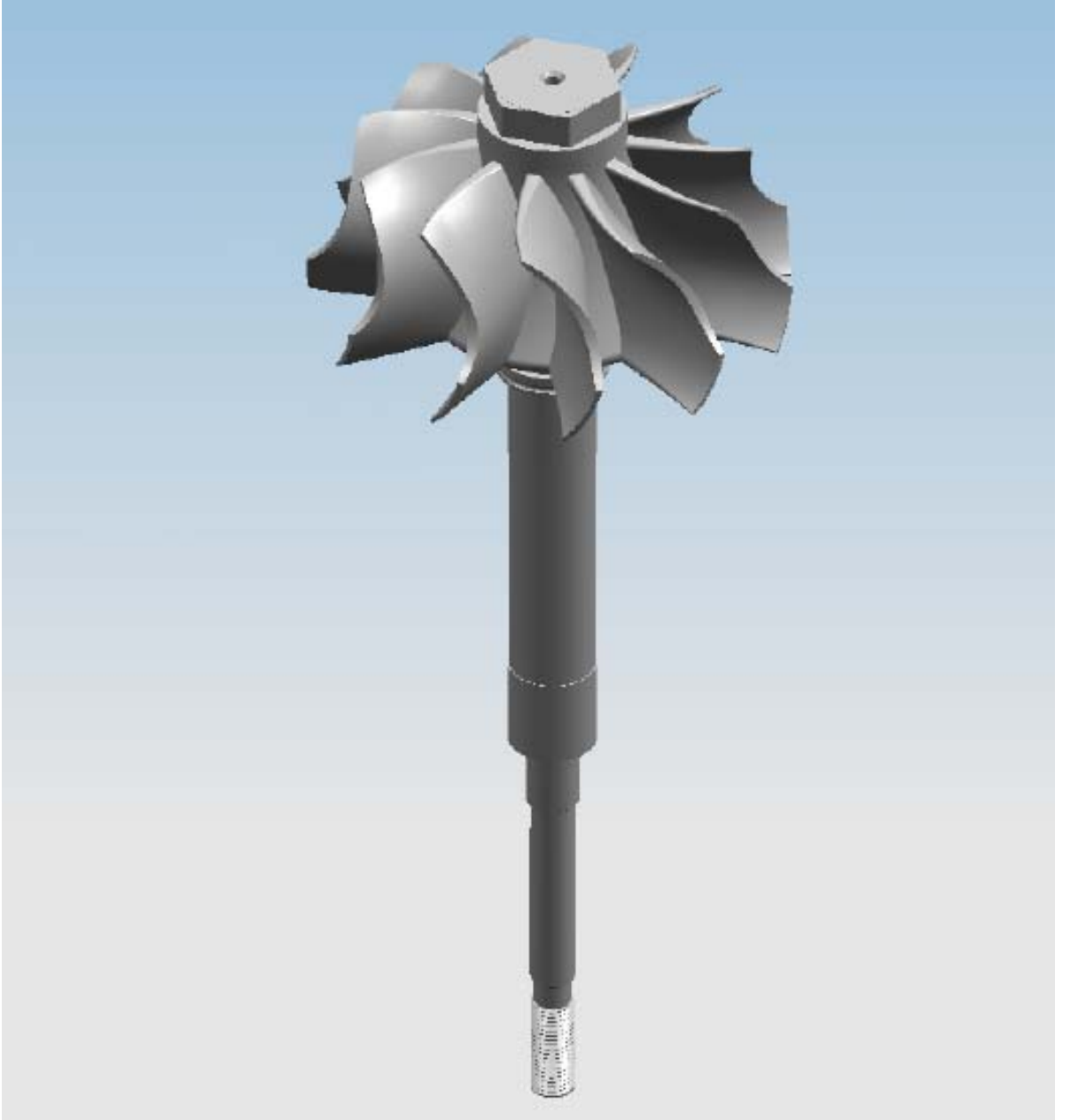
Donanım

- Ölçüm ve hesaplama süresini en aza indirmek için 64 bit çift CPU 16 GB RAM

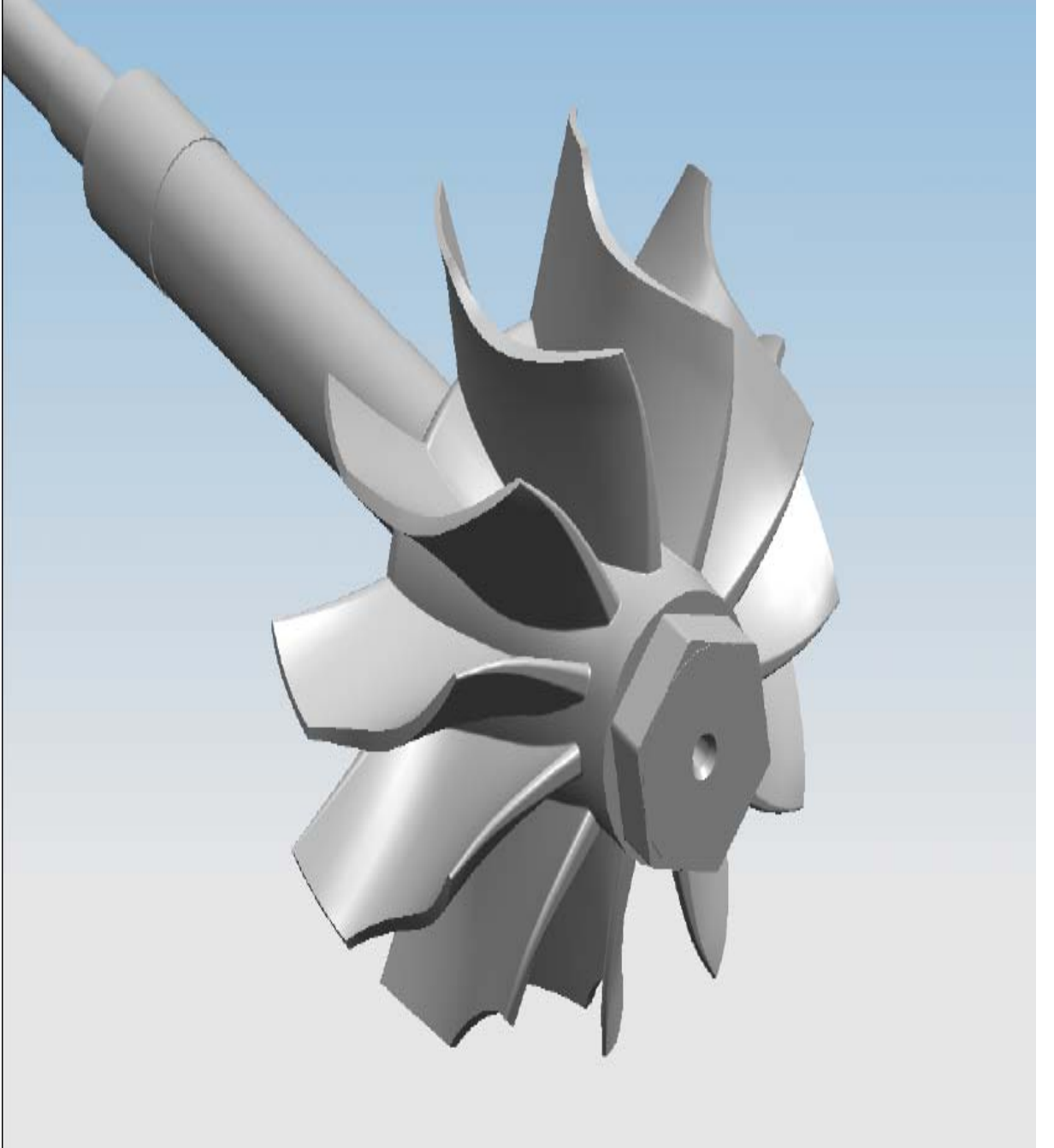


Şekil 5.1; Kullanılan ATOS I sisteminin şematik görünümü

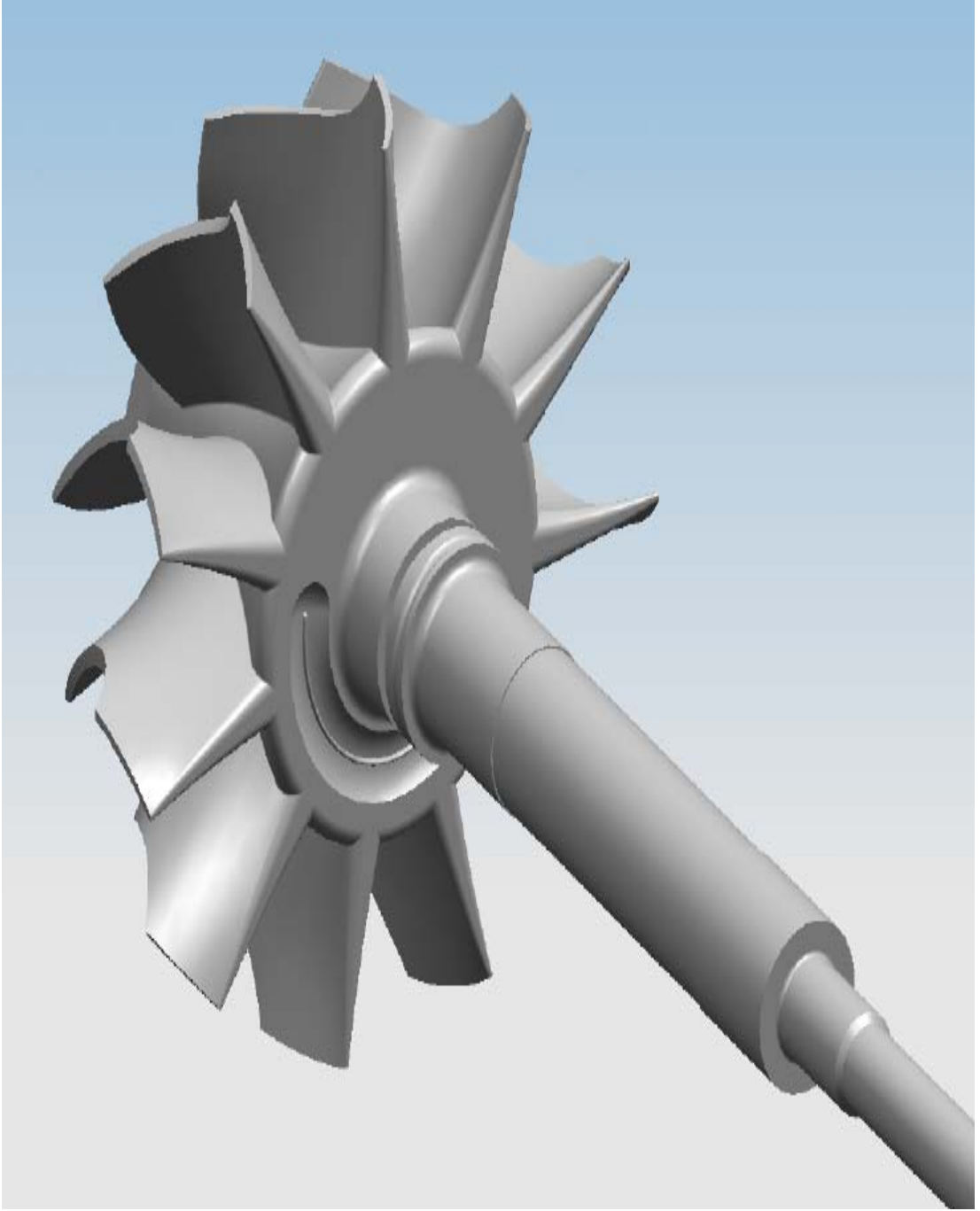
Şekil.1-5 nokta bulutundan birleştirilerek Unigraphics NX programında birleştirilen türbin çarkının katı model resimlerini göstermektedir. Şekil.6'da ise parçanın çeşitli görüşlerden alınmış teknik resmi gösterilmiştir.



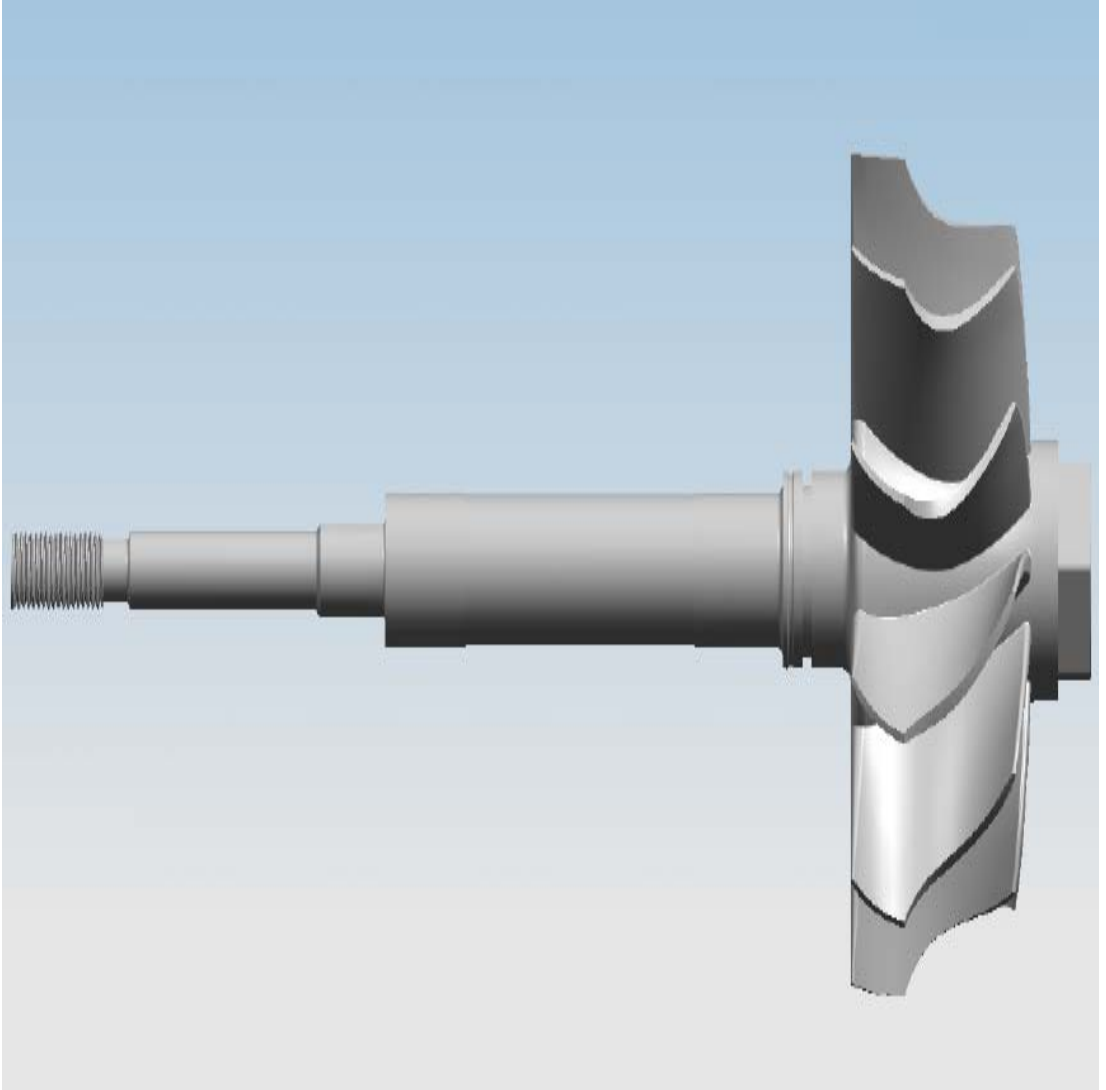
Şekil 5.2; Nokta bulutundan katı modele



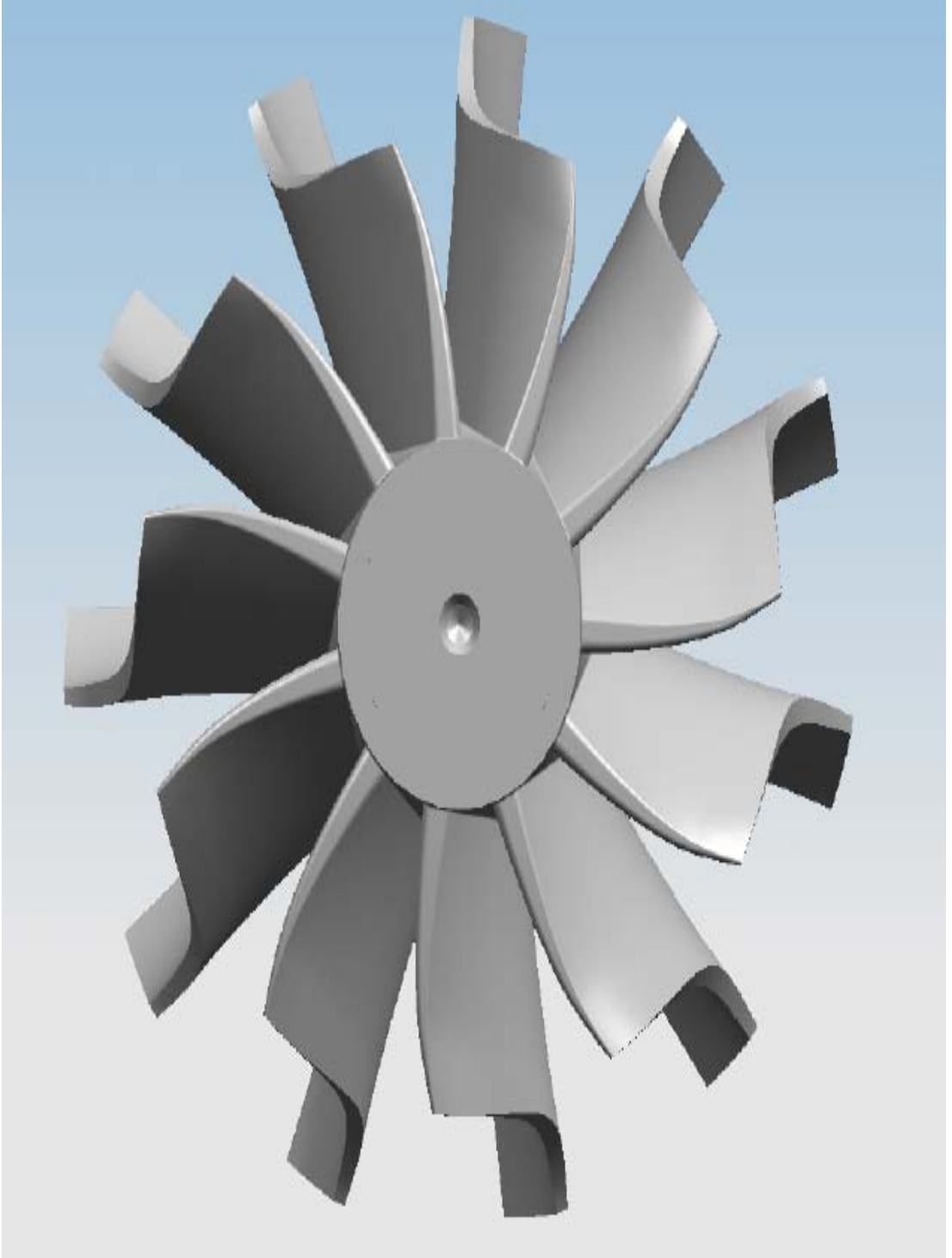
Şekil 5.3; Nokta bulutundan katı modele



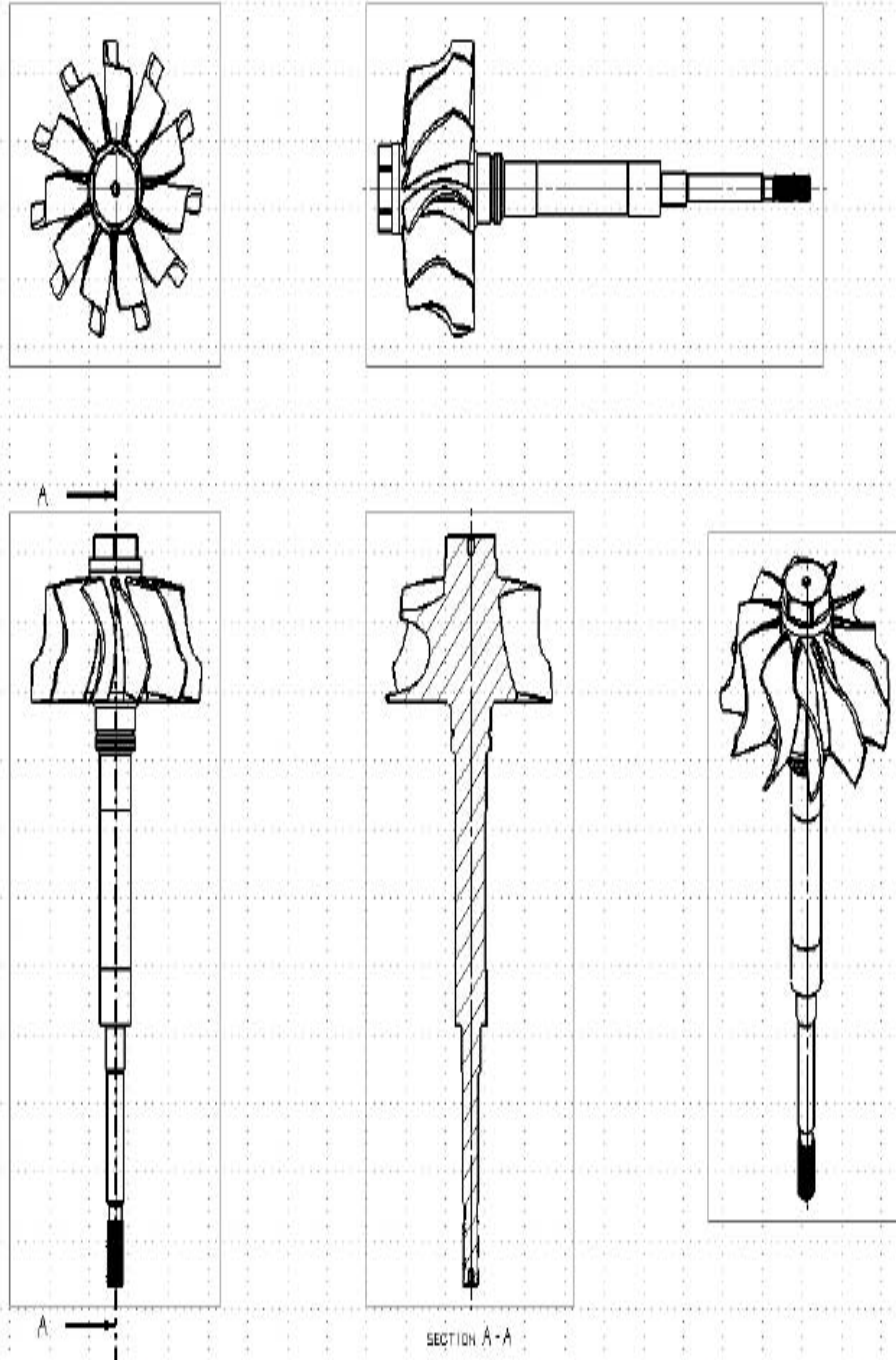
Şekil 5.4; Nokta bulutundan katı modele



Şekil 5.5; Nokta bulutundan katı modele



Şekil 5.6; Nokta bulutundan katı modele



Şekil 5.7; Parçanın teknik resmi

Aşağıdaki şekiller ise parçanın çekilmiş resimlerini göstermektedir.



Şekil 5.8; Türbin çarkı



Şekil 5.9; Türbin çarkı



Şekil 5.10; Türbin çarkı

6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada önce tersine mühendislik ve uygulamaları, daha sonra CMM tezgahları ve nihayetinde son yılların yükselen ve yaygınlaşan trendi olarak kabul edebileceğimiz 3D tarayıcılar incelenmiştir. Bu tez, birbirleri ile iç içe geçmiş bağlantıları bulunan bu üç konunun eşzamanlı olarak incelenmesi açısından Türkiye’de bir ilktir ve son teknoloji 3 boyutlu tarayıcıların yaygınlaşmasına doğru ufak bir pencere açmak niyetiyle seçilmiş ve hazırlanmıştır.

“Tersine mühendislik”, “3 boyutlu tarama”, “veri toplama”, “sayısallaştırma” gibi kavramlar günümüzde sıklıkla birbirleri ile iç içe geçmiş biçimde kullanılmaktadır. Endüstri bunların tümü için ortak bir isim üzerinde henüz anlaşılamamış olsa da tersine mühendisliğin mevcut bir tasarımın kopyalanmasından çok daha fazla şeyler ifade ettiği açıktır. Tasarım, dokümentasyon, görüntüleme, analiz, imalat ve muayene gibi terimler 3 boyutlu tarama uygulamalarının çalışma konularına dahildir. Bu yüzden endüstri tersine mühendislik teriminde ısrar etmektedir.

Bir tersine mühendislik projesine start verirken düşünülmesi gereken ilk nokta prosesin temaslı mı yoksa temassız mı olması gerektiğidir. Ardından gerekli nokta sayısı, istenen hassasiyet, sistemin portatifliği ve proses için gerekli süre gibi diğer gereksinimler belirlenmelidir.

Serbest şekilli yüzey ölçümü konusunda piyasada halen belirli bir açık vardır. Lazer tarama teknolojisinin ortaya çıkışı ve geliştirilmesi bu açığı kısmen de olsa kapatmayı başarmıştır. Bu amaçla kullanılan CMM’lerin avantajı bu tezgahların tam ve kesin ölçümler için kullanışlı olmalarıdır. CMM prizmatik özellikleri, silindirleri, delikleri ölçebilir ve CMM bu özellikleri detaylı olarak ölçmeye muktedirdir. Bir lazer tarayıcı ise ışına dayalı bir sistemdir, yani deliklerin ve çatlakların içine detaylı olarak giremez. CMM dokunmatik bir prob ile parçaya fiziksel olarak dokunurken lazer tarayıcı objeye dokunmaz ve objeyi deforme etmez. Burada önemli olan bu teknolojilerin birbirlerini tamamlayıcı olmalarıdır. Pek çok firma hem temaslı hem de temassız sistemlerden yararlanmaktadır.

Hassasiyet pek çok uygulama için kaçınılmazdır. Bununla beraber temaslı ve temassız prosesler arasındaki fark bulanıklıktır. Günümüz teknolojisi ne yazık ki son derece hassas sonuçlar elde edememektedir. Lazer tarayıcıların hassasiyeti zamanla iyileşmekte ve CMM'lerinkine gittikçe yaklaşmaktadır.

Lazer tarama ışının yansıtıldığı üçgenleme prensibine dayanmaktadır. Işın objeye yansıtıldığında ışının şeklini izlemek için CCD kameralar kullanılmaktadır. Bu kameralar objeyi farklı açılarda gözlemleyerek kontrastları hesaplar. Beyaz ışın sistemi ile çalışan ATOS ve I-Metric gibi sistemler bir ölçümde büyük miktarda veriye gereksinim duyar. Ancak verilerin elde edilem süresi 20-30 saniye mertebelerindedir. Lazer tabanlı sistemler verileri daha hızlı elde edebilir ancak bu tarayıcıların taradıkları objeler daha küçük bir hacimde olacaktır. CMM teknolojisi dakikada birkaç nokta toplayabilirken bir tarama sistemi saniyede binlerce nokta toplayabilmektedir.

Tarama prosesinin diğer önemli bir noktası da yazılımdır. 3 boyutlu tarayıcı verilerini işlemek için pek çok yazılım seçeneği mevcuttur ve bunların her birinin birbirlerine göre avantajları vardır. Ancak günümüz tarayıcılarında kullanılan yazılımların hiç birisi tam anlamıyla mükemmel değildir. Bunun sebeplerinden biri de tarayıcı imal eden firmaların yazılımları da üretmemesi veya üretmeleri durumunda bu yazılımlara gerekli ehemmiyeti göstermemesidir. Tarayıcının kendisi rekabet unsuru olarak görülmekte, yazılıma tali olarak önem verilmektedir. Tarayıcıların tam bir tercih unsuru olabilmeleri için öncelikle yazılımların iyileştirilmesi gerekmektedir.

Tez çalışmasını pekiştirmek amacıyla bir türbin çarkı ATOS I tarayıcısında taranmış ve tarama sonucu elde edilen nokta bulutu Unigraphics NX CAD programı kullanılarak tekrar birleştirilmiş ve tersine mühendislik uygulaması ile mevcut parçanın CAD verileri elde edilmiştir. Bu tarama sonucu elde edilen nokta bulutunun birleştirilmiş hali ve parçanın teknik resmi ekte verilmiştir.

Bu tezin bu yeni teknolojinin ülkemizde giderek artan bir ivme ile uygulanmasına öncülük etmesini temenni ediyorum.

KAYNAKLAR

1. A. Fischer, Multi-level models for reverse engineering and rapid prototyping in remote CAD systems, *Computer-Aided Design*, Volume 32, Issue 1, 1 January 2000, pp. 27-38.
2. A. Seiler, et.al., Reverse engineering from uni-directional CMM scan data, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11, pp.276-284, 1996.
3. A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Wiszkowski and Z. Lechniak, Reverse engineering of free-form surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 76, Issues 1-3, April 1998, pp. 128-132.
4. A., Kusiak, *Concurrent Engineering: Automation, Tools, And Techniques* (USA, Wiley Interscience), 1993.
5. Alan C. Lin, Shou-Yee Lin and Tse-Hao Fang, Automated sequence arrangement of 3D point data for surface fitting in reverse engineering, *Computers in Industry*, Volume 35, Issue 2, March 1998, pp. 149-173.
6. Bopaya Bidanda and Yasser A. Hosni, Reverse engineering and its relevance to industrial engineering: A critical review, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 26, Issue 2, April 1994, pp. 343-348.
7. M. Mavromihales, J. Mason and W. Weston, A case of reverse engineering for the manufacture of wide chord fan blades (WCFB) used in Rolls Royce aero engines, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 134, Issue 3, 20 March 2003, pp. 279-286.
8. Pennell, J.P., Winner, R.I., *Concurrent Engineering: Practices And Prospects*, *Proceedings Of The IEEE Global Telecommunications Conference And Exhibition*, Piscataway, NJ, USA, 1, pp. 647-655, 1989.
9. Pramod N Chivate and Andrei G Jablokow, Review of surface representations and fitting for reverse engineering, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Volume 8, Issue 3, August 1995, pp. 193-204.
10. Pramod N. Chivate, Nirant V. Puntambekar and Andrei G. Jablokow, Extending surfaces for reverse engineering solid model generation, *Computers in Industry*, Volume 38, Issue 3, April 1999, pp. 285-294.

11. Robert B. Fisher, Applying knowledge to reverse engineering problems, Computer-Aided Design, In Press, Corrected Proof, Available online 29 August 2003.
12. Saeid Motavalli, Review of reverse engineering approaches, Computers & Industrial Engineering, Volume 35, Issues 1-2, October 1998, pp. 25-28.
13. Akdogan, A., Görür, B.V., Yurci, M.E., Durakbasa, M.N., "Comparision of Coordinate Measuring Machines Digitizing Capability and an Optical Digitizer" WEISIC 2003, Proceedings of 4th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration, University of Miskolc, Hungary, 28-30 May, 2003, pp.261.
14. Broggiato, G.B., Campana, F., Gerbino, S., "Shape deviation Analysis on Sheet-Metal Parts Through Reverse Engineering Techniques", XII ADM International Conference-Italy-Sept. 5th-7th, 2000
15. Varady T, Martin RR, Cox J. Reverse engineering of geometric models – an introduction. Comput Aided Des 1997;29:255-68.
16. Benko P, Martin RR, Varady T. Algorithms for reverse engineering boundary representation models. Comput aided Des 2001;33:839-51.
17. Au CK, Yuen MMF. Feature-based reverse engineering of mannequin for garment design. Comput Aided Des 1999;31:751-9.
18. Thompson WB, Owen St JC, Germain HJ. Feature-based reverse engineering of mechanical parts. IEEE Trans Robotic Autom 1999;15:57-66.
19. Ke YL, Liu YF, Fan SQ. Feature-based reverse engineering modeler-RE SOFT. J Comput Aided Des Comput Graph 2004;16:799-811.
20. Lu Z. Study on feature technology in reverse engineering CAD modeling. PhD Thesis. Zhejiang University; 2004.
21. Pratt V. Least squares fitting of algebraic surfaces. Comput Graph 1987;21:145-52.
22. Werghi N, Fisher R, Robertson C, Ashbrook A. Object reconstruction by incorporating geometric constraints in reverse engineering. Comput aided Des 1999;31:363-99.
23. Flynn PJ, Jain AK. On reliable curve estimation. IEEE Conf PAttern Recogn 1989;110-6.
24. K.-C. Fan, A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles, Computer Integrated Manufacturing System 10 (1997) 277-285.

25. G. Wang, B. Zheng, X. Li, Z. Houkes, Modeling and calibration of the laser beam scanning triangulation measurement system, *Robotics and Autonomous Systems* 40 (2002) 267-277.
26. G. Zhang, Z. Wei, A novel calibration approach to 3D Vision Inspection, *Optics and Laser Technology* 34 (2002) 373-380.
27. S. Son, H. Park, K.H. Lee, Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 889-897.
28. R.J. Valkenburg, A.M. Mcivor, Accurate 3D measurement using a structured light system, *Image and Vision computing* 16 (1998) 99-110.
29. S.-W. Kim, Y.-B. Choi, J.-T. Oh, Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase shifting grating projection moire topography, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) 389-401.
30. A.W. Fitzgibbon, Robust registration of 2D and 3D point sets, *Image and Vision Computing* 21 (2003) 1145-1153.
31. X. Yan, P. Gu, A review of rapid prototyping technology and systems, *Computer-Aided Design* 28 (1996) 307-318.
32. T. Wohlers, 3D digitizing for reverse engineering, *Computer Graphics World* 18 (1995) s1-s3.
33. Y. Zhao, O. Li, Z. Pu, Shape measurement based on fiber-optic technique for complex internal surface, *Measurement* 30 (2001) 289-295.
34. J. Kopac, M. Sokovic, Prototype workshop – first step for a successful flow of orders at automotive industry Innovative Automotive Technology – IAT'03, Koper/Portoroz, April 24-25, 2003, pp. 459-467 (in Slovene).
35. T. Herbertson, Reverse engineering in: Fourth International Conference on Industrial Tools ICIT 2003, April 8th-12th, Bled, Slovenia, 2003, pp. 419-422.
36. Nishihara, H.K., practical real time imaging stereo matcher, *Journal of Optical Engineering*, H-2000-3120-04-B, Renishaw plc, UK.
37. Jarvis, R.A., A laser time of flight range scanner for robotic vision, *IEEE PAMI*, 5(5), 1983, 505-512.

38. Wang, Y.F. and Aggarwal, J.K., 3D object description from stripe coding and multiple views, *Proceedings of the 5th Scandinavian Conference on Image Analysis*, 1987, 60(6), 1987, 669-680.
39. Will, P.W. and Pennington, K.S., Grid coding: a novel technique for image processing, *Proceedings of the IEEE*, 60(6) 1972, 669-680.
40. Vida, J, Martin, RR and Varady, T, A survey of blending methods that use parametric surfaces, *Computer Aided Design* 2(5), 1994, 341-365.
41. Modjarrad, A., Non-contact measurement using a laser scanning probe, *SPIE, In-process Optical Measurements*, 1012, 1988, 229-239.
42. Marshall, A.D. and Martin, RR, *Computer Vision, Models and Inspection*, World Scientific Publishing, Singapore, 1992.
43. Milroy, M.J., Bradley, C. and Vickers, G.W., Segmentation of a wrap-round model using an active contour, *Computer Aided design* 29, 1997, 299-320.
44. Besl, P.J., and Jain, R.C., Segmentation through variable order surface fitting, *IEEE PAMI* 10(2), 1988, 167-192.
45. Lonardis, A, Gupta, A and Bajcsy, R, Segmentation of range images as the search for geometric parametric models, *International Journal of Computer Vision*, 14, 1995, 253-277.
46. Hoschek, J and Lasser, D, *Fundamentals of Computer Aided Geometric Design*, A.K. Peters, 1993.
47. Eck, M and Hoppe, H, Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type, *Computer Graphics (SIG-GRAPH '96 Proceedings)* 30, 1996, 325-334.
48. Hermann, T, Kovacs, Z and Varady, T, Special applications in surface fitting, *Geometric Modelling Studies, GMS 1996/3*, Computer and Automation research Institute, Budapest, 1996.
49. Hoffman, C.M., and Juan, R, Brep, an editable, high level representation for geometric design and analysis, *Geometric and Product Modelling* ed. P.Wilson, M.Wozny and M.J. Pratt, North Holland, 1993, pp. 129-164.
50. Hans Joachim Neumann, "Industrial Coordinate Metrology"
51. John A. Bosch, "Coordinate Measuring Machines and Systems"
52. Breuckmann GmbH *Industrial Image Processing and Automation (Help Documents)*, Mayis 2005

53. Görür B. V., Akdoğan A. N., Yurci M. E., "Optik Ölçme Yöntemlerinin Sac ve Plastik Parçaların İmalatındaki Sayısallaştırma, Tersine Mühendislik ve Muayene Prosesleri Yönünden Sağladığı Yararlar", www.turkcadcam.net/rapor/..., Aralık 2003
54. Dereli T., Baykasoğlu A., "Tersine Mühendislik", www.turkcadcam.net/rapor/..., Nisan 2005
55. The Basics of Photogrammetry, Geodetic Services, Inc. www.geodetic.com/whatis.htm
56. Optical Triangulation, Optical Metrology Centre www.optical-metrology-centre.com/tech_briefs_optical_triangulation.htm
57. Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., 2001: The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording, XVIII. CIPA Symposium, Potsdam, Germany, Proceedings.
58. Visnovcova, J., Zhang, L., Gruen, A., 2001: Generating a 3D model of a Bayon tower usşng non-metric imagery. Int. Archives of ISPRS, Volume XXXIV, PArt 5/W1, pp. 30-39.
59. K.H.Lee, H.Park, S.Son, A framework for laser scanner planning of freeform surfaces, International Journal of Advance Manufacturing Technology 17 (2001) 171-180.
60. M. Chang, P.P. Lin, On-line free form surface measurement via a fuzzy logic controlled scanning probe, International Journal of Machine Tools and Manufacture 39 (1999) 539-552.
- 61 F. Xi, C. Shu, CAD based path planning for 3D line laser scanningi Computer Aided Design 31 (1999) 473-479.
- 62 A. Bernard, M. Veron, Analysis and validation of 3D laser sensor scanning process, Annals of the CIRP 48 (1) (1999).
- 63 Ames A., VRML 2.0 sourcebook, New York: Wiley; 1996.
- 64 Castleman K. Digital image processing, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1996.
- 65 Cyra Technologies, 3D laser scanner; 2002, www.cyra.com
- 66 Holub P., DV technology overview and video camera test 2001; www.cesnet.cz/doc/techzpravy/2001/12/.

ÖZGEÇMİŞ

14 Mart 1976 tarihinde doğdu. İlkokul eğitimini takiben orta ve lise öğrenimini Denizli Anadolu lisesi'nde 1994 yılında tamamladı. Aynı yıl İTÜ Makine Fakültesine girdi ve Haziran 1999'da Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Mezuniyeti takiben Momentum firmasında CAD uzmanı olarak çalışmaya başladı. Akabinde Boğaziçi Yazılım firmasına girerek Haziran 2002'e kadar bu şirkette gene CAD uzmanı olarak hizmet verdi. Daha sonra Gebze İleri teknoloji Enstitüsünde Tasarım ve İmalat Bölümü'nde yüksek lisansa başladı. Bekardır ve İngilizce ve İspanyolca bilmektedir.