

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL BİR DELTA ROBOTUN GERİ ADIMLAMA
TEKNİĞİ İLE YÖRÜNGE İZLEME KONTROLÜ

İLHAM ÇELEBİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL BİR DELTA ROBOTUN
GERİ ADIMLAMA TEKNİĞİ İLE
YÖRÜNGE İZLEME KONTROLÜ

İLHAM ÇELEBİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**TRAJECTORY MONITORING CONTROL
WITH THE BACKSTEPPING TECHNIQUE
OF AN INDUSTRIAL DELTA ROBOT**

İLHAM ÇELEBİ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/ 07 / 2019 tarih ve 2019 / 30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04 / 11 / 2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan İlham ÇELEBİ 'nin tez çalışması Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

Selim Sivrioğlu

ÜYE

: PROF. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

Erkan Zergeroğlu

ÜYE

: PROF. DR. ERCAN ERTÜRK

Ercan Ertürk

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, hafifliği, hızı ve hassaslığı ile öne çıkan delta robot sistemlerinin yörünge takip performansının artırılmasına yönelik kontrol tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ele alınan delta robot sistemine ait ileri-ters kinematik analizler neticesinde çalışma alanı belirlenmiş ve bu alan içerisinde kalacak şekilde farklı yörünge senaryoları oluşturulmuştur. Tasarlanan bu yörünge şartları altında kontrol performansı hem simülasyon ortamında hem de deneysel olarak test edilmiştir.

Kontrol yöntemi olarak sağladığı hassas konumlama performansı ve dış bozucu etkilere karşı dayanıklı olması sebebiyle Lyapunov teoremi esaslı Geri adımlama (Backstepping) kontrol yöntemi seçilmiştir.

Önerilen kontrol yöntemleri her bir motor için gerekli kontrol torkunu hesaplamaktadır. Deneysel gerçekleştirme aşamasında ise hesaplanan kontrol torku, redüksiyon ve motor elektriksel özellikleri dikkate alınarak kontrol voltajı olarak motorlara uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, önerilen kontrol yaklaşımlarının istenen yörüngeyi sağlamadaki başarısı açık şekilde ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Delta Robot, Paralel Robot, Yörünge İzleme.

SUMMARY

In this thesis, control designs have been realized to improve the trajectory tracking performance of delta robot systems, which stand out with their lightness, speed and precision. As a result of the forward-inverse kinematic analysis of the delta robot system, the working area was determined and different trajectory scenarios were created to remain within this area. The control performance under these designed trajectory conditions was tested both in simulation environment and experimentally.

Lyapunov theorem based (backstepping) control method has been chosen as the control method because of its precise positioning performance and resistance to external disturbances.

The recommended control methods calculate the required control torque for each motor. In the experimental realization stage, the calculated control torque, reduction and electrical properties of the motor were applied to the motors as control voltage. When the results obtained are examined, the success of the proposed control approaches in achieving the desired trajectory is clearly demonstrated.

Key Words: Delta Robot, Parallel Robot, Trajectory Tracking.

TEŞEKKÜR

Bünyesinde 20 yıldır çalıştığım kurum olan HKTM firmasına hem çalışanları ile yarattığı ve hareket kontrol sistemleri konusunda ülkemize kattığı değerlerden ötürü hem de tez çalışması kapsamında yer alan prototip yapımında ve kontrol tasarımı verdiğ destekten ötürü teşekkür eder, özellikle Gökhan Tokur, Gürkan Topbaş ve Tolga Cankurt’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu projede önemli destekler sunan danışmanım Prof. Dr. Selim Sivrioğlu’na ve sonsuz destekleriyle beni yönlendirerek, tez çalışmasının sağlıklı ilerlemesini sağlamak için önemli katkılar sunan Makine Mühendisliği Fakültesi Asistanı Dr. Ali Suat Hocama teşekkür ederim.

Her daim yanımda olan destekleyicim, eşim Elif ve oğullarım Mirali ve Mahir Çelebi’ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	3
1.2. Literatür Çalışması	4
2. DELTA ROBOT MODELİ	7
2.1. Kinematik Modelleme	8
2.1.1. İleri Kinematik Analiz	9
2.1.2. Evrik Kinematik Analiz	15
2.2. Dinamik Modelleme	18
3. DELTA ROBOT İMALATI	26
3.1. Ekipman Bilgisi	28
4. KONTROL TASARIMI	34
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	38
5.1. Al-Bırak (Pick-Place) Yörünge Performansı	39
5.2. Dairesel Yörünge İzleme Performansı	40
5.3. Köşeli Yörünge Performansı	41
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	45
6.1. Dairesel Yörünge İzleme Performansı	45
6.2. Daire Yörünge İzleme Performansı	49
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	55

KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	58
EKLER	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
3D	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)
$ OF_1 $	: Sabit Platform Üçgen kenarı
$ O $	: Alt Yarı Çap (Hareketli Platform)
e	: Alt Üçgen Kenar Boyu
f	: Sabit Platform Üçgen kenarı
K_1	: Tork Sabit
mm	: Milimetre
N	: Dış Çevirimi
r_e	: Uzun Kol
r_f	: Kısa Kol
R_a	: Sistem direnci
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
HKTM	: Hareket Kontrol Teknolojileri Merkezi
EPFL	: École Polytechnique Fédérale

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Paralel robotların yapılarına göre sınıflandırılması.	2
1.2: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.	4
2.1: Hareketli platform ve Sabit Platform eksenlerinin paralel çalışması.	7
2.2: Oluşturulan delta robotun x.y.z koordinatlarında çalışma uzayı.	8
2.3: Açısal döngüden kartezyen sisteme dönüşümde ileri kinematik.	9
2.4: Delta robotun şematik gösterimi.	10
2.5: Delta robotun mafsalları, köşe noktaları ve ana çerçevesi gösterimi.	10
2.6: Delta robotun sabit platformunda mafsalları noktalarının oluşturduğu üçgen.	11
2.7: Kartezyen sistemden açısal döngüye dönüşümde evrik kinematik.	15
2.8: Kartezyen sistemden açısal döngüye dönüşümde evrik kinematik.	16
2.9: Kartezyen sistemin örnek gösterimi.	16
2.10: Hareketli tablanın oluşturduğu üçgen.	17
2.11: Dinamik modellemeye esas yapı.	20
2.12: Delta robot kinetik yapısını oluşturan kollar.	21
3.1: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.	27
3.2: Delta robot kofigüre edilmiş ölçülü dizayn resmi.	27
3.3: Delta Robot Servo Motoru.	28
3.4: Delta robot eksen redüktörleri.	28
3.5: Delta robot sabit platform tablası	29
3.6: Delta robot redüktör destek parçası.	29
3.7: Delta robot ara bağlantı parçası.	30
3.8: Delta robot hareketli platform.	30
3.9: Delta robot kısa kol.	31
3.10: Delta robot uzun kol bileşenleri.	31
3.11: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.	32
3.12: Deneysel Projede Kullanılacak Delta Robot Sistem Bileşenleri.	32
5.1: Matlab-Simulink blok diyagramı.	38
5.2: Delta Robot Modelinin Alt Sistemi.	38
5.3: İdeal al-bırak yörünge tasarımı.	39
5.4: Kontrollü al-bırak uç nokta hareketi.	40

5.5: İdeal derinliği değişken spiral yörünge izi.	41
5.6: Kontrollü dairesel uç nokta hareketi.	41
5.7: Kontrollü köşeli uç nokta hareketi.	42
5.8: Kol açıları hata değeri.	43
5.9: Motorlara Verilen Tork Değeri.	43
6.1: İdeal derinliği değişken spiral yörünge izi.	46
6.2: İstenen ve gerçekleşen motor aç değeri.	47
6.3: İstenen ve gerçekleşen motor açıları arasındaki hata payı.	48
6.4: Belirlenen yörünge hareketinde motorlara aktarılan kontrol voltajı (V).	49
6.5: Zamana bağı olarak z ekseninin istenen değere yaklaşımı.	50
6.6: Daire yörünge izleme performansı.	51
6.7: Daire yörüngesi takibinde kontrol voltajı değeri.	52
6.8: Deneysel çalışmada kullanılan matlab-simulink diyagramı.	53
6.9: Simülasyon Çıktısı ile Deneysel Sonuç karşılaştırması.	54

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Deneysel Projede Kullanılacak Delta Robot Değerleri.	9
3.1: Deneysel çalışma için üretilen delta robotun sistem bileşenleri.	32

1. GİRİŞ

Bir robottan beklenen doğruluk, hassasiyet ve hız en temel unsurlardır. Günümüz endüstrisi, tarihinde hiç olmadığı kadar limitlerini zorlamakta, bilim ve teknolojiye de değişimlere hızla ayak uydurmaktadır. Üretim makineleri artık birden fazla görev üstlendiğinden aynı üretim hattında birden çok ürün üretilmektedir. En nihayetinde esnek ve yalın üretim ihtiyacı ancak robotik çözümlerle sağlanabilmektedir.

Robot Teknolojisi, seri kinematik mantığı üzerine gelişimini sürdürmüştür. Ancak endüstrinin ihtiyaç duyduğu hızlı üretim, mevcut mekanik yapı ile ihtiyacın karşılanamaz duruma gelmesine neden olmaktadır. Eksenlerin birbiri üzerine inşa edildiği yapılarda büyük mekanizmalar ve daha ağır eklemler kullanılmaktadır. Büyük bir kütlenin harekete başlaması ve duruşa geçmesi için ihtiyaç duyulan momentler ancak daha büyük motorlarla sağlanabilmektedir. Kütleler arttıkça ataletlerin büyümesi, ivmeleri ters yönde etkilemektedir. Bu tarz sorunlar tasarım kriterleri olarak radikal denilebilecek bir yaklaşımla, paralel çalışan eksenlerin robotik dünyasına girmesi ile çözülmektedir.

Paralel Robot yapısında, eklemler birbiri üzerine kurulmadan, hepsi aynı gövde üzerine konumlanmaktadır. Böylece hiçbir kol bir sonrakini kaldırmak zorunda kalmayarak, gereksiz bir yükün neden olduğu olumsuzluklarla karşılaşmamaktadır. Bütün eksenler robotun gövdesini kaldırmadan ihtiyaç duyulan iş yükünü sağlamaktadır. Robot eklemlerinin hafiflemesi ile ataletler de küçülerek motorların daha dinamik ve verimli çalışması sağlanmaktadır.

Eklemlerin aynı gövdeye bağlanması, hassasiyet açısından da olumlu sonuçlar vermektedir. Seri kinematik yapıda her bir eksenin ardışık bağlantısı, hataların kümülatif olarak bütün yapıyı etkilemesi anlamına gelmektedir. Bu da seri mekanizmanın toplam hatasını büyütmektedir. Ancak paralel robotlarda hatalar birbiri üzerine eklenmediği için daha hassas konumlama yapma olanağı sağlanabilmektedir. Paralel robotlar ile seri robotları karşılaştırdığımızda teorik olarak daha üstün oldukları görülmektedir.

Paralel robotlar genellikle daha hafif kinematik eksenlere sahiptir, çünkü ağır aktüatörler kinematik eksenlerin içine değil, çoğunlukla sabit taban platformuna monte edilmektedir.

Paralel robotlar seri robotlara göre daha hızlı hareket eder ve daha az enerji tüketir. Bunu en önemli nedeni hareketi aktaran eksenlerin daha hafif olmasıdır [Tlusty et al., 1999].

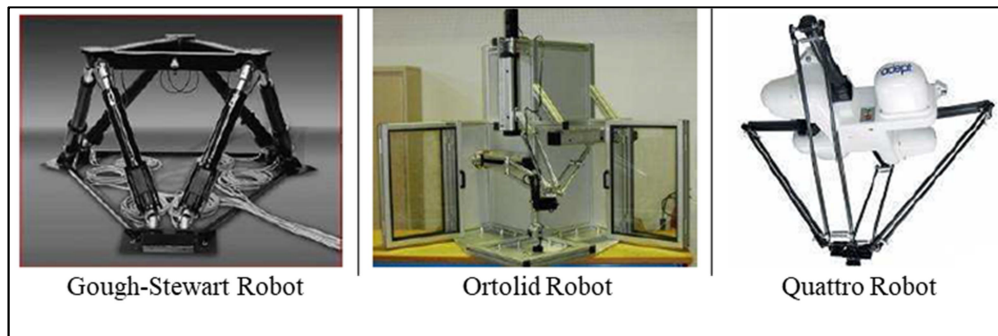
Hareketi aktaran eksen ne kadar uzun ve ağır olursa, o kadar zayıf olmaktadır. Seri robotun kinematik elemanları kendi içinde bir burulma uygulamaktadır.

Seri robotların aksine, paralel robotların daha az hataya açık oldukları görülmektedir. Bunun nedeni, mekanizmanın montajında ve mekanizmayı kontrol ederken yapılan hataların birbirine eklenerek biriktirilmesi yerine her bir eksenin kendi hatası ile sınırlı olmasıdır [Merlet, 2000].

Bununla birlikte, pratikte paralel robotları da sınırlayan ve bazı uygulamalarda paralel robotlar yerine seri robotların kullanılmasını gerektiren durumlar oluşmaktadır. Bu gibi durumlara özellikle boyutlarının daha büyük olmasına karşılık sınırlı hareketli eksenleri arasındaki kapalı döngü çalışma uzayını daraltmaları gösterilebilir [Merlet, 2000].

Karmaşık kapalı döngü yapılar nedeniyle uç işleyicinin konumlanma hassasiyeti sağlamak ve modellemelerini yapmak oldukça zordur [Merlet, 2000]. Ayrıca kinematik bacaklar arasındaki eşleşmenin bir sonucu olarak, uç işleyicinin kartezyen uzayda hareketi, doğrusal olmayan bir dinamiğe sahiptir [Dasgupta and Choudhury, 1999].

Paralel Robot ailesine ait delta robotlar, basit mekaniğinin yanı sıra bir robotta bulunması gereken bütün özellikleri kendisinde barındırmaktadır. Mevcut tasarımlar Şekil 1.1’de [Ergül, 2009] verilmiştir.



Şekil 1.1: Paralel robotların yapılarına göre sınıflandırılması.

Günümüzde delta robotlar hız gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Uygulama alanı olarak paketleme teknolojilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Robot

özmleri ile artık kısa sürede robot uygulamaları geliştirilebilmekte ve zorlu kinematik yapıları inşa edilebilmektedir. Tez çalışmasının deneysel uygulama için geçirdiği evreler ile çoklu eksen kontrol kartlarından işe özel değişken uygulamalar çok daha hızlı adapte edilebilmektedir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Endüstrimizde mevcut bulunan 3 eksenli kartezyen sistemlerin, eksen kontrolünün ve kinematik tasarımının daha kolay olmasından dolayı sıralı seri lineer aktüatörler üzerine gelişim gösterdiği görülmektedir. Lineer sistemlerde triger kayış ve vidalı mil gibi mekanik sistemler ile servo motorlar, dönme hareketinde lineer hareket elde etmek için kullanılmaktadır. Bilyalı araba ve bilyalı rulman gibi ekipmanları ise yataklama amacı ile kullanılmaktadır. Yüke ve tahrik sistemine bağlı olarak servo motor ve redüktörler birlikte kullanılabilir. Ancak bu dizayn yapısının kendi ağırlığı ile yüksek ataletlere neden olması, makine imalatçılarının yüksek ivmeli dizaynlarının önünde bir engel olarak görülmektedir.

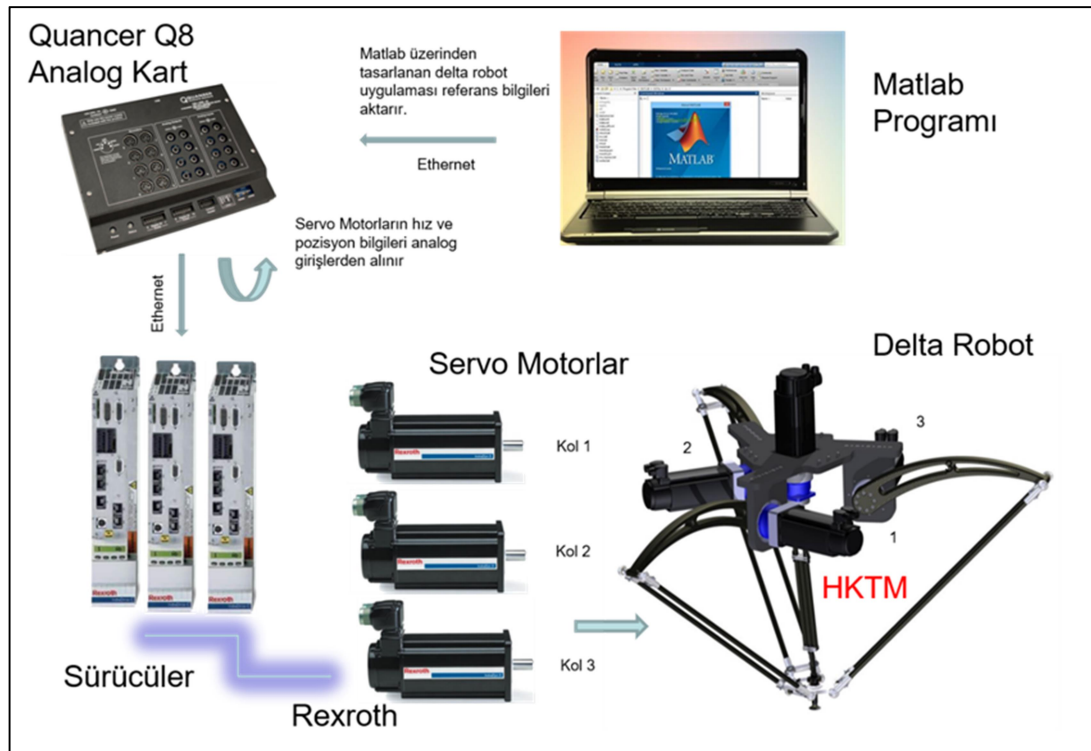
Mekanizma tekniklerinde, paralel mekanizmalar ile sisteme özel projelerin daha fazla endüstride yer almasının yüksek ivmeli ve ihtiyaca karşılık gelen makinelerin üretimine destek sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında delta robot uygulamaları baz alınarak paralel robot sistemlerde yörünge kontrolü ile performansın ilişkisi irdelenerek uygulama esaslı deneyimleme sağlanmaya çalışılmıştır. Oluşan deneyimler ile işe özel parametrelerin uygulama esasları değerlendirilebilecektir. Özellikle hat sonu uygulamalarında her firmanın kendisine özel kontrol sistemini tasarlayarak ürünün en zor ve maliyetli olan kontrol kısmını geliştirmesi ve bu konuda farkındalık yaratması hedeflenmektedir.

İleri kinematik analiz ile verilen eksen açılarına göre delta robot uç işleyicinin konumu ve yönelimi, sabit platform tabanına göre hesaplanmaktadır. İleri kinematik analiz yönteminde, paralel robot manipulatör analizlerinde sıkça kullanılan ve uygulaması daha uygun olan geometrik yöntem bazlı yaklaşım uygulanmaktadır. Ters kinematik analiz ile belirlenen uç işleyicinin kartezyen koordinat değerlerine göre mümkün olan tüm eksen açıları çıkartılabilmektedir. Diğer bir deyişle, delta robotun uç işleyicisinin hareketli tabana göre verilen koordinatlara gelebilmesi için gerekli eklem açılarının hesaplanması sağlanmaktadır. Robotun hareket

ettirilebilmesi için gerekli eksen dönme momentlerini hesaplayabilmek için dinamik modellemesi yapılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında dinamik model ile oluşturulan kontrol algoritması simülasyonu yapılarak, sonuçları gözlemlenmiştir. Dinamik modelleme ile hazırlanan kontrol tasarımı, imalatı yapılan delta robot üzerinde çalıştırılarak simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır. İmal edilen delta robotun ölçü parametreleri, tüm dinamik analizde ve simülasyon uygulamalarında kullanılmıştır.

Oluşturulan modellemede kullanılan servo motor, sürücü kartları ve analog girişleri kullanılarak Quancer Q8-USB kartı ile Matlab-Simulink programında oluşturulan blok diyagram çıktılarına göre referans verilmiştir. Aynı zamanda servo motor sürücülerinden alınan pozisyon (açı) ve hız bilgilerine göre sistem kapalı çevrim olacak şekilde çalıştırılmıştır. Bu yapı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.

1.2. Literatür Çalışması

Delta robotların temelinin, paralel robotlardaki yaklaşık yüzyıllık gelişim süreçleri oluşturmuştur. Literatür çalışmasında, akademik sürecin yanı sıra

endüstride üretimi yapılmış çalışmalara da yer verilmiştir. Delta robotun gerçekleşmesinin endüstride oluşan net ihtiyaca dayalı olması, bu yaklaşımın ana nedenini oluşturmaktadır.

Paralel robot temeli, 1947'de Gough tarafından atılmıştır. Gough, hareketli bir platformun konumlandırılmasını ve yönlendirilmesini sağlayan kinematik yapıyı kurmuş ve 1955 yılında bu makinenin bir prototipini yapmıştır [Jayarajan and Siddiqui, 2016].

1960'larda Gough ve Stewart, altı prizmatik aktüatör içeren bir hexapod tasarlamıştır [Stewart, 1965].

1980'lerde Prof.Dr. Reymond Clavel, Lozan şehrinde bulunan EPFL üniversitesinde; paralel eksen temelli yüksek hız ve ivmeye uygulanabilen, düşük enerji harcayan, özel üç eksen dereceli delta robot olarak bilinen bir robot icat etmiştir. Bu icadı Ek-A'da belirtilen patent ile koruma altına alınarak robotun farklı tipleri birden fazla firmaya üretim için aktarılmıştır [Clavel, 1990].

Endüstride alanında gelişmesi ise 1987'de başlamıştır. İsviçre Demarex şirketi EPFL'den, delta robotu standart bir ürün olarak imal etmek için bir lisans almıştır [Patel and George, 2012]. 200'ün üzerinde farklı patent ve patent geliştirme olarak bilenen faydalı model çalışması, bu lisans referans gösterilerek yapılmıştır.

Kanada'da yapılan bir çalışmada delta robotun ileri ve evrik kinematik ifadeleri, merkez koordinatı sabit olan bir daire ve merkez koordinatı hareketli olan bir kürenin kesişim noktası analitik olarak modellenerek elde edilmiştir. Bu çalışmadan sonra çıkan sonuçlara göre bir program oluşturulmuştur [Web 1, 2019].

Potansiyel olarak yüksek hassasiyet gösteren çalışma prensipleri nedeniyle delta robotlar ve diğer paralel robotlar, cerrahi uygulamalarda popüler olmuştur. Bu duruma en dikkat çekici örnek SurgiScope sistemidir. Bu sistemde Nöroşirürji için delta robot platformuna monte edilmiş bir kamera kullanılmaktadır [Simaan et al., 2008].

- Ticari süreçleri

Demarex firması 1987 yılında delta robotun imalatı için bir lisans satın aldıktan sonra firmanın temel amacı, ambalajlama endüstrisi için paralel robotu ticari bir ürün haline getirmek olmuştur. Firma bu amacı doğrultusunda uluslararası alanda 500 adetin üzerinde delta robot kurmuştur. Bu sistemlerin büyük çoğunluğu hız ve

ivme gerektiren ancak düşük yük taşıma ihtiyacı olan gıda sektörü içinde çikolata paketleme alanında gelişimini sağlamıştır.

Delta robotun patenti ise 1996 yılında Demarex kardeşler tarafından EPFL'den satın alınmıştır. Ancak, bu işlem gerçekleşmeden önce EPFL zaten iki lisansı satmıştır. İlk lisans küçük ebattaki robotlarla ilgili olarak (kol + paralelkenar <800 mm) yalnızca 1987'de Demarex'e atfedilmiştir. İkinci lisans ise daha büyük ebattaki robotlarla ilgili olarak ilk olarak AID'ye, daha sonra ise DeeMed'e satılmıştır. İsveç Elekta tarafından satın alınan bu şirket, cerrahi alanda uzmanlaşarak ağır (20 kg) mikroskop (SurgiScope) taşımak için kullanılan bir delta robot üretmektedir. Delta robot teknolojisi, 1999 yılının sonlarında Medtronic'e satılmıştır [Web 2, 2019].

Delta robotlar, paralel robotlar içinde en işlevsel ve uygulamaya açık bir ürün olarak kabul görse de, patent korumasından dolayı, geniş üretim süreçlerine ve uygulama çokluğuna ancak patent koruma sürelerinin tamamlanmasından (2010) sonra ulaşmıştır.

Elekta IGS şirketi, Zürih merkezli Global teknoloji grubu ABB ile delta robot lisansı hakkında görüşmelere SurgiScope işleminden önce başlamıştır. Sonuç olarak, ABB daha büyük boyutlarda delta robotları üretmek için bir lisans almıştır. Bu arada, Demarex daha büyük boyutta (yaklaşık 1.200 mm) robotlar üretme kararını açıklamıştır [Web 2, 2019].

Demarex ayrıca, ambalajlama (DELTA) ve delme için (PA35) küçük boyutlu delta robotları üretmek üzere Japon Hitachi Seiki şirketine de lisans vermiştir. Aslında, Hitachi Seiki Japonya'da Demarex'i temsil etmektedir [Web 2, 2019].

Delta robotun ana çıktıları olan yük, hız, hassasiyet ve maliyet, dizayn parametrelerinde farklı tasarımların oluşması için geniş bir alan bırakmaya devam etmektedir. Özellikle son yıllarda 3D yazıcıların üretim alanında aktif olarak kullanılmaya başlanması genel anlamda paralel robotların, özel durumlarda ise delta robotların akademik alanda, endüstride incelenmesi ve araştırılması yönünde gelişmeler sağlamaktadır. Delta robotların optimizasyonu ve çoklu eksen kontrol sistemleri üzerine dünyada çok fazla akademik çalışmanın devam ettiği görülmektedir [Web 3, 2019].

2. DELTA ROBOT MODELİ

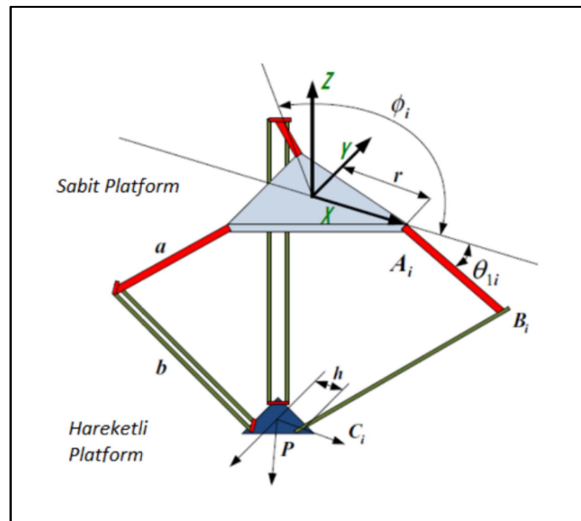
Biyomimikri, doğadan örnekleme yaparak teknolojiye tasarımı ve yapıları modelleme stratejisidir. İnsan el bileği, dirsek ve omuz eklemi olmak üzere iki kollu bir montaj robotunun inşa edilmesi biyomimikliğe iyi bir örnektir. Robotik sistemlerin tasarımında, mühendisler genellikle tasarımlarını geliştirmek için hayvanların ve insanların kas-iskelet yapılarını örnek almaktadır.

İnsan kolları ve elleri tarafından yapılan işleri yapmak için bir robot tasarlanıyorsa, robotik kollar ve eller iyi bir başlangıç noktası olmaktadır. Delta robotu özel kılan unsur, doğadaki biyomimikliğin kısıtlamalarından kurtularak salt matematik ve geometriden esinlenerek verimli, optimize edilmiş bir makine olmasıdır.

Delta robotlarda, Şekil 2.1'deki gibi kapalı bir döngü manipülatörü olduğu için kinematik hesaplamak zordur. Modeli basitleştirmek ve parametre sayısını azaltmak için, aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

Hareketli plaka daima taban plakasına paralel kalır ve taban plakasına dik eksen etrafındaki yönü sürekli sıfırdır. Böylece, paralelkenar tipi bağlantılar (uzun kol), robot kinematik davranışını değiştirmeden basit çubuklarla ikame edilebilmektedir.

Döner bağlantılar (Sabit platform ile kısa kollar arasında ve uzun kollar ile hareketli platform arasında) aynı daireye yerleştirilmişlerdir.



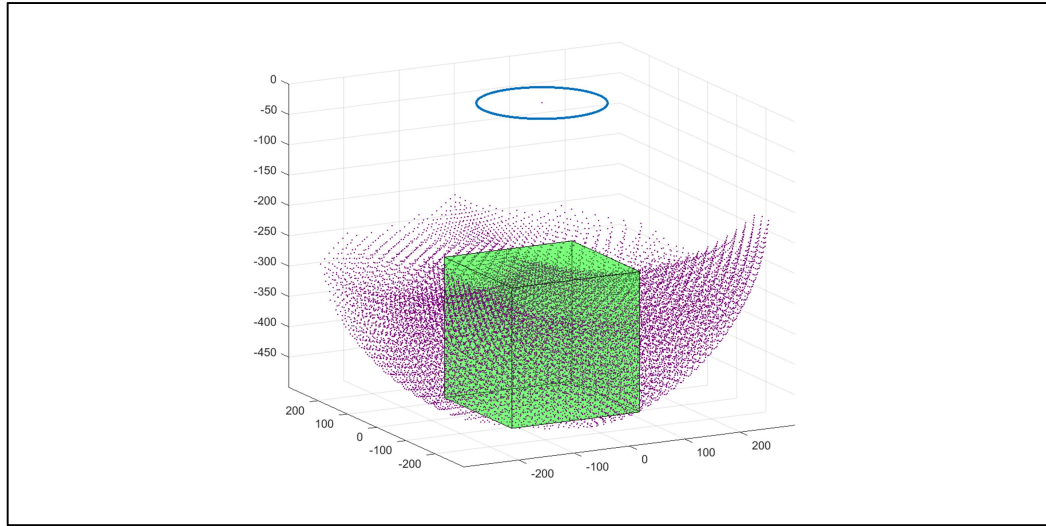
Şekil 2.1: Hareketli platform ve Sabit Platform eksenlerinin paralel çalışması.

2.1. Kinematik Modelleme

“Robotik Mekaniği ve Kontrolüne Giriş” kitabında, kinematik şöyle açıklanmaktadır [Abdellatif et al., 2004];

“Kinematik bilimi, harekete neden olan kuvvetlere bakmaksızın ele alan hareket bilimidir. Kinematik bilimi içerisinde bir zamana veya herhangi bir değişkene göre pozisyon, hız, ivme ve pozisyon değişkenlerinin tüm yüksek dereceli türevlerini inceler.”

Delta robot; üç serbestlik dereceli, sabit platform ile uç işleyicisinin bağlı olduğu hareketli platform arasında, birbirlerine 120 derece açı ile bağlanmış çubuk mekanizmasıdır. Bu mekanizmanın kinematik analizi yapılarak eklemler arasındaki hareket ilişkisi çıkarılmaktadır. İleri kinematik analiz ile mafsallardaki açı değerlerinden kartezyen koordinat değerlerine, evrik kinematik ile de kartezyen koordinat değerlerinden mafsalların olması gereken açı değerleri elde edilebilmektedir [Web 4, 2019].



Şekil 2.2: Oluşturulan delta robotun x.y.z koordinatlarında çalışma uzayı.

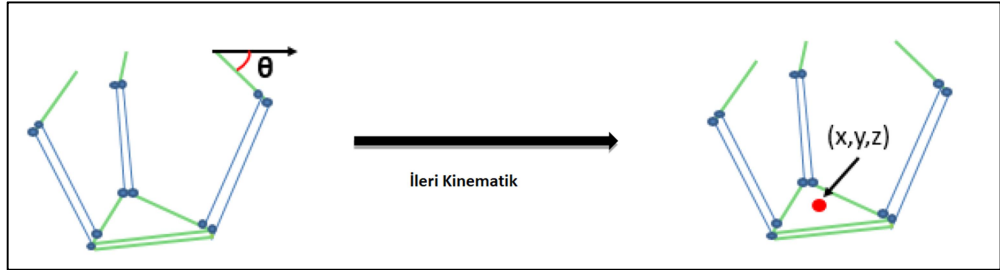
Şekil 2.2’de, bu çalışma kapsamında yapılarak deneysel sonuçları çıkarılan ve Tablo 2.1’de genel ölçüleri verilen delta robotun çalışma uzayı gösterilmektedir. 3 eksen açısından aktif çalışma olan kare bölge ayrı renkle belirtilmiştir.

Tablo 2.1: Deneysel Projede Kullanılacak Delta Robot Değerleri.

Sabit Platform Yarı Çap			105 mm
Sabit Platform Üçgen kenarı			117 mm
Kısa Kol	r_f		150 mm
Uzun Kol	r_e		400 mm
Alt Yarı Çap (Hareketli Platform)			34 mm
Alt Üçgen Kenar Boyu			41 mm

2.1.1. İleri Kinematik Analiz

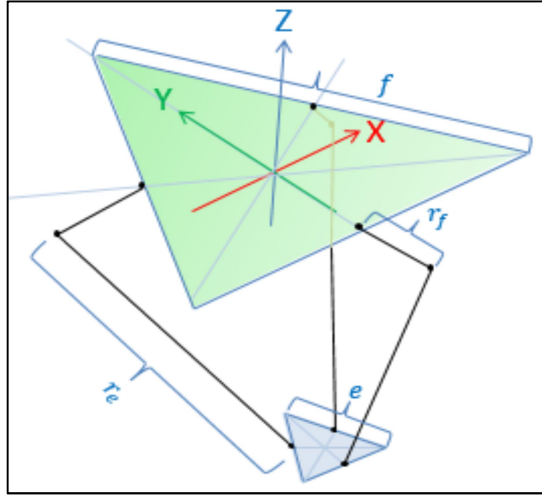
İleri kinematik, üç eklem açısı ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) girdi ve kartezyen koordinatlar (x, y, z) ileri kinematiklerin çıktılarını oluşturmaktadır. Eklem açıları servo motorlara uygulandığında karşılık gelen kartezyen koordinatları, ileri kinematik denklemleriyle hesaplanır.



Şekil 2.3: Açısal döngüden kartezyen sisteme dönüşümde ileri kinematik.

Genel olarak, paralel robotların ileri kinematikini hesaplamak zor olmasına karşın delta robotlar sadece döngüsel hareket etmektedir. Bu nedenle ileri kinematik çözüm setinde benzersiz ve doğru bir analitik çözüm bulunabilmektedir.

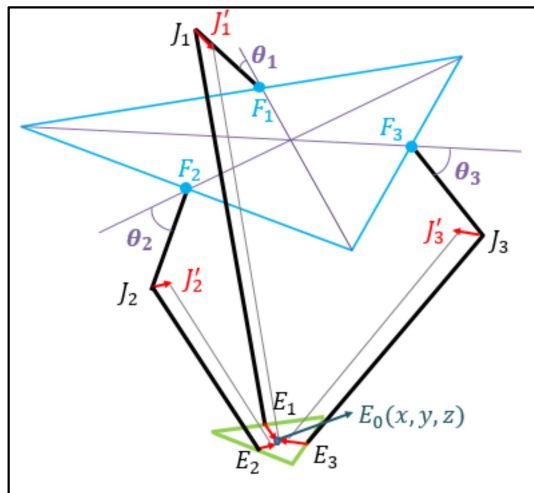
Delta robotun ileri kinematikini kurgulamak için önce robotun fiziksel parametrelerinin atanması gerekecektir.



Şekil 2.4: Delta robotun şematik gösterimi.

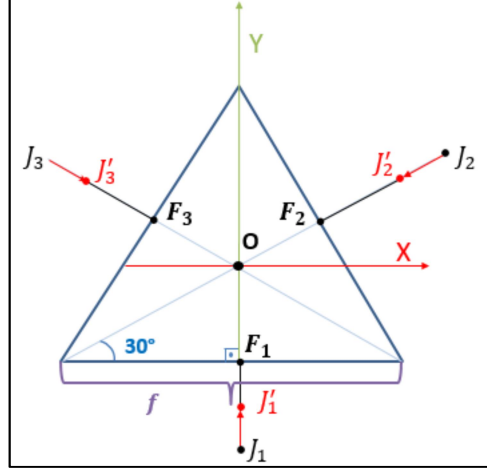
Referans noktası olarak sabit platformun merkezini aldığımızda, hareketli platformda bulunan uç işleyici her zaman z eksenine göre negatif olur (Şekil 2.4). Bu kabul ileri kinematik çözümün kusursuz ve yakınsamasını sağlamaktadır.

İleri kinematik çözümünü elde etmek için önce J_1, J_2, J_3 noktalarının koordinatlarını $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ bağlantı noktalarından bulmamız gerekmektedir. Alt kollar J_1, J_2, J_3 noktaları etrafında dönerken, Radius r_e ile üç adet küre elde edilecektir. Bu kürelerin bir noktada kesişmesi için, her bir küre merkezinin J_1, J_2, J_3 noktalarından J'_1, J'_2, J'_3 noktalarına taşınması gerekecektir. Yukarıda açıklanan noktalar ve açılar Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Delta robotun mafsal, köşe noktaları ve ana çerçevesi gösterimi.

Üç eksenin kesişme noktası olan $E_o(x, y, z)$ aynı zamanda kartezyen koordinatların ileri kinematik ile çözümünü sağlamaktadır.



Şekil 2.6: Delta robotun sabit platformunda mafsallı noktalarının oluşturduğu üçgen.

Eksenlerin kesişme noktasının bulunması için, her bir kürenin merkezi ve çapı bulunmalıdır. Sabit platform plakasının mafsallı noktalarının oluşturduğu üçgen Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Üçgenin kenar boyunun uzunluğunu f olarak tanımlanmaktadır. f bilinen bir parametredir, bu nedenle F_i noktaları ile taban üçgenin O merkezi arasındaki mesafeleri hesaplanabilmektedir.

$$|OF_1| = |OF_2| = |OF_3| = \frac{f}{2} \tan 30 \quad (2.1)$$

Benzer şekilde J_i noktası ile J'_i arasındaki ölçü aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$|J_1J'_1| = |J_2J'_2| = |J_3J'_3| = \frac{e}{2} \tan 30 \quad (2.2)$$

Bu durumda F_i ve J_i arasındaki mesafe de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$|F_1J_1| = r_f \cos \theta_1, \quad |F_2J_2| = r_f \cos \theta_2, \quad |F_3J_3| = r_f \cos \theta_3 \quad (2.3)$$

Yukarıda aktarılan bu üç eşitlik birleştirildiği takdirde üç kürenin merkezini oluşturan yarıçap r_e elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
\left\{ \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, r_1 \right\} &= \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ -\left(\frac{f-e}{2}\tan 30\right) - r_f \cos \theta_1 \\ -r_f \sin \theta_1 \end{bmatrix}, r_e \right\} \\
\left\{ \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, r_2 \right\} &= \left\{ \begin{bmatrix} \left(\left(\frac{f-e}{2}\tan 30\right) + r_f \cos \theta_2\right) \cos 30 \\ \left(\left(\frac{f-e}{2}\tan 30\right) + r_f \cos \theta_2\right) \sin 30 \\ -r_f \sin \theta_2 \end{bmatrix}, r_e \right\} \\
\left\{ \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}, r_3 \right\} &= \left\{ \begin{bmatrix} \left(\left(\frac{f-e}{2}\tan 30\right) + r_f \cos \theta_3\right) \cos 30 \\ -\left(\left(\frac{f-e}{2}\tan 30\right) + r_f \cos \theta_2\right) \sin 30 \\ -r_f \sin \theta_3 \end{bmatrix}, r_e \right\}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Merkezi yarıçap r_e olan bir kürenin aşağıdaki eşitliklere dayanarak belirtilen denkleminde kartezyen koordinatları verilmiştir.

$$\begin{aligned}
x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= r_e^2 \\
(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= r_e^2 \\
(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= r_e^2
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Yukarıda belirtilen denklem eşitliği aşağıdaki şekilde açılmaktadır.

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - y_1^2 - z_1^2 \tag{2.6}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \tag{2.7}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \tag{2.8}$$

Yukarıdaki denklemi basitleştirmek için (2.6), (2.7) ve (2.8) numaralı denklemlerin içine $w_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ ifadesi yazıldığında aşağıda belirtilen denklem ortaya çıkmaktadır.

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - w_1 \tag{2.9}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - w_2 \quad (2.10)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - w_3 \quad (2.11)$$

Daha sonra, $x_2 + y_2 + z_2$ ifadesini ortadan kaldırmak için (2.9) denkleminde, (2.10) ve (2.11) denklemleri çıkarılarak yeni denklem kümeleri oluşturulmalıdır.

$$x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = \frac{w_1 - w_2}{2} \quad (2.12)$$

$$x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = \frac{w_1 - w_3}{2} \quad (2.13)$$

Bu aşamada, x terimlerinin katsayılarını eşitlemek için denklem (2.12) x_3 ile ve denklem (2.13) ise x_2 ile çarpılmalıdır.

$$x_2x_3x + x_3(y_1 - y_2)y + x_3(z_1 - z_2)z = x_3 \left(\frac{w_1 - w_2}{2} \right) \quad (2.14)$$

$$x_2x_3x + x_2(y_1 - y_3)y + x_2(z_1 - z_3)z = x_2 \left(\frac{w_1 - w_3}{2} \right) \quad (2.15)$$

Bulunan denklemin sadeleştirilmesi için x_2x_3x değeri, (2.14) ve (2.15) denklemlerinden çıkarıldığında aşağıdaki eşitlik bulunmaktadır.

$$x = \frac{a_1z + b_1}{d} \quad (2.16)$$

$$y = \frac{a_2z + b_2}{d} \quad (2.17)$$

Ortak payda baz alınarak denklem daha da sade hale getirilebilmektedir.

$$d = x_3(y_2 - y_1) - x_2(y_3 - y_1) \quad (2.18)$$

(2.16) ve (2.17) denklemlerinde belirtilen a_1 , b_1 , a_2 , b_2 değerleri aşağıdaki eşitliklerde belirtildiği şekilde çıkarılabilmektedir.

$$a_1 = (z_1 - z_2)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1) \quad (2.19)$$

$$b_1 = -0.5[(w_2 - w_1)(y_3 - y_1) - (w_3 - w_1)(y_2 - y_1)] \quad (2.20)$$

$$a_2 = (z_2 - z_1)x_3 - (z_3 - z_1)x_2 \quad (2.21)$$

$$b_2 = 0.5[w_2 - w_1)x_3 - (w_3 - w_1)x_2] \quad (2.22)$$

Şimdiye kadar, x ve y ifadesi z cinsinden bulunmaya çalışılmıştır. Bu yüzden (2.16) ve (2.17) denklemleri elde edilmiştir. Ancak bu aşamada, x ve y için elde edilen ifadelerde x ve y'nin ortadan kaldırılması için (2.26) denklemi ikame edilmelidir.

$$a = a_1^2 + a_2^2 + d^2 \quad (2.23)$$

$$b = 2(a_1b_1 + a_2(b_2 - dy_1) - z_1d^2) \quad (2.24)$$

$$c = b_1^2 + (b_2 - dy_1)^2 + d^2(z_1^2 - r_e^2) \quad (2.25)$$

$$az^2 + bz + c = 0 \quad (2.26)$$

Görüldüğü gibi (2.26) denklemi ikinci dereceden bir doğrusal denklemdir ve ayırt edici sıfırdan büyükse z için iki çözüm bulunmaktadır.

$$\Delta = b^2 - 4ac > 0 \quad \rightarrow \quad z_{\mp} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (2.27)$$

Sabit platformun tabanının merkezi alındığında z eksenini negatif olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle çıkan sonuçlardan z için negatif olan seçilmelidir.

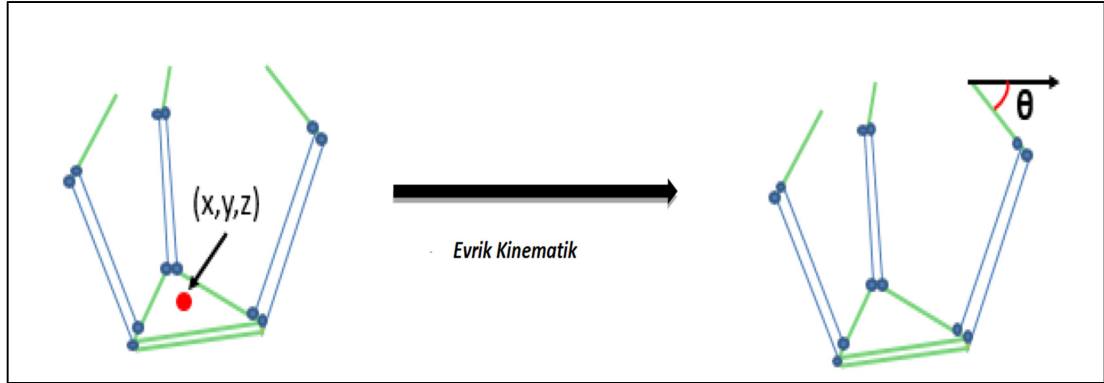
$$z = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (2.28)$$

Delta robotun ileri kinematik çözümünün tamamlanması için (2.28) denkleminde bulunan z ile (2.16) ve (2.17) denklemleri değiştirilmelidir. Böylece aşağıda belirtilen çözüm tamamlanmış olmaktadır.

$$\{x \ y \ z\}^T \quad (2.29)$$

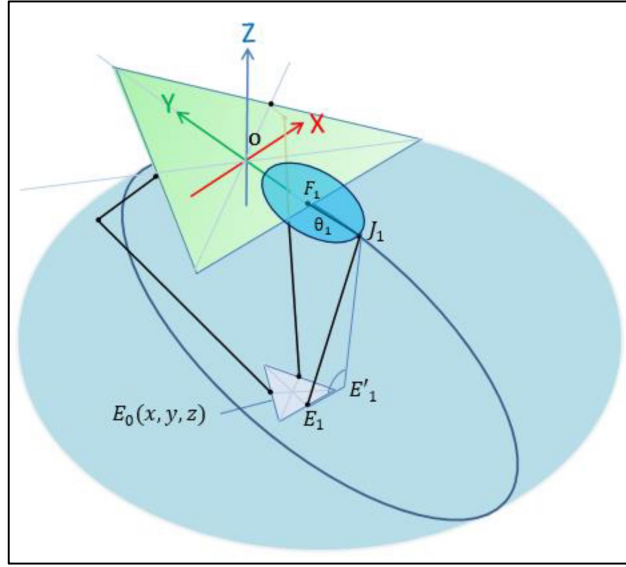
2.1.2. Evrik Kinematik Analiz

Uç işleyicinin istenen pozisyona gelmesi için her bir mafsallın motor bağlantı noktasına göre açısının bilinmesi gerekmektedir. İstenen açının bulunabilmesi için yapılan bu işlem dizinine “evrik (ters) kinematik” denilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Kartezyen sistemden açısal döngüye dönüşümde evrik kinematik.

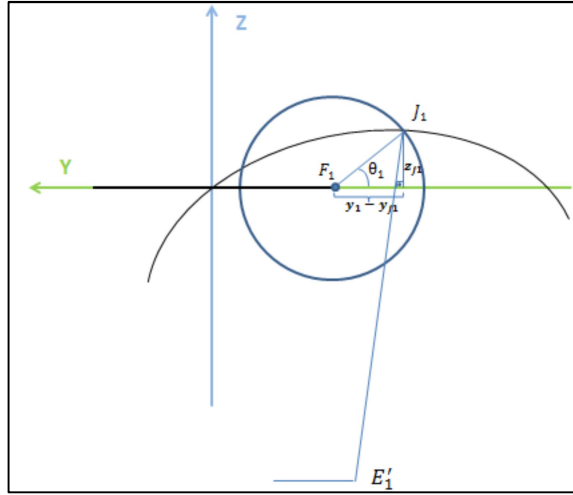
F_1 J_1 eklemi bir robot tasarımı kısa kol yarıçap r_f değerinde F_1 noktasını merkez alarak YZ düzleminde dönebilmektedir. F_1 tersine J_1 ve E_1 mafsallı bağlantı olduğundan E_1, J_1 e göre serbest döngü sağlayabilmektedir. E_1 ve r_e yarıçapında merkeze sahip bir küre oluşturan, hareketli mafsallardır (Şekil 2.8).



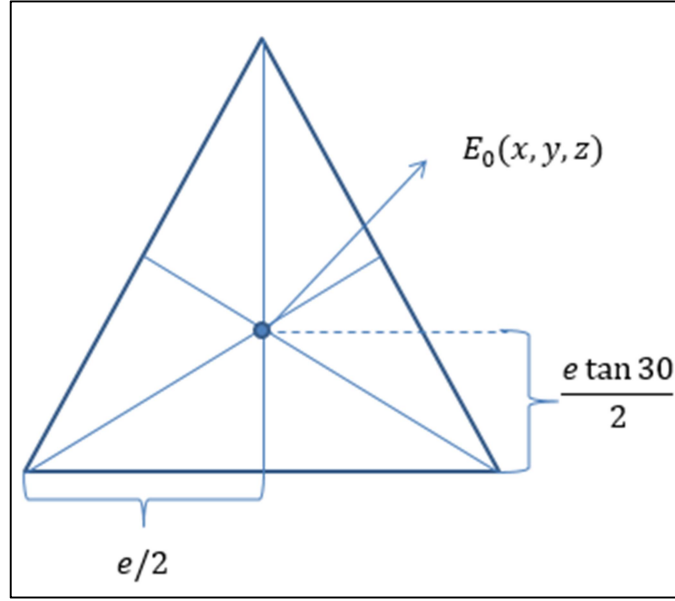
Şekil 2.8: Kartezyen sistemden açısal döngüye dönüşümde evrik kinematik.

Belirtilen kürenin YZ düzlemindeki kesişim merkezi $E'1$ ve yarıçapı $E'1 J1$ olan bir dairedir. Aynı zamanda $E'1$, YZ düzleminde $E1$ 'in izdüşümü olarak görülmektedir (Şekil 2.9).

$J1$ ise iki dairenin çakıştığı yarıçapı bilen $E'1$ ve $F1$ in merkezi olarak görülmektedir. Bu bilgiler nezdinde θ_1 açısı hesaplayabilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.9: Kartezyen sistemin örnek gösterimi.



Şekil 2.10: Hareketli tablanın oluşturduğu üçgen.

Bu durumda karşılık gelen denklemler bulunabilmekte ve YZ düzlemi Şekil 2.9'da belirtilen şekilde görülebilmektedir. $E_0(x, y, z)$ sabit platform üçgeninin koordinat merkezinden, hareketli platform üçgeninin koordinatları hesaplanabilmektedir.

$$EE_1 = \frac{e \tan \pi/6}{2} = \frac{e}{2\sqrt{3}} \quad (2.30)$$

$$E_1 \left(x, y - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z \right) \rightarrow E'_1 \left(0, y - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z \right) \quad (2.31)$$

$$E_1 E'_1 = x \rightarrow E'_1 J_1 = \sqrt{E_1 J_1^2 - E_1 E'^1_1} = \sqrt{r_e^2 - x^2} \quad (2.32)$$

F_1 noktasının koordinatları aşağıdaki gibidir.

$$F_1 \left(0, \frac{-f}{2\sqrt{3}}, 0 \right) \quad (2.33)$$

Şekil 2.9'a göre Öklid denklemleri kullanılarak elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
(y_{J_1} - y_{F_1})^2 + (y_{J_1} - y_{F_1})^2 &= r_f^2 \rightarrow \left(y_{J_1} + \frac{f}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_{J_1})^2 = r_f^2 \\
(y_{J_1} - y_{E'_1})^2 + (z_{J_1} - z_{F_1})^2 &= r_e^2 - x^2 \\
\rightarrow \left(y_{J_1} - y + \frac{e}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_{J_1} - z)^2 &= r_f^2
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Evrik kinematik ilk mafsal noktası aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_{J_1}}{y_{F_1} - y_{J_1}}\right) \tag{2.35}$$

Geriye kalan θ_2, θ_3 açıları için, XY düzlemi z ekseninde +120 ve -120 derece döndürülmelidir.

$$\begin{cases} x' = x \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + y \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ y' = -x \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + y \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} E_0(x, y, z) \rightarrow (x', y', z) \tag{2.36}$$

2.2. Dinamik Modelleme

Model temelli kontrol tasarımını gerçekleştirmek için öncelikle delta robot sisteminin dinamik hareket denkleminin çıkarılması gerekmektedir. İlk adım olarak, uzun kol üst ve alt bağlantı noktası arasındaki mesafenin kol uzunluğuna eşit olduğu gerçeği ile aşağıdaki kısıt denklemi her bir uzun kol için yazılabilir [Tsai, 1999].

Delta robot için Langrange denklemleri yazılırken teorik olarak, serbestlik derecesi kadar yani üç tane genelleştirilmiş koordinat θ_{11}, θ_{12} ve θ_{13} kullanmak yeterli olmaktadır. Bu üç genelleştirilmiş koordinat yanında fazladan üç koordinat daha (P_x, P_y ve P_z) kullanmak ise işlemleri kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle, Lagrange denklemlerinin yazımında altı genelleştirilmiş koordinat (q_j) ve üç adet Lagrange çarpanı (λ_i) kullanılmıştır.

- Lagrangian denklemleri

Burada, L Lagrange fonksiyonunu ve Q_j ise genelleştirilmiş kuvveti ifade etmektedir ve şu şekilde tanımlanabilmektedir; K ve U sırasıyla robotun kinetik ve potansiyel enerjilerini belirtmektedir ve birbirleriyle olan farka göre çözüme ulaşılmaktadır. F_x, F_y ve F_z robot hareketli tablaya uygulanan dış kuvvetleri, τ_1, τ_2 ve τ_3 ise eklemlerdeki motor ihtiyaç torklarını ifade etmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \quad (2.37)$$

Γ_i , i kısıtlama fonksiyonunu belirtirken, k sınırlama fonksiyonları sayısıdır ve λ_i Lagrangian çarpanıdır. Koordinat sayısı, n , k cinsinden serbestlik derecesini aşmaktadır. Lagrangian denklemlerinin iki küme halinde düzenlenmesiyle hareket denklemlerinin çözümü daha kolay hale gelmektedir. İlk küme bilinmeyenler olarak Lagrange çarpanlarını, diğeri ise ek olarak aktüatörlerin katkıda bulunduğu genelleştirilmiş kuvvetleri içermektedir.

Öncelikle k denklemlerinin fazlalık koordinatlarla ilişkilendirilmesine izin verilmelidir. Daha sonra kalan $n - k$ denklemleri, değişken aktüatör eklem ile ilişkilendirilmelidir. Son olarak ilk denklem seti forma yazılabilir.

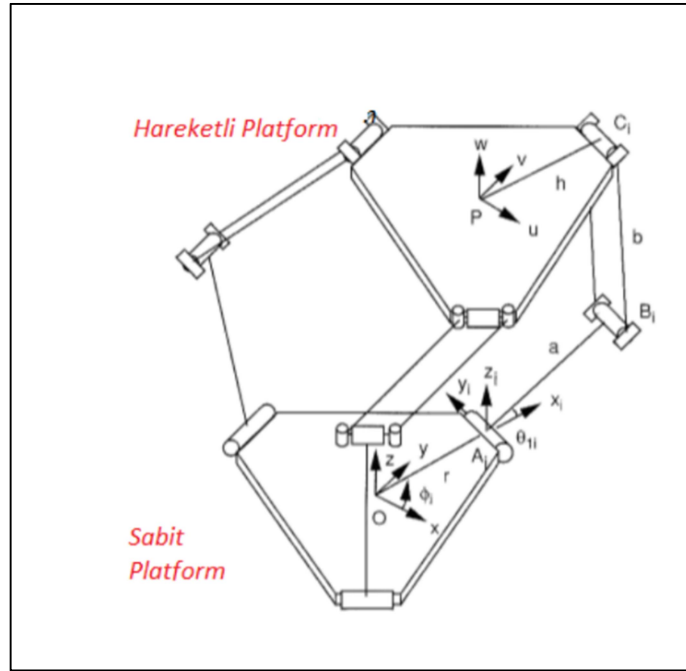
$$\sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \hat{Q}_j \quad (2.38)$$

Eğer $\hat{Q}_j$ varsa, bu ifade harici bir kuvvetin katkısı olan genelleştirilmiş güç demektir. $\hat{Q}_j$ ters dinamiklerde verildiğinden (2.38) denkleminin sağ tarafının bilindiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, Lagrangian çarpanları bir dizi k doğrusal denklemden belirlenebilmektedir. Lagrange çarpanları bulunduğu anda, aktüatör torkları ve / veya kuvvetleri doğrudan kalan denklemlerden belirlenebilmektedir. Spesifik olarak, ikinci denklem seti aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} = Q_j \quad (2.39)$$

Bu aşamadan sonra üç serbestlik dereceli paralel manipülatörün dinamikleri analiz edilmelidir. Metodolojiyi geliştirmek için bir örnek olarak kolaylık sağlamak

amacıyla şematik diyagram Şekil 2.11'de tekrarlanmıştır. Bu diyagramda koordinat çerçeveleri, link uzunlukları ve manipülatörün bağlantı açıları gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Dinamik modellemeye esas yapı.

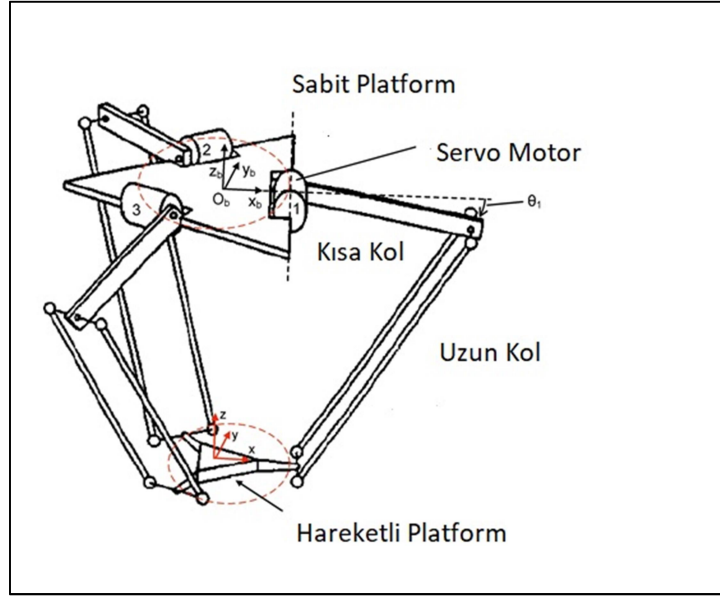
Bu manipülatörde θ_{11}, θ_{12} ve θ_{13} çalıştırılan eklemlerdir. Teorik olarak, bu 3 serbestlik dereceli manipülatör olduğu için dinamik analiz sadece üç genelleştirilmiş koordinat kullanılarak yapılabilmektedir. Bununla birlikte bu manipülatörün karmaşık kinematiği, Lagrange işlevi için hantal bir ifade oluşmasına neden olacaktır.

Bunun yerine, Lagrange'in birinci tip denklemleri üç adet normal koordinat eklenerek kullanılmıştı, p_x, p_y ve p_z . Böylece genelleştirilmiş olarak $p_x, p_y, p_z, \theta_{11}, \theta_{12}$ ve θ_{13} elde edilecektir. (2.37) denkleminde altı değişkende altı denklem sistemi temsil edilmektedir. Altı değişken $i = 1$ ile 3 için λ_i ve üç aktüatör torku, $J = 4, 5$ ve 6 için Q_j . Genelleştirilmiş kuvvetlerin, $i = 1-3$ için Q_i olduğuna dikkat edilmelidir. x, y ve z 'ye uygulanan dış kuvvet hareketli platformun ağırlık merkezinin P'sini temsil etmektedir.

Bu formülasyon, üç kısıtlama denklemi gerektirmektedir; $f_i, i = 1$ ile 3'tür. Şekil 2.11'de görülen B ve C eklemleri arasındaki mesafenin her zaman üst bağlantı çubuğunun uzunluğuna eşit olduğu gerçeğinden kısıt denklemleri elde edilmektedir.

- Kısıt Denklemleri

$$\begin{aligned}
\Gamma_i &= \overline{B_i C_i}^2 - b^2 \\
&= (p_x + h \cos(\phi_i) - r \cos(\phi_i) - a \cos(\phi_i) \cos(\theta_{1i}))^2 \\
&\quad + (p_y + h \sin(\phi_i) - r \sin(\phi_i) - a \sin(\phi_i) \cos(\theta_{1i}))^2 \\
&\quad + (p_z - a \sin(\theta_{1i}))^2 - b^2 \\
&= 0
\end{aligned} \tag{2.40}$$



Şekil 2.12: Delta robot kinetik yapısını oluşturan kollar.

Analizi kolaylaştırmak için her bir uzun kolun kütlesinin, m_b , üst kol düzeneğinde eşit olarak bölünmüş ve iki uç noktada B_i ve C_i konsantre edilmiş olarak kabul edilmektedir. Daha sonra Lagrangian fonksiyonunda L aşağıdaki gibi türetilmektedir.

Delta Robotun toplam kinetik enerjisi ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$K = K_p + \sum_{i=1}^3 (K_{ai} + K_{bi}) \tag{2.41}$$

Bu denklemde K_p hareketli platformun kinetik enerjisidir, kısa kolun ve uzuvdaki rotorun kinetik enerjisi K_{ai} ve uzun kolun iki mafsıl noktasına göre kinetik enerjisi K_{bi} dir.

Hareketli Platformun kinetik enerjisi,

$$K_p = \frac{1}{2} m_p (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2) \quad (2.42)$$

Kısa kolun ve uzuvdaki rotorun kinetik enerjisi,

$$K_{ai} = \frac{1}{2} \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 \right) \dot{\theta}_{1i}^2 \quad (2.43)$$

Uzun kolun iki mafsalsal noktasına göre kinetik enerjisi,

$$K_{bi} = \frac{1}{2} m_b (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2) + \frac{1}{2} m_b a^2 \dot{\theta}_{1i}^2 \quad (2.44)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hareketli platformun kütlesi m_p , kısa kolun kütlesi m_a , iki bağlantı çubuğunun birinin kütlesi m_b ve I_m ise uzuv üzerine monte edilmiş motorun eksenel atalet momentidir.

Manipülatörün sabit x-y düzlemine göre toplam potansiyel enerjisi,

$$U = U_p + \sum_{i=1}^3 (U_{ai} + U_{bi}) \quad (2.45)$$

Hareketli Platformun potansiyel enerjisi,

$$U_p = m_p g_c p_z \quad (2.46)$$

Kısa kolun potansiyel enerjisi,

$$U_{ai} = \frac{1}{2} m_a g_c a \sin(\theta_{1i}) \quad (2.47)$$

Uzun kol potansiyel enerjisi,

$$U_{bi} = m_b g_c (p_z + a \sin(\theta_{1i})) \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} (m_p + 3m_b) (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2) \\ & + \frac{1}{2} \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) (\dot{\theta}_{11}^2 + \dot{\theta}_{12}^2 + \dot{\theta}_{13}^2) \\ & - (m_p + 3m_b) g_c p_z \\ & - \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) g_c a (\sin(\theta_{11}) + \sin(\theta_{12}) + \sin(\theta_{13})) \end{aligned} \quad (2.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Lagrangian fonksiyonunun türevleri, genelleştirilmiş altı koordinatlara göre alınarak aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_x} \right) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_x \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_x} = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_y} \right) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_y \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_y} = 0 \quad (2.53)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_z} \right) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_z \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_z} = -(m_p + 3m_b) g_c \quad (2.55)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{11}} \right) = \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) \ddot{\theta}_{11} \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{11}} = - \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) g_c a c \theta_{11} \quad (2.57)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{12}} \right) = \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) \ddot{\theta}_{12} \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{12}} = -\left(\frac{1}{2}m_a + m_b\right)g_cac\theta_{12} \quad (2.59)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{13}}\right) = \left(I_m + \frac{1}{3}m_aa^2 + m_ba^2\right)\ddot{\theta}_{13} \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{13}} = -\left(\frac{1}{2}m_a + m_b\right)g_cac\theta_{13} \quad (2.61)$$

Kısıtlama fonksiyonunun kısmi türevlerinin, genelleştirilmiş altı koordinat verimine göre Γ_i alınması ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_x} = 2(p_x + hc\phi_i - rc\phi_i - ac\phi_ic\theta_{1i}) \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_y} = 2(p_y + hs\phi_i - rs\phi_i - ac\phi_ic\theta_{1i}) \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_z} = 2(p_z + as\theta_{1i}) \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial \Gamma_1}{\partial \theta_{11}} = 2a[(p_xc\phi_1 + p_ys\phi_1 + h - r)s\theta_{11} - p_zc\theta_{11}] \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{11}} = 0 \quad i=2,3 \text{ için} \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{12}} = 0 \quad i=1,3 \text{ için} \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial \Gamma_2}{\partial \theta_{12}} = 2a[(p_xc\phi_2 + p_ys\phi_2 + h - r)s\theta_{12} - p_zc\theta_{12}] \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{13}} = 0 \quad i=1,2 \text{ için} \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial \Gamma_3}{\partial \theta_{13}} = 2a[(p_xc\phi_3 + p_ys\phi_3 + h - r)s\theta_{13} - p_zc\theta_{13}] \quad (2.70)$$

Alınan bu türevler $j=1, 2, 3$ için (2.38) ve (2.39) denklemlerinde yerleştirildiğinde aşağıdaki gibi bir sonuca varılmaktadır.

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_x + hc\phi_i - rc\phi_i - ac\phi_ic\theta_{1i}) = (m_p + 3m_b)\ddot{p}_x - f_{px} \quad (2.71)$$

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_y + hs\phi_i - rs\phi_i - as\phi_ic\theta_{1i}) = (m_p + 3m_b)\ddot{p}_y - f_{py} \quad (2.72)$$

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_z + as\theta_{1i}) = (m_p + 3m_b)\ddot{p}_z + (m_p + 3m_b)g_c - f_{pz} \quad (2.73)$$

Hareketli platform üzerine uygulanan dış kuvveti f_{px} f_{py} ve f_{pz} ise x,y ve z bileşenleridir.

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) \ddot{\theta}_{11} + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) g_c a c \theta_{11} \\ & - 2a\lambda_1 [(p_x c \phi_1 + p_y s \phi_1 + h - r) s \theta_{11} - p_z c \theta_{11}] \end{aligned} \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) \ddot{\theta}_{12} + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) g_c a c \theta_{12} \\ & - 2a\lambda_2 [(p_x c \phi_1 + p_y s \phi_1 + h - r) s \theta_{12} - p_z c \theta_{12}] \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\begin{aligned} \tau_3 = & \left(I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \right) \ddot{\theta}_{13} + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) g_c a c \theta_{13} \\ & - 2a\lambda_1 [(p_x c \phi_1 + p_y s \phi_1 + h - r) s \theta_{13} - p_z c \theta_{13}] \end{aligned} \quad (2.76)$$

Denklemler (2.71), (2.72) ve (2.73) üç Lagrange çarpanının belirlenebileceği üç bilinmeyenli üç doğrusal denklem grubunu oluşturmaktadır. Lagrange çarpanları bulunduğunda, aktüatör torkları ikinci denklem grubundan (2.74), (2.75) ve (2.76) denklemlerinde belirlenmektedir [Tsai, 1999].

Bu iki denklem kümesi manipülatörün gerçek zamanlı kontrolü için kullanılabilir.

3. DELTA ROBOT İMALATI

Üç yüksek torklu servo motor, çelikten ve konum hassasiyeti değişmemesi için tek parçadan imal edilen sabit platforma monte edilmektedir. Her motor milinde, milin dönme eksenine dik bir kol bulunmaktadır. Servo motorlar, yüksek devir özelliklerini daha verimli kullanmak ve tork değerini artırmak için planet dişli kutusuna bağlanmaktadır. Paralel kenarlar ise hafif bağlantı çubukları ile bağlanmaktadır. Bu kollar da merkezi bir platformla bağlantılıdır. Her paralel çubuğun her iki ucundaki eklemler, tipik olarak bilyalı eklemlerdeki gibi serbestçe hareket etmektedir.

Çoğu delta robotu, nesnelerin döndürülmesini sağlayan en azından dördüncü bir eksene sahiptir. Ancak bu eksen tez çalışması kapsamında eklenmemiştir.

Delta robotların en büyük avantajı, robotun hareketli parçalarının çok hafif olmasını sağlayan ağır motorların çerçeveye sabitlenmesidir. Buna karşılık, eklemler bir kol robotunun kendisine bağlı olan her motorunu ve ardışık tüm motorlarının ağırlığını taşıması ise bu robotların dezavantajıdır.

Delta robotların mekatronik tasarımında hareket, çoğu durumda daha az kütlenin taşındığı karbon fiber kollar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sayede çok etkili bir x, y ve sınırlı bir z çevrimsel hareket sistemi elde edilmektedir. Delta robotun kaldıraç tabanlı tasarımı nedeniyle motorlar, şaft üzerindeki yükün uyguladığı artma kaldırıcını önlemek için yüksek torka sahip olmalıdır.

Delta robotların hareket aralığı, bir seri manipülatör robotununkinden daha basittir. Delta robotlar çalışma alanı içerisinde X ve Y yönlerinde serbestçe hareket edebilmektedir. Z eksen hareketi daha sınırlı olmaktadır. Bununla birlikte, uygulamaya bağlı olarak bazen X, Y ve Z eksenleri etrafında dönüşler gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Ancak delta robotlarıyla gerçekleştirilen operasyonların çoğunluğu dört ve daha fazla eksen gerektirecektir. Teorik olarak delta robotlar daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanabilir, ancak daha ağır taşıma kapasitesi için yapılan bir tasarım dakika başı hareket sayısını azaltmaya başlayacaktır. Bu durum, bir delta robotun karmaşık mekaniği göz önüne alındığında ekonomik açıdan verimli olmadığını göstermektedir.

Delta robotları yüksek hızda alma ve yerleştirme konusunda üstünlüğe sahiptir, ancak ne yazık ki fizik yasalarına, özellikle de Newton'un ilk yasasına bağlı

kalmasından dolayı hala bazı sınırlamalara sahiptir. Bazı delta robotlar 12-15 g'a kadar ivmelenebilmektedir [Poppeova et al., 2011].

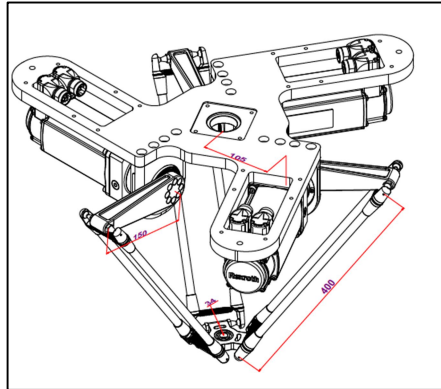


Şekil 3.1: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.

Şekil 3.1’de görülen ve tez çalışması kapsamında yapılan delta robot prototipinin çalışma uzayı, 450 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde planlanmıştır.

Konfigürasyonun fiziksel ölçüleri aşağıdaki şekilde alınmıştır:

- Üst Yarı Çap : 105mm (L3) (Sabit Platform Yarıçapı)
- Kısa Kol : 150mm (L1)
- Uzun Kol : 400mm (L2)
- Alt Yarı Çap : 34mm (L4) (Hareketli Platform Yarıçapı)



Şekil 3.2: Delta robot kofigüre edilmiş ölçülü dizayn resmi.

Şekil 3.2’de imal edilen delta robotun, oluşturulmak istenen çalışma uzayı için kullanılan kol boyları ve sabit tabla ile hareketli tabla ölçüleri gösterilmektedir.

3.1. Ekipman Bilgisi



Şekil 3.3: Delta Robot Servo Motoru.

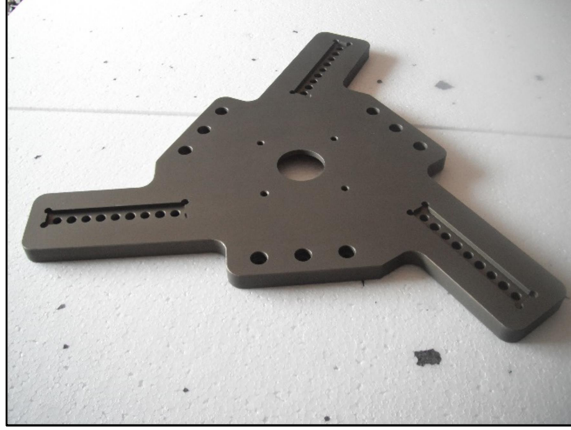
Kolların ve teleskobik kardan şaftın hareketini sağlayan elemanlar servo motorlardır. Delta robot imalatında Ek-C de teknik içerikleri paylaşılan ve Şekil 3.3’te belirtilen Servo Motorlar kullanılmıştır. Kullanılan servo motor 6000 dev/dak nominal devire sahip olup 1,7 Nm tork çıkışı bulunmaktadır. Ürün kodu MSK040B-XXXX-NN-X1-UG1 olan servo motor etiket bilgileri motor üzerinde bulunmaktadır. Bosch Rexroth marka olarak kullanılan motorlar, AC frenli servo motor olarak nitelendirilmektedir. İmal edilen delta robotta 3 adet bulunmaktadır.



Şekil 3.4: Delta robot eksen redüktörleri.

Şekil 3.4’te, robotun kollarını tahrik eden servo motorlara bağlanan flanş bağlantı tipli 1:10 çevrim oranına sahip redüktörler gösterilmiştir. Delta robot imalatında Wittenstein TK+010S-MF1-10-5E1 redüktörü tercih edilmiştir. Kullanılan planet tip redüktörün maksimum çıkış gücü 50 Nm olabilmektedir.

Redüktörün detaylı broşürü EK-D’de belirtilmiş olup boşluk değeri 4 arcmin’in altındadır. Delta robot imalat sisteminde 3 adet bulunmaktadır.



Şekil 3.5: Delta robot sabit platform tablası

Delta robot, Şekil 3.5’te gösterilen sabit platform olarak nitelendirilen parçanın üzerine kurulmaktadır. Bu parça daha sonra bir konstrüksiyona sabitlenebilecek şekilde tasarlanmıştır. Parça çelik malzemeden yapılmaktadır. Parçanın malzeme ağırlığı 18 kg’dır. HKTM firması tarafından imal edilen parçanın teknik resmi EK-E’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.6: Delta robot redüktör destek parçası.

Redüktör destek olarak belirtilen, motor ve redüktörün sabit platform ile bağlantısını yapan bağlantı parçası Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Delta robot ara bağlantı parçası.

Şekil 3.7’de kısa ve uzun kol ile uzun kol ve hareketli platform arasında kullanılan küresel mafsallı bağlantı parçası görülmektedir. Bu parça plastik malzemeden yapılmalıdır. Bu malzeme kullanıldığında parçanın ağırlığı 0.011 kg’dır. Delta robot imalatında 12 adet kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Delta robot hareketli platform.

Hareketli platform olarak da belirtilen Şekil 3.8’de gösterilen parça, uç işlemcidir. Delta robot üzerinde 1 adet mevcuttur. Yüzeye paralel olarak hareket etmektedir. Küresel mafsallı erkek bağlantılarını bu parçaya bağlayabilmek için ilgili deliklere burç konulmuştur. Bu parça hareket sürecinde yükün oluşturacağı kontrolsüz ataleti azaltmak için daha hafif olan alüminyum malzemeden imal edilmiştir.



Şekil 3.9: Delta robot kısa kol.

Şekil 3.9’da servo motora bağlanan kollar gösterilmektedir. Bu kollar servo motordan paralellograma kuvvetin iletilmesini sağlayan yapıyı oluşturmaktadır. Bu parçaların hafif ve mukavim olması gerektiğinden delta robotta kullanılması için karbon fiber malzemeden imal edilmiştir.



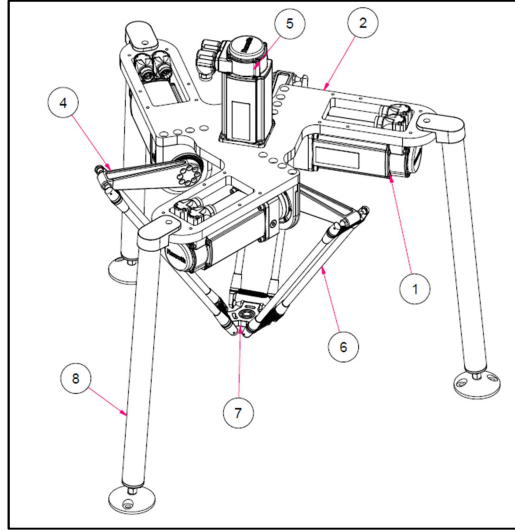
Şekil 3.10: Delta robot uzun kol bileşenleri.

Parallelogram olarak da nitelendirilen ve servo motordan gelen kuvvetin hareketli platforma iletilmesini sağlayan parçalar Şekil 3.10’da gösterilmektedir. Motora bağlanan kol ve bu yapının birbirine bağlanması için küresel mafsallar kullanılmıştır. Bu parçadaki paralel ilişkinin bozulmaması ve bununla birlikte motora bağlanan kol ile paralellogramın birbirine olan bağlantısının sağlanması için yay bağlantısı kullanılmıştır. Delta robot üzerinde 3 adet mevcuttur.



Şekil 3.11: Delta robot kapalı çevrim sistem bileşenleri.

Kısa ve uzun kol ile uzun kol ve hareketli platform arasında kullanılan küresel mafsallı erkek bağlantıları Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Bu parça metal malzemeden yapılmıştır. Parçanın bu malzeme kullanıldığında ağırlığı 0.023 kg’dır. Delta robot üzerinde 12 adet mevcuttur.



Şekil 3.12: Deneysel Projede Kullanılacak Delta Robot Sistem Bileşenleri.

Tablo 3.1: Deneysel çalışma için üretilen delta robotun sistem bileşenleri.

	Servo motor ve redüktör
	Sabit platform tablası
	Hexagon soketler
	Kısa kol
	Orta eksen bağlantı parçaları
	Uzun kol
	Hareketli platform tablası
	Sabit platform karkas ayakları

Tablo 3.1’de deneysel çalışma için üretilen delta robotun sistem bileşenleri görülmektedir. Ayrıca bu sistemin imalatını yapan HKTM firmasının detayları EK-F’de belirtilmektedir.

4. KONTROL TASARIMI

Sistemin kontrol tasarımında; genel konum vektörünün ikinci türevi ile yüke bağlı kuvvetinin, konum vektörünün yerçekimi etkisi ve dinamik sistemde belirlenen kısık vektörlerinin λ etkisi ile oluşan değeri, tork değerlerimizi belirlemektedir.

$$M\ddot{\theta}(t) + G(\theta(t)) + R(\theta(t), P(t))\lambda = \tau(t) \quad (4.1)$$

Bu denklemde;

- $\Theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)]^T$ aktive edilmiş konum vektörü eklemeni,
- $P(t) = [p_x(t), p_y(t), p_z(t)]^T$ Kartezyen konumlarını,
- $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ ise Lagrange çarpanlarını ifade etmektedir.

$\tau(t) = [\tau_1(t), \tau_2(t), \tau_3(t)]^T$, T'nin dış torklar ve kuvvetlere bağlı vektörüdür. M ise genelleştirilmiş atalet matrislerini belirtmektedir. $G(\Theta(t))$, yerçekimi ivmesi g'nin olduğu yerçekimi terimlerini içermektedir.

$R(\Theta(t), P(t))$ kısıtlama vektörlerinin arasındaki bağlantı sınırlamalarını gösteren vektör mobil platform, paralel bağlantılar ve delta robot kollarının uzunluğu platformların geometrik merkezlerinden herhangi birinin köşe noktasına göre a, b; h ve r mesafelerdir [Ramírez-Neria et al., 2015].

ϕ_i açısı x ekseninden robotun dizayn parametresinde sabit değer olarak ölçülmekte ve $\phi_i = 2\pi/3i$ $i = 1, 2, 3$ için bağlantı dinamikleri λ ile yani Lagrange çarpanları ile hesaplanmaktadır.

$M, G(\theta(t)), R(\theta(t), P(t))$ değerleri ise;

$$M = \frac{1}{3}(m_a + m_b)a^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$G(\theta(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(m_a + m_b)ga \cos(\theta_1(t)) \\ \frac{1}{2}(m_a + m_b)ga \cos(\theta_2(t)) \\ \frac{1}{2}(m_a + m_b)ga \cos(\theta_3(t)) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$R(\theta(t), P(t)) = \begin{bmatrix} p_z \cos(\theta_1(t)) - 2a\rho_1 \sin(\theta_1(t)) \\ p_z \cos(\theta_2(t)) - 2a\rho_2 \sin(\theta_2(t)) \\ p_z \cos(\theta_3(t)) - 2a\rho_3 \sin(\theta_3(t)) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\rho_i = (\rho_x \cos(\varphi_i) + \rho_y \sin(\varphi_i) + h - r), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

$\lambda_i, i = 1, 2, 3$, değerlerini belirleyerek çalışmanın 2. Bölümünü oluşturan dinamik modelleme kısmında verilen (2.71), (2.72) ve (2.73) denklemlerini elde etmemizi sağlamaktadır.

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= \dot{\theta} \\ \dot{x}_1 &= x_2 \\ M\dot{x}_2 &= \tau - G - R\lambda \end{aligned} \quad (4.6)$$

Kontrol tasarımında hata, değişkenler olarak seçilmiştir. İstenilen açı değerinden, gerçek açı değeri çıkarılarak z_1 fark değeri bulunmaktadır. x_1 açısının türevinden α çıkarıldığında ise bulunan değer z_2 olarak kabul edildiğinde (4.8) denklemi sağlanmış olmaktadır.

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (4.7)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha \quad (4.8)$$

Hatanın türevi alınarak ve belirlenen eşitlik yazılarak (4.10) denklemi sağlanmaktadır.

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \quad (4.9)$$

$$\dot{z}_1 = z_2 + \alpha - \dot{x}_{1d} \quad (4.10)$$

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (4.11)$$

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 \quad (4.12)$$

$$= z_1(z_2 + \alpha - \dot{x}_{1d}) \quad (4.13)$$

α değeri (4.15) denkleminde göre belirlendiğinde

$$\alpha = -k_1 z_1 + \dot{x}_{1d} \quad (4.15)$$

$$\dot{V}_1 = k_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (4.16)$$

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha} \quad (4.17)$$

olduğu görülmektedir.

Genelleştirilmiş atalet kuvveti, (4.6) denkleminde uyarlandığında (4.19) denkleminde elde edilmektedir.

$$M\dot{z}_2 = M\dot{x}_2 - M\dot{\alpha} \quad (4.18)$$

$$M\dot{z}_2 = \tau - G - R\lambda - M\dot{\alpha} \quad (4.19)$$

V_2 'nin türevi alındığında (4.22) denkleminde elde edilmekte olup (4.16) ve (4.19) denklemlerinde yerine koymamız gerekmektedir.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} M z_2^2 \quad (4.20)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + M z_2 \dot{z}_2 \quad (4.21)$$

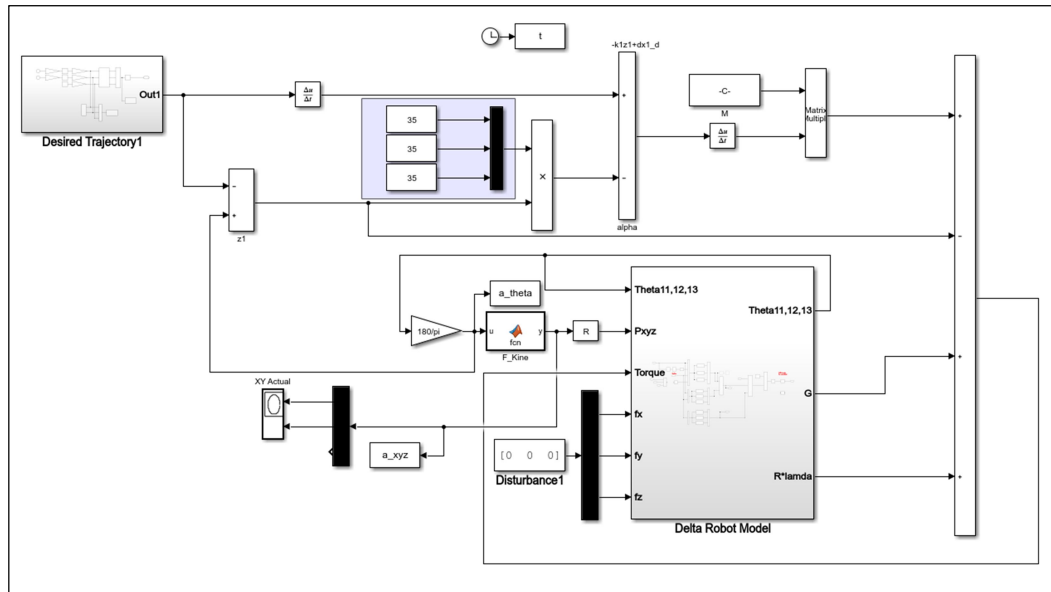
$$= k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2(\tau - G - R\lambda - M\dot{\alpha}) \quad (4.22)$$

Böylece hata değeri, tork değeri belirlerken kontrol sistemi içinde kullanmış olacaktır.

$$\tau = G + R\lambda + M\dot{\alpha} - z_1 \quad (4.23)$$

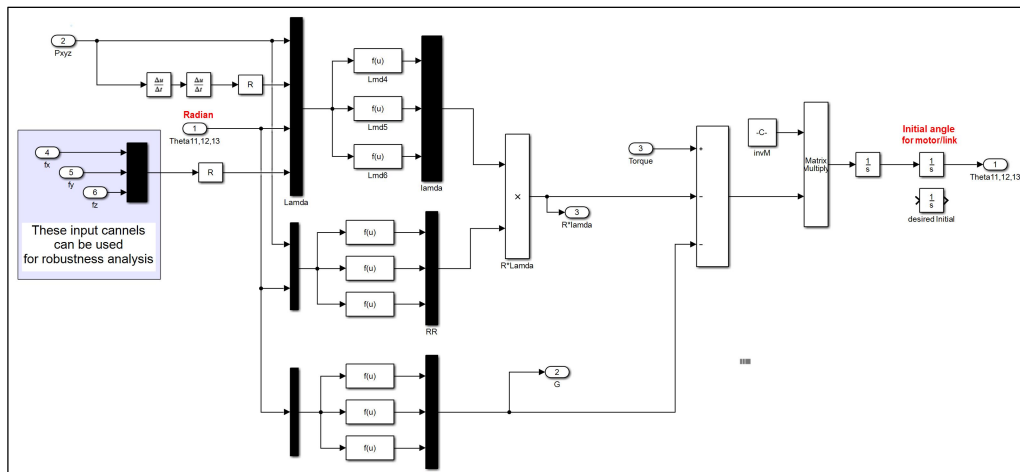
$$\dot{V}_2 = k_1 z_1^2 \quad (4.24)$$

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI



Şekil 5.1: Matlab-Simulink blok diyagramı.

Kontrol tasarımı için hazırlanan ve Şekil 5.1’de görülen simülasyon diyagramı ile oluşturulan tork değerine göre belirlenen grafik çıktıları incelenmiştir. Delta robotun kinematik analizleri ile çıkartılan açı değerlerinin türevleri alınarak motorlara aktarılacak hız değeri sağlanmıştır.



Şekil 5.2: Delta Robot Modelinin Alt Sistemi.

Çalışmanın 4. bölümünde belirtilen kontrol tasarımı yapısı etkinliğinin simülasyon ortamında görülebilmesi amacıyla yapılan ve üç farklı yörünge şartı altında gerçekleşecek olan yörünge izleme performansı, bu bölümde aktarılacaktır.

Yörünge takip performansı, kısa kol açıları için hesaplanan açı değerleri ve gerçekleşen açı değerleri arasındaki fark (hata) ile kontrolör tarafından üretilen kontrol girişleri (tork) büyüklüğüne göre değerlendirilmiştir.

5.1. Al-Bırak (Pick-Place) Yörünge Performansı

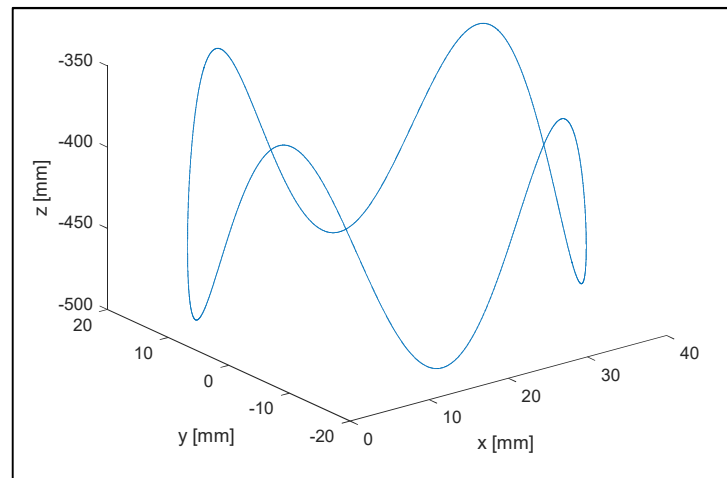
Uç noktasının takip edilmesi istenen yörüngesine ait x, y, z koordinatları aşağıdaki denklemlerle elde edilebilmektedir.

$$x(t) = 20 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + \pi\right) + 20 \quad (5.1)$$

$$y(t) = 20 \sin\left(\frac{\pi}{2}t + \pi\right) \quad (5.2)$$

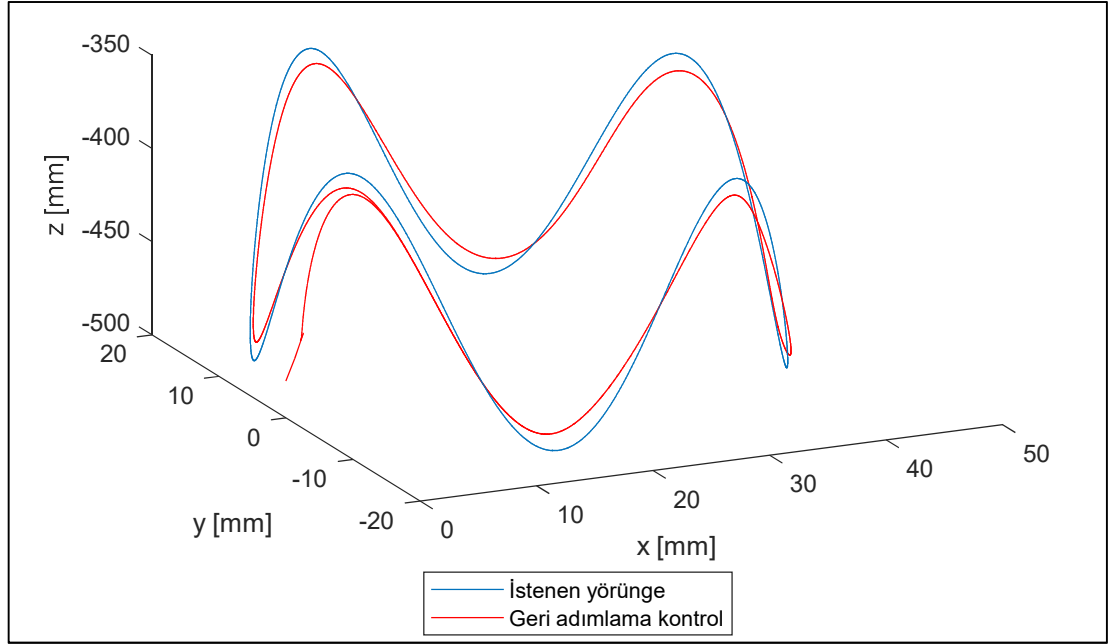
$$z(t) = 66.5 \sin(2\pi t) - 420 \quad (5.3)$$

Bu denklemlerle elde edilen istenilen yörünge diyagramı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: İdeal Al-Bırak yörünge tasarımı.

Delta robotun kısa kollarına ait başlangıç açısı değerleri, 45 derece olarak alınmıştır. Bu açı değeri, uç noktada $E_{xyz} = [0 \ 0 \ 464.6]$ mm'ye karşılık gelmektedir. Geri adımlama kontrol katsayıları ise $K = [25 \ 25 \ 25]'$ olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında gerçekleşen yörünge izleme performansı Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4: Kontrollü Al-Bırak uç nokta hareketi.

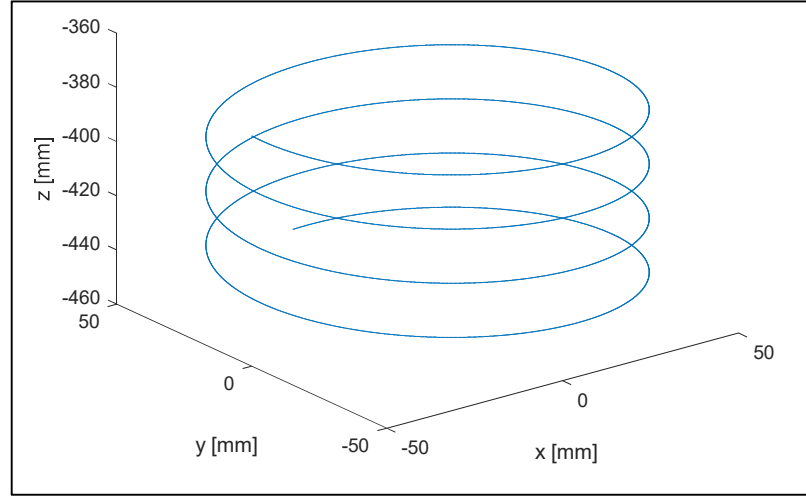
5.2. Dairesel Yörünge İzleme Performansı

Bu konu başlığı altında, uç noktasının derinliği değişken bir spiral izini takip etmesi için yapılan çalışmalar aktarılmaktadır. Uç noktasının kartezyen koordinatlarındaki denklemi aşağıda verilmiştir.

$$x(t) = 50 \cos\left(\frac{2\pi}{4}\right) \quad (5.4)$$

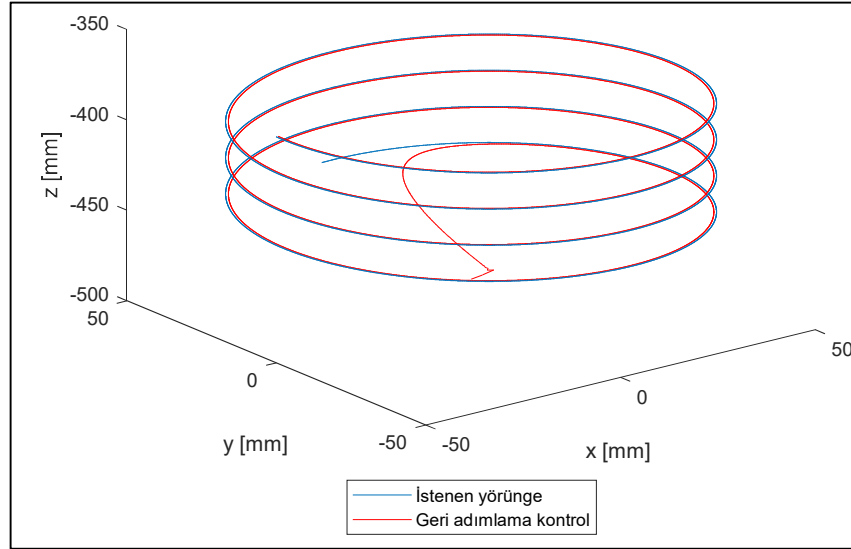
$$x(t) = 50 \cos\left(\frac{2\pi}{4} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.5)$$

$$z(t) = -450 + 5t \quad (5.6)$$



Şekil 5.5: İdeal derinliği değişken spiral yörünge izi.

“Al-Bırak (Pick-Place) Yörünge Performansı” başlığı altında verilen başlangıç açısı değerleri ve kontrol katsayıları muhafaza edilmiştir. Elde edilen izleme performansı Şekil 5.6’da belirtilmiştir.



Şekil 5.6: Kontrollü dairesel uç nokta hareketi.

5.3. Köşeli Yörünge Performansı

Çalışmanın bu bölümünde, delta robotun keskin köşe izleme performansı incelenmiştir. Tam köşe 90 derece şartı altında gerçekçi olmayan kontrol çıktıları

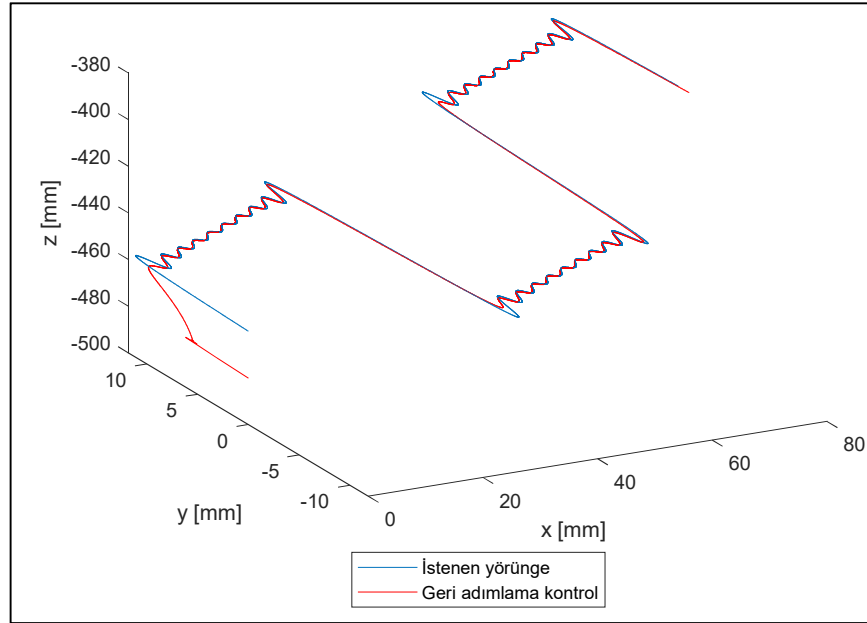
oluşması sebebiyle Fourier serileri ile kare dalga oluşturulmuştur. Bu izleme serisi aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir.

$$x(t) = 5t \quad (5.7)$$

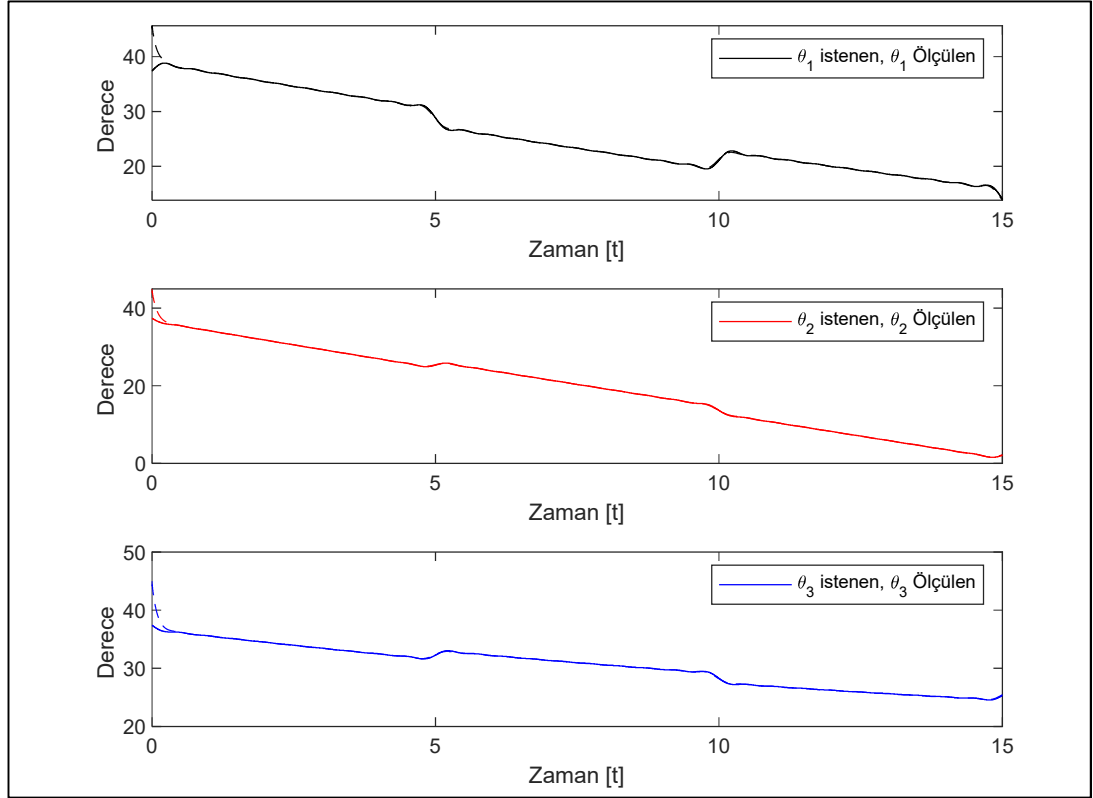
$$y(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) \quad (5.8)$$

$$z(t) = 5t \quad (5.9)$$

Denklemlerde $L = 5$, $n = 10$ olarak alınmıştır. Daha büyük n sayısı ile çıkış yörüngesi kare forma yakınsamaktadır (Şekil 5.7) (Şekil 5.8).

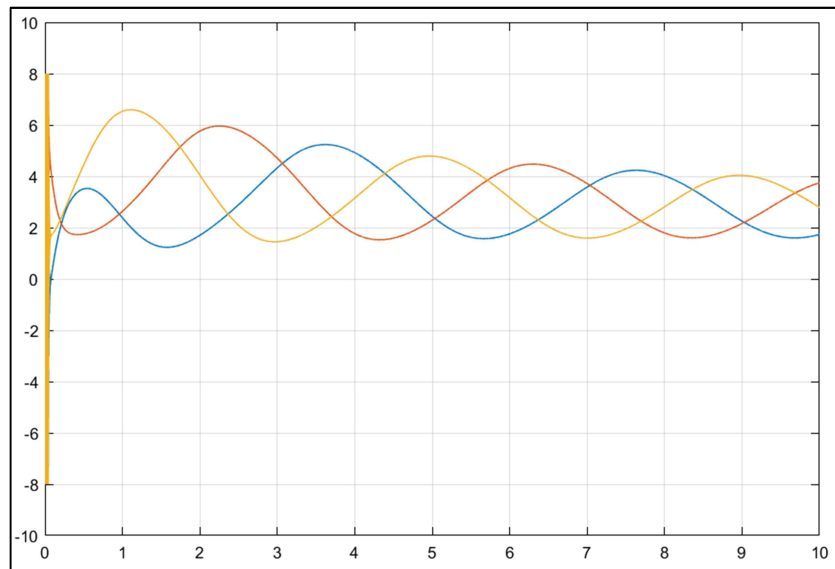


Şekil 5.7: Kontrollü köşeli uç nokta hareketi.



Şekil 5.8 : Kol açıları hata değeri.

Motorlara verilen tork değerinin kontrol sistemindeki verilere göre başlangıç seviyesindeki değeri geniş bir frekans aralığında olmasına karşın, Şekil 5.9'da görüldüğü üzere frekans 5 saniye sonunda stabil hale gelmektedir.



Şekil 5.9 : Motorlara Verilen Tork Değeri.

Her bir motor için gerekli voltaj değeri aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$Voltaj = \frac{\tau}{E_c} \quad (5.10)$$

$$E_c = \frac{K_1 N}{R_a} \quad (5.11)$$

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kontrol tasarımına göre yapılan deneysel tasarımın simülasyon sonuçlarında istenilen grafik sonuçları elde edilebilmiştir. Simülasyon tasarımından farklı olarak servo motorlardan gelen gerçek zamanlı açı değerleri, analog olarak alınarak kinematik sonuçlarda çıkan açı değerleri ile olan fark miktarı çevrim içinde kontrol tasarımında belirlendiği gibi eklenmiştir.

Deneysel tasarımda kullanılan dinamik analiz modellemesinde aşağıda belirtilen ve gerçekte kullanılan hareketli tabla, uzun kol ve kısa kol ağırlıkları değer olarak kullanılmıştır.

- Hareketli Tabla Ağırlığı : 191 gr
- Kısa Kol Ağırlığı : 261 gr
- Uzun Kol Ağırlığı : 104 gr

Yüksek ivmeli çalışmada kol malzemesi için karbon fiber kullanılmıştır. Böylece kol ağırlıklarının yüksek ataletle neden olmaması ve aynı zamanda yüksek mukavemete sahip olması sağlanmıştır.

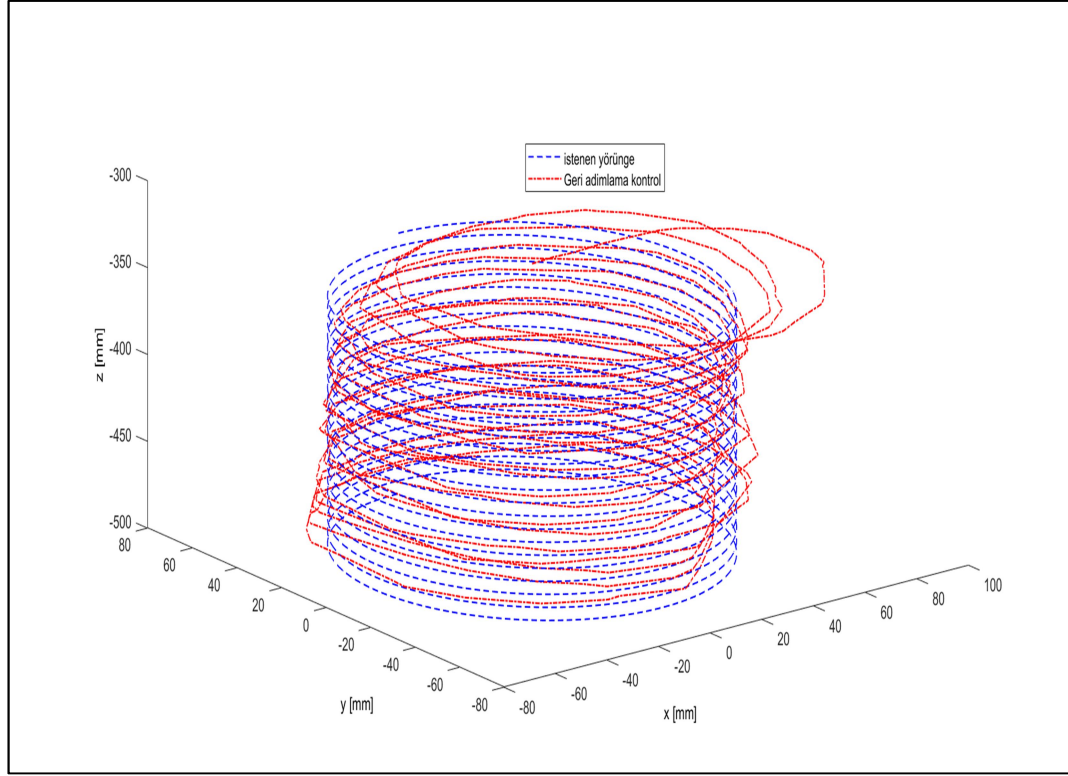
Deneysel tasarım çalışmaları sonucu ortaya çıkan grafiklerde [0.0] pozisyon verisi, başlangıç referansı ile gelen bir hata olarak görülmüştür. Bu hatayı oluşturan nedenin, analog açı bilgisi sinyallerini düzeltmek için konulan düşük geçişli filtrenin $[\frac{20}{s+20}]$ ilk adımında (0.002 sn.) çıkış vermemesi olduğu belirlenmiştir. Veri girişi olmadığı durumlarda sistem otomatik olarak başlangıç referansını [0.0] olarak kabul etmektedir.

6.1. Dairesel Yörünge İzleme Performansı

Çalışmanın bu bölümünde, uç noktanın derinliği değişken bir spiral izini takip etmesi incelenmiştir. Uç noktasının kartezyen koordinatlarındaki denklemleri çalışmanın 5. bölümünde aktarılmaktadır.

Dairesel yörünge izleme deneysel çalışmasında; x, y, z yörünge izleme performansı, istenilen ve gerçekleşen açı performansları, istenilen ve gerçekleşen

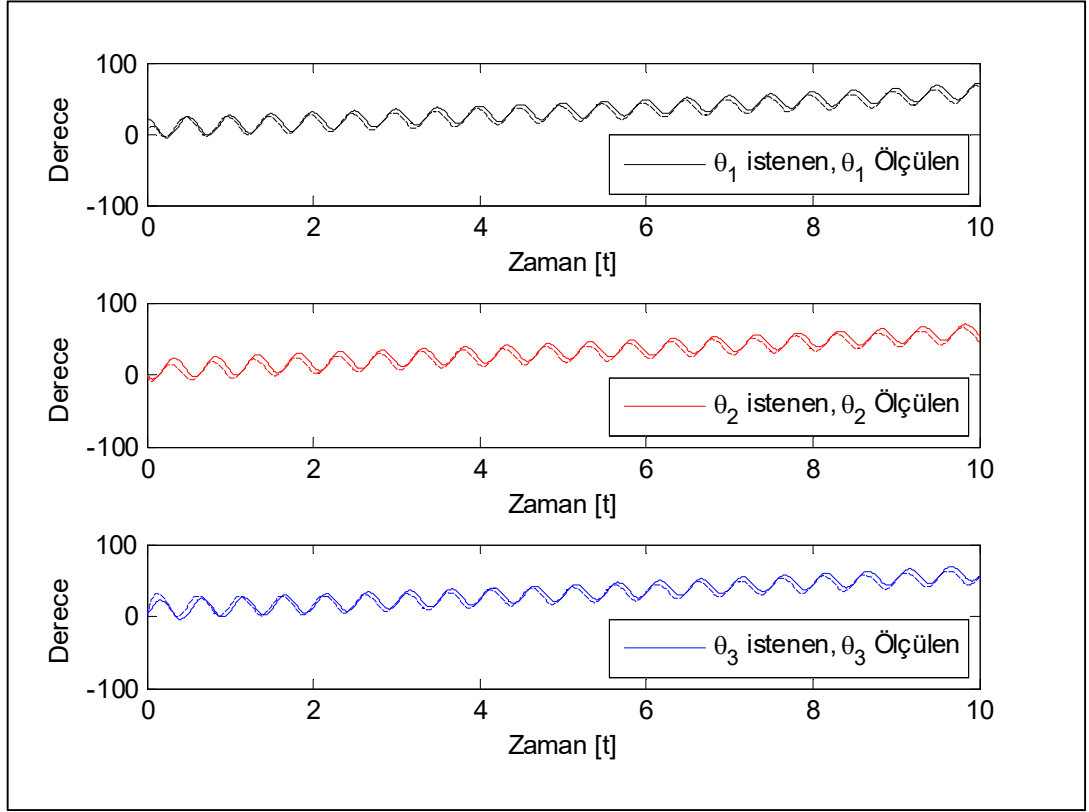
açılar arası hata performansı ile voltaj değişim değerleri gözlemlenmiştir. Bu gözlemlere dayalı olarak ortaya çıkan yörünge izleri Şekil 6.1’de aktarılmıştır.



Şekil 6.1: İdeal derinliği değişken spiral yörünge izi.

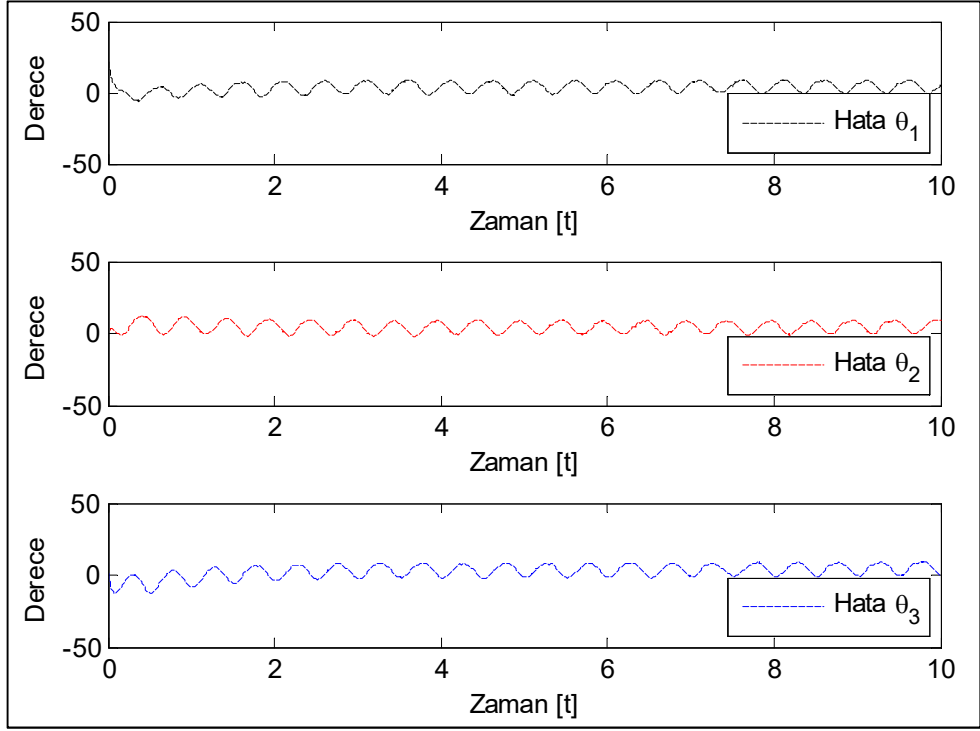
Eksenler arası geçişte oluşan kararlılığı incelemek için z eksenini -350 mm den -500 mm’ye saniyede 15 mm strok aralıkları ile indirilmiş ve spiral yörünge izleme performansı incelenmiştir. Çizilen spiralde $f_i=60$ mm olarak verilmiştir.

Toplam çevrim süresi 10 saniye olarak belirlenmiştir. Fakat uç eyleyicinin başlangıçta belirlenen konumuna giderken harcanan zamandan ötürü toplam süre içinde ölü zaman olduğu görülmüştür.



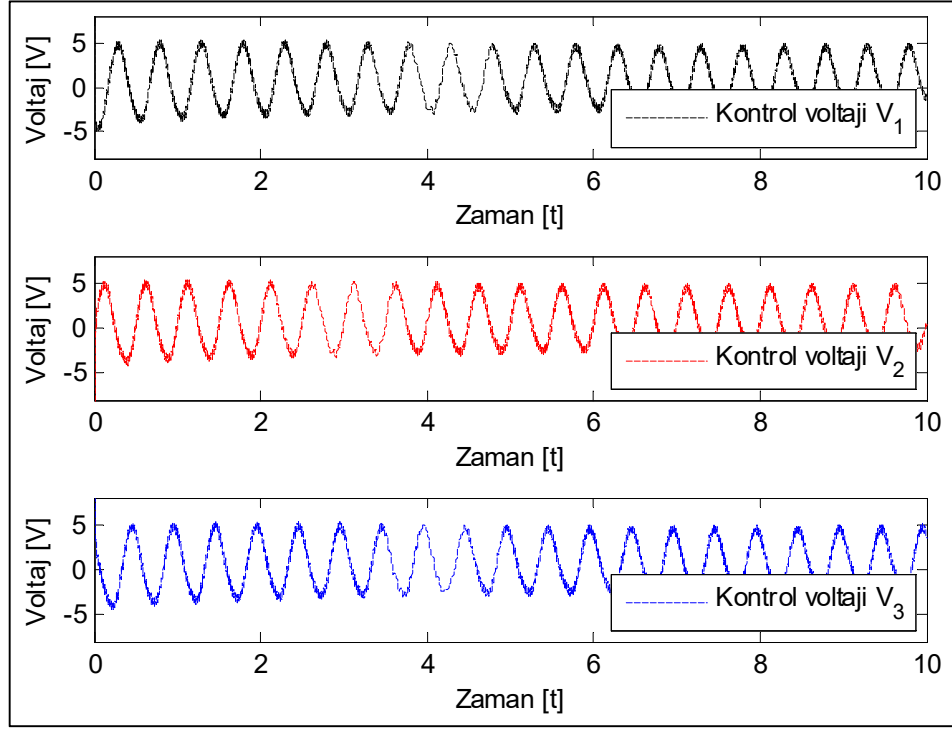
Şekil 6.2: İstenen ve gerçekleşen motor açısı değerleri.

Belirlenen değerler, uç noktada $E_{xyz} = [0 \ 0 \ 350]$ mm iken $E_{xyz} = [0 \ 0 \ 500]$ ye geldiğinde oluşan açılara karşılık gelmektedir. Geri adımlama kontrol katsayıları ise $K = [5 \ 5 \ 5]'$ olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında gerçekleşen yörünge izleme performansı Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.3: İstenen ve gerçekleşen motor açıları arasındaki hata payı.

İstenilen açı değerleri ve gerçekleşen açı değerleri arasındaki farkın kontrol sisteminde kullanıldığında oluşan hata değeri, Şekil 6.3'te ayrıca belirtilmiştir. Çevrim süresi içinde zamana bağlı olarak hata payının [0] değerine yakınsadığı görülmektedir.

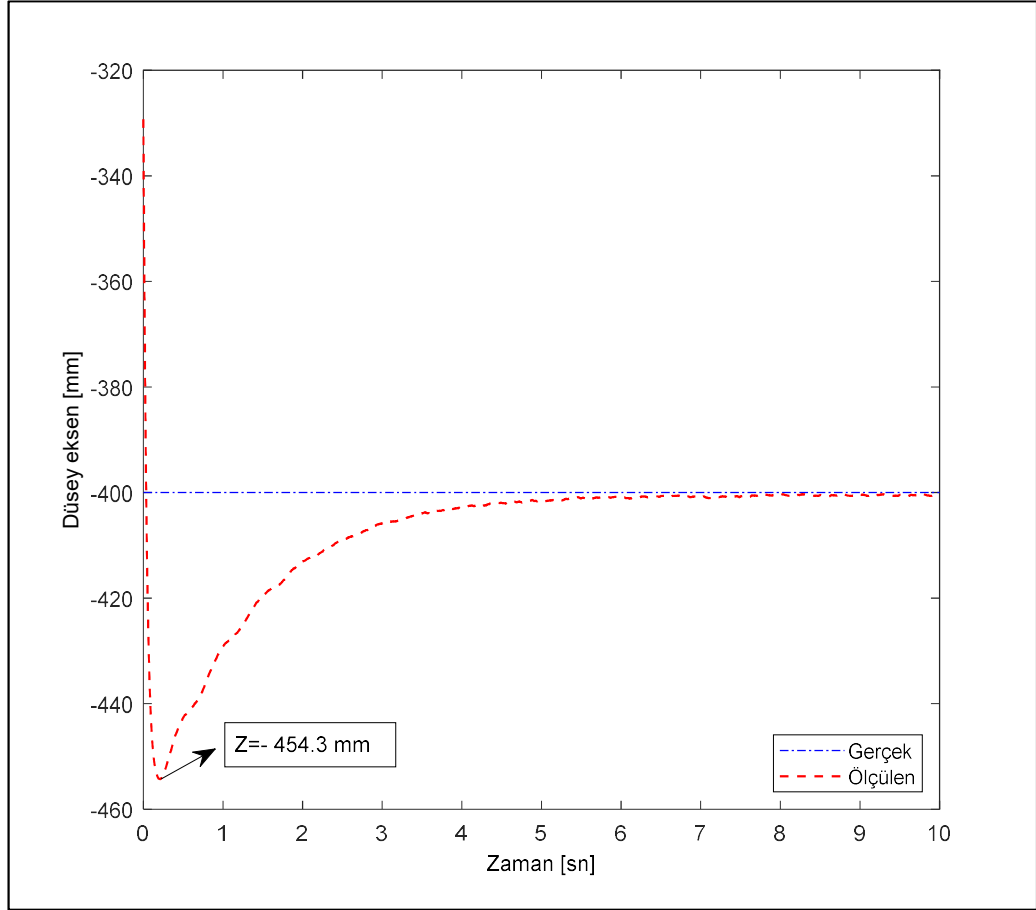


Şekil 6.4: Belirlenen yörünge hareketinde motorlara aktarılan kontrol voltajı (V).

Kontrol sistemi tarafından motorlara gönderilen voltaj değeri Şekil 6.4’te detaylı olarak belirtilmiştir. Üç motor arasında fark olmadığı görülmüştür.

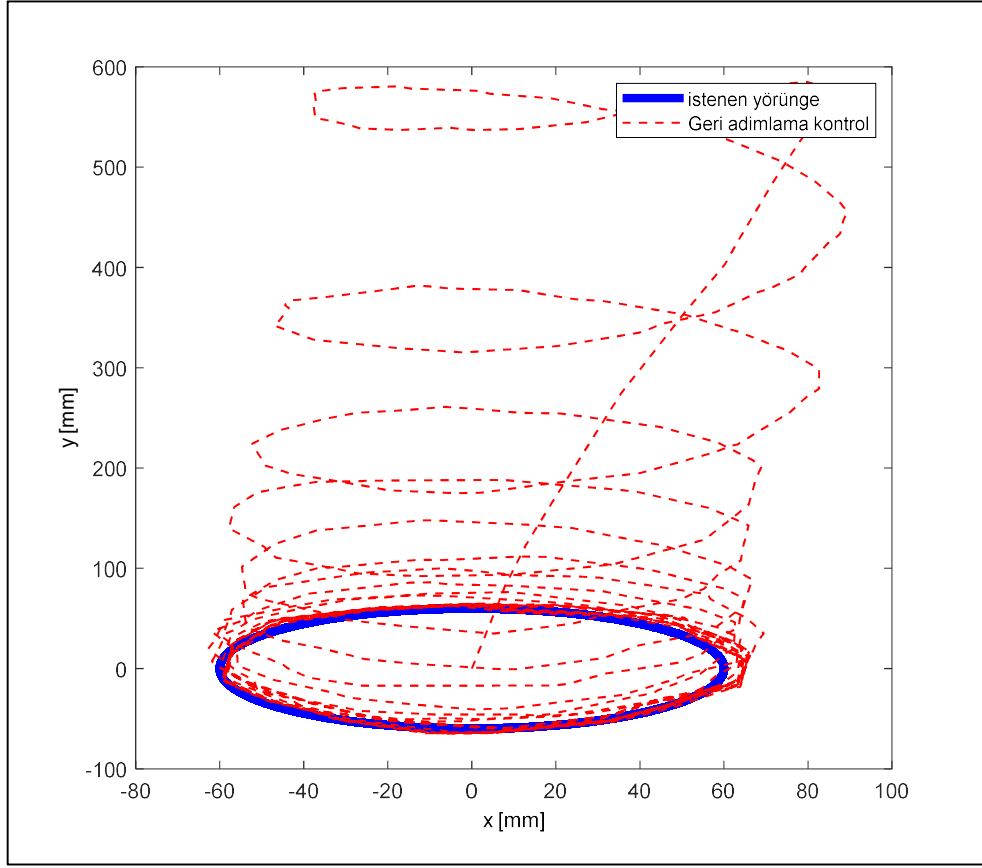
6.2. Daire Yörünge İzleme Performansı

Daire yörüngesi izleme deneysel çalışmasında x, y, z yörünge izleme performansında, motorun z ekeninde istenilen pozisyona geçişindeki kararlılığı ve voltaj değişim değerleri gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucu ortaya çıkan yörünge performansları aşağıda aktarılmıştır.



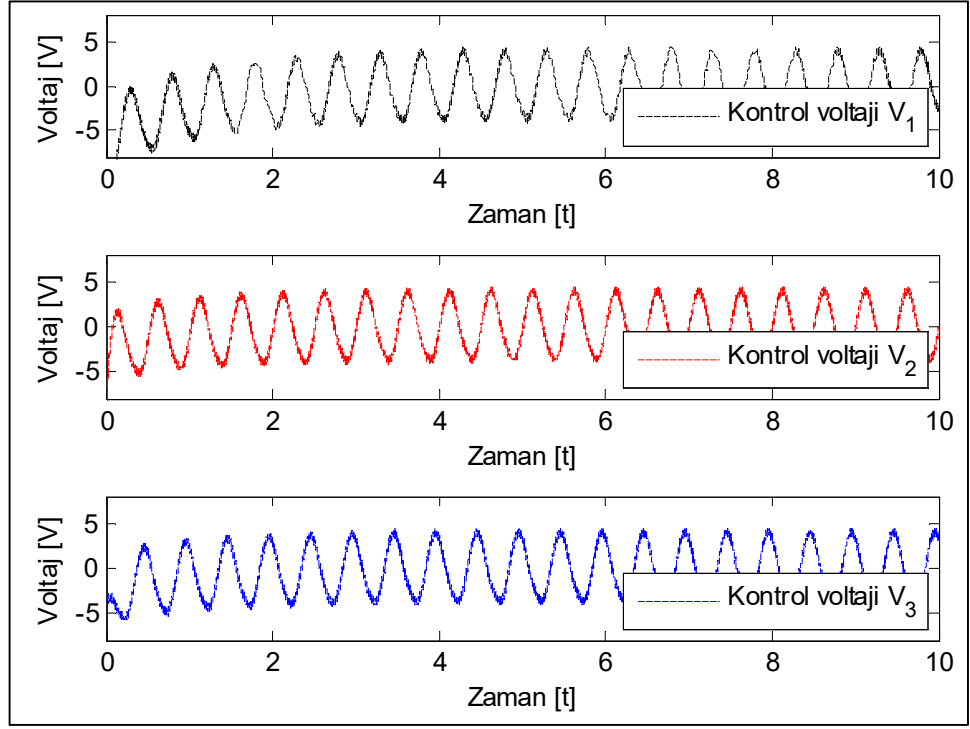
Şekil 6.5: Zamana bağı olarak z ekseninin istenen değere yaklaşımı.

Belirlenen değerler uç noktada $E_{xyz} = [101.6 \ 82.62 \ -330]$ mm iken $E_{xyz} = [0 \ 0 \ -400]$ ye gelerek daire çizilmesi deneysel olarak yapılmıştır. Farklı z değeri verildiğinde kontrol sisteminin kararlılık değeri gözlemlenmiştir. Geri adımlama kontrol katsayıları ise $K = [5 \ 5 \ 5]'$ olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında gerçekleşen yörünge izleme performansı Şekil 6.5'te verilmiştir. İstenen z değerine ulaşılmasında, farklı yapılan denemelerle 4 saniye değerinin olduğu gözlemlenmiştir.



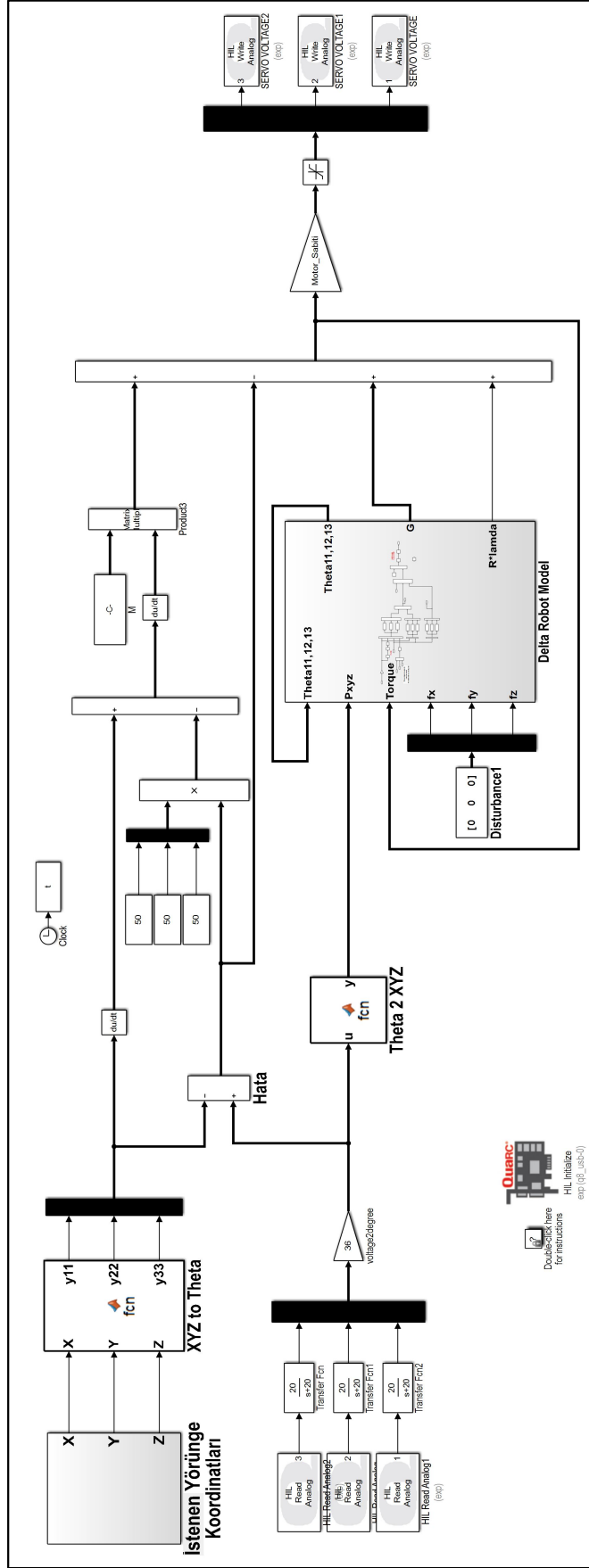
Şekil 6.6: Daire yörünge izleme performansı.

Şekil 6.6’da belirtilen daire yörünge izleme performansında çizilen daire $r_i=60$ mm olarak verilmiştir. Belirlenen 10 saniyelik çevrim süresinde istenilen değere, geri adımlama kontrolü ile ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 6.7: Daire yörüngesi takibinde kontrol voltajı değerleri.

Belirlenen yörüngelerin değişimine göre istenilen ve gerçekleşen açı değerlerinde ve hata payında değişiklik olmadığı görüldüğünden tekrar grafikleri eklenmemiştir. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi yörünge değişiminde kontrol voltajının da büyük değişimleri olmadığı gözlemlenmiştir.

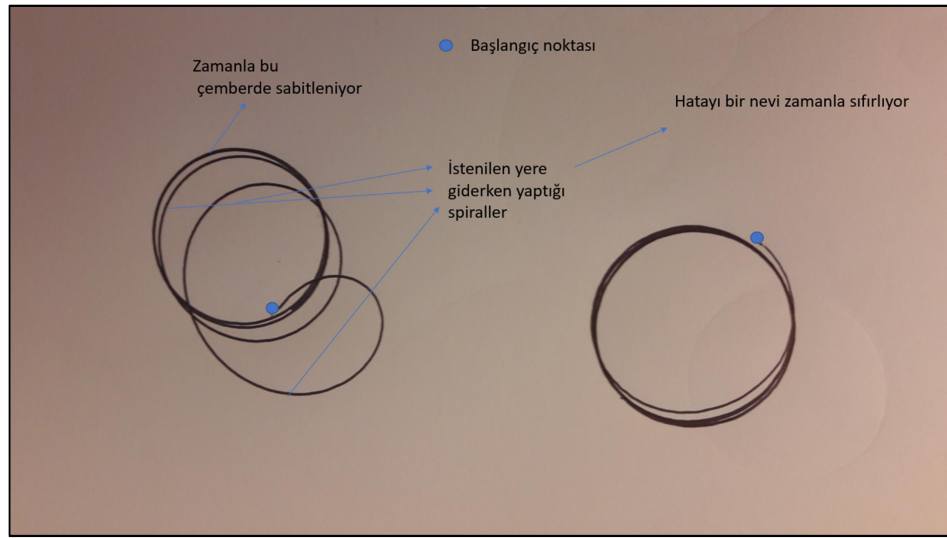


Şekil 6.8: Deneysel çalışmada kullanılan matlab-simulink diyagramı.

Kontrol sisteminde $\tau = G + R\lambda + M\dot{\alpha} - z_1$ olarak belirlenen delta robot çıkış tork değerine göre Şekil 6.8’de gösterilen ve deneysel çalışmada kullanılan matlab-simulink diyagramı tasarlanmıştır.

Delta uç noktası x, y, z koordinatlarında sensör ile ölçülemediği için, ölçülebilen motor açıları üzerinden ileri kinematik analiz ile uç noktası x, y, z koordinatları elde edilmiştir.

Simülasyon analizi ile deneysel analiz sonucunun faz farkı, servo motor enkoderlerinden alınan analog çıkışların kararlı sonuç vermemesine etken olmuştur. Bu etkinin azaltılması için enkoder analog çıkış değerlerine filtre uygulanarak optimize edilmiştir.



Şekil 6.9: Simülasyon Çıktısı ile Deneysel Sonuç karşılaştırması.

Simülasyon değerleri ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın bir diğer nedeni ise, deneysel sistemde kullanılan servo motorların tork değerlerinin 1,7 Nm ve ucundaki planet Redüktör ile çıkış değerinin 17 Nm olmasıdır.

Simülasyon ve kontrol sistemi ile ulaşılmaya çalışılan grafiklerin çıkartılmasında ihtiyaç duyulan tork değerleri ise uç eyleyicide maksimum 1-1,5 Nm tork değerlerindedir. Bu değerlerin analog geri besleme ile motora kapalı devre sonuç alındığında yeterli kararlılığı sağlayamadığı görülmüştür.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez çalışmasının amacı kinematik analizleri ve dinamik modellemesi yapılan delta robot uygulama bloklarının, imalatı yapılan robot üzerinde kontrol kartı üzerinden aktarılmasıdır. Belirlenen hedef başarı ile tamamlanmıştır.

Çalışma sürecinde, motor verilerinin servo motor imalatçılarından kapsamlı olarak alınamamasından dolayı simülasyon çalışmalarında alınan bazı motor değerleri gerçekliğine yakınsama ile belirlenmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde, servo motorların tork kontrolü ve konum kontrolünde analog girdi ve çıktılar yerine farklı fieldbus sistemlerinin kullanılması daha kararlı değerlerin alınmasını sağlamaktadır. Bu sonuç, analog verinin oluşturduğu kararsızlık sonuçlarından ve endüstriyel uygulamalarda görülen tercih nedenlerinden çıkarılmıştır. Ayrıca bu sonuç, mekanik sistemin kontrolünün yapılması ile ihtiyaca yönelik özel olarak hazırlanmış kontrol kartları üzerine çalışmalar yapılması gerektiğini de göstermektedir.

Genel olarak paralel robotların özel durumlarda ise delta robotların kontrol sistemlerinde oluşturulacak gelişmelerle, üretim süreçlerinin maliyet etkisinin azalacağı ve planlanan işe uygun çalışmaların daha kolay yapılacağı düşünülmektedir. Özellikle 3D yazıcıların ve grafik işleme uygulamalarının artması, kontrol tabanlı kullanıcı dostu sistemlere olan ihtiyacın da artmasını sağlamaktadır.

Delta robotun gelişim sürecinin 40 yıla yakınsamasına karşın ilk patent üzerine geliştirilen 200'ün üzerindeki patent ya da faydalı modelin gösterdiği durum, delta robotların araştırma ve geliştirmeye açık bir kontrol ve sistem yapısına sahip olduğudur.

KAYNAKLAR

Abdellatif H., Benimeli F., Heimann B., Grotjahn M., (2004), “Direct Identification of Dynamic Parameters for Parallel Manipulators”, Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Robotics, 999-1005, Aachen, Germany, 13-15 September.

Clavel R., (1990), “Device for the Movement and Positioning of an Element in Space”, U.S. Patent 4,976,582.

Dasgupta B., Choudhury P., (1999), “A General Strategy Based on the Newton-Euler Approach for the Dynamic Formulation of Parallels Manipulators”, Mechanism and Machine Theory, 801-824.

Ergül Ö.S., (2009), “Accurate and Efficient Solutions of Electromagnetics Problems with the Multilevel Fast Multipole Algorithm”, Doctoral Thesis, Bilkent University.

Jayarajan K., Siddiqui A., (2016), “Effect of Link Length Ratio on the Workspace of A Delta Robot”, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 5 (4).

Merlet J.P., (2000), “Parallel Robots”, 2nd Edition, Springer, Netherlands.

Patel Y.D., George P.M., (2012), “Parallel Manipulators Applications—A Survey”, Modern Mechanical Engineering, 2, 57-64.

Poppeova V., Uricek J., Bulej V., Sindler P., (2011), “DELTA ROBOTS – ROBOTS FOR HIGH SPEED MANIPULATION”, Technical Gazette 18 (3), 435-445.

Ramírez-Neria M., Sira-Ramírez H., Luviano-Juárez A., Rodríguez-Ángeles A., (2015), “Active Disturbance Rejection Control Applied To a Delta Parallel Robot In Trajectory Tracking Tasks”, Asian Journal of Control, 17 (2), 636-647.

Simaan N., Wei W., Goldman R., Fine H., Chang S., (2008), “Systems, Devices, and Methods for Surgery on a Hollow Anatomically Suspended Organ”, C.A. Patent 2,663,797.

Stewart D., (1965), “A Platform with Six Degrees of Freedom”, Institution of Mechanical Engineers, 180 (1), 371-386.

Thusty J., Ziegert J., Ridgeway S., (1999), “Fundamental Comparison of the Use of Serial and Parallel Kinematics for Machine Tools”, Annals of the CIRP, 351-356.

Tsai L.W., (1999), “Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, 1st Edition, John Wiley & Sons, Inc., United State of America.

Web 1, (2019)

<http://robby.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/DescriptiveGeometryDeltaRobot.pdf>, (Eriřim Tarihi: 15.10.2019).

Web 2, (2019), <https://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>, (Eriřim Tarihi: 15.10.2019).

Web 3, (2019), <https://me.columbia.edu/academics/undergraduate/senior-design>, (Eriřim Tarihi: 15.10.2019).

Web 4, (2019), <https://acrome.net/delta-robot>, (Eriřim Tarihi: 27/09/2019).

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul’da doğdu. 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Makine Mühendisliği Bölümü mezunu oldu. 2009 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2019 yılında mezun oldu. Proje satış mühendisi olarak 2000 yılında göreve başladığı HKTM firmasında, 2007 yılında Proje Satış Müdürü, 2011 yılında Proje Satış ve Pazarlama Grup Müdürü, 2014 yılında Genel Müdür Yardımcısı oldu. 2016 yılından itibaren ise aynı firmada Genel Müdür olarak çalışma hayatına devam etmektedir.

EKLER

Ek A: Delta Robot Patenti

United States Patent [19]
Clavel

[54] **DEVICE FOR THE MOVEMENT AND POSITIONING OF AN ELEMENT IN SPACE**

[75] **Inventor:** Reymond Clavel, Ecublens, Switzerland

[73] **Assignee:** Sogeva S.A., Switzerland

[21] **Appl. No.:** 403,987

[22] **Filed:** Sep. 6, 1989

Related U.S. Application Data

[63] Continuation of Ser. No. 96,113, Aug. 13, 1987, abandoned.

Foreign Application Priority Data

Dec. 16, 1985 [CH] Switzerland 5348/85

[51] **Int. Cl.:** B25J 9/12

[52] **U.S. Cl.:** 414/729; 901/23; 901/28; 248/179; 108/20; 108/138; 74/479

[58] **Field of Search:** 414/728, 729, 735; 901/23, 24, 25, 28, 14; 248/179, 654; 108/201, 138; 74/479

[56] **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

2,286,571	6/1942	Pollard	901/15
3,419,238	12/1968	Flory	248/163.1
4,407,625	10/1983	Shum	414/728
4,435,116	3/1984	Van Deberg	414/728
4,569,627	2/1986	Simunovic	414/735
4,651,589	3/1987	Lambert	901/22 X
4,712,971	12/1987	Fyler	414/744 R

[11] **Patent Number:** 4,976,582

[45] **Date of Patent:** Dec. 11, 1990

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

0422580 9/1974 U.S.S.R. 901/28

OTHER PUBLICATIONS

Mechanisms, Linkages, and Mechanical Controls, Nichols P. Chironis, copyright 1965, Scientific Library U.S. PTO, pp. 326-329.

Primary Examiner—Robert J. Spar
Assistant Examiner—Donald W. Underwood
Attorney, Agent, or Firm—William Brinks Olds Hofer Gilson & Lione

ABSTRACT

The device comprises a base element (1) and a movable element (8). Three control arms (4) are rigidly mounted at their first extremity (15) on three shafts (2) which may be rotated. The three assemblies each formed by a shaft (2) and an arm (4) are the movable parts of three actuators (13) of which the fixed parts (3) are integral with the base element. The other extremity (16) of each control arm is made integral with the movable element through two linking bars (5a, 5b) hingedly mounted on the one hand to the second extremity (16) of the control arm and, on the other hand, to the movable element. The inclination and the orientation in space of the movable element remain unchanged, whatever the motions of the three control arms may be. The movable element supports a working element (9) of which the rotation is controlled by a fixed motor (11) situated on the base element. A telescopic arm (14) connects the motor to the working element.

25 Claims, 4 Drawing Sheets

Şekil A1.1: Delta Robot Patenti.

Ek B: Delta Robot Hakkında Yapılan Akademik Yayınlar

JOURNALS	ARTICLE	AUTHOR	URL/DOI	RELEVANCE
ROBOTICA	Recursive modelling in dynamics of Delta parallel robot	Stephan Staicu		Kinematics
Ji xie gong cheng xue bao	Dynamic dimensional synthesis of delta robot	Limin Zhang		Dynamic Synthesis
Intelligent Robotics and Applications: 4th Intl Conference	Stiffness Analysis of Clavel's DELTA Robot	Martin Wahle		Structural
Applied Mechanics and Materials	Walking of a Delta Robot in Image Space	Boonhajaroen, N., & Chancharoen		Controls and Feedback
International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)	Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot	B.Moharana , Rakesh Gupta, Bashishth Kumar Kushwaha		Specific Application: Laser Cutting Tool
Future Communication, Computing, Control and Management. Vol. 1	Dynamic Modeling, Simulation and Experiment of the Delta Robot	Feng, Wang Pan	10.1007/978-3-642-27311-7_20	Dynamic Modeling, Simulation and Experiment
International journal of advanced robotic systems	Workspace and Payload-Capacity of a New Reconfigurable Delta Parallel Robot	Maya, Mauro	10.5772/54670	Alternative Kinematic Methods
ASME 2014 Conference on Information Storage and Processing Systems	Asymmetric Arm Design on Delta Robot System	Tsung-Liang Wu, Jih-Hsiang Yeh and Cheng-Chen Yang		Rod Design
The International Journal of Robotics Research	Determination of Singularities in Delta-Like Manipulators*	Raffaele Di Gregorio	10.1177/0278364904039689	Kinematics and Singularities
The International Journal of Robotics Research	Fully Isotropic Four-Degrees-of-Freedom Parallel Mechanisms for Schoenflies Motion*	Marco Carricato	10.1177/0278364905053688	4 DOF vs. 3 DOF
Proceedings of the 18th Intl Symposium on Industrial Robots	DELTA a fast robot with parallel geometry**	Christoph W. Burckhardt	0948507977 (ISBN)	History. Reference to other journals
Computer Aided Surgery	Surgiscope: initial experience and perspectives for the future	Haase, Jens Jørgensen,		Robotic Surgery
Minimally Invasive Neurosurgery	Image-guided neurosurgery / neuronavigation / the SurgiScope: reflections on a theme	J. Haase		Robotic Surgery
Delta Robot: The Story of Success		Illian Bonev		Delta robot history

Şekil B1.1: Delta Robot Hakkında Yayınlanan Makaleler.

PATENT #	TITLE	INVENTOR	WEBSITE	RELEVANCE
US 4976582 A	Device for the movement and positioning of an element in space	Reymond Clavel		Original Design
EP 2301726 B1	Telescopic shaft for an industrial robot according to the delta concept	Daniele Bellante		Additional rotational DOF on end-effector
DE 102011075418 A1	A device for moving and positioning an object in space	Mohamed Bouri, Reymond Clavel, Marc-Olivier Demasure, Michel Huser, David Keiffer, Alain Teklitz, Matthias Tschudi,		Overall Design, spring damping systems
DE 102010047315 B4	Robot with parallel link arms	Katsumi Fujimoto, Satoshi Kinoshita, Hidenori Kurebayashi, Tomoaki NAGAYAMA, Tokitaka Uemura, Masahiro Yamamoto		Additional rotational DOF on end-effector
DE102014101912-A1	Robot i.e. delta robot, for handling of loads in industrial environment, has actuator whose movement axis is outside and is not parallel to plane with respect to parallel movement axes of other actuators	Oldin Beheer		Improving effectiveness and compactness of structure
KR1413152-B1	Ball joint for delta robot, has gas layer fixed in interval of pocket part and joint part, where layer is formed with jet hole to spray gas on outer side of pocket part, and ring-type rail part fixed in inner periphery of pocket part	Lee M		Rod End/ Ball Joint Design
CN 203619682 U	Hybrid five degrees of freedom robotic minimally invasive surgery	Song C, Xu Z, Chen T		Robotic surgery

Şekil B1.2: Delta Robot Alanında Alınan Patentler.

Ek C: Delta Robot Deneysel Çalışmasında Kullanılan Servo Motor Kataloğu

Project Planning Manual | Rexroth IndraDyn S

Electric Drives | Bosch Rexroth AG 35/275
and Controls

Technical Data

4.4 MSK040B - Technical Data

Designation	Symbol	Unit	MSK040B-0450-NN	MSK040B-0600-NN
UL Files (UL)			E163211	
Continuous torque at standstill 60 K	$M_{0,60}$	Nm	1.7	
Continuous current at standstill 60 K	$I_{0,60(max)}$	A	1.5	2.0
Continuous torque at standstill 100 K	$M_{0,100}$	Nm	1.9	
Continuous current at standstill 100 K	$I_{0,100(max)}$	A	1.7	2.2
Maximum torque	M_{max}	Nm	5.1	
Maximum current	$I_{max(max)}$	A	6.0	8.0
Torque constant at 20 °C ¹⁾	$K_{M,N}$	Nm/A	1.26	0.92
Voltage constant at 20 °C ²⁾	$K_{EMK,1000}$	V/min ⁻¹	77.8	58.5
Winding resistance at 20 °C	R_{12}	ohms	14.70	8.40
Winding inductivity	L_{12}	mH	64.700	35.400
Discharge capacity of the component	C_{dis}	nF	1.3	1.5
Number of pole pairs	p	-	4	
Moment of inertia of the rotor	J_{rot}	kg*m ²	0.00010	
Thermal time constant	T_{th}	min	13.0	
Maximum speed	n_{max}	min ⁻¹	6,000	7,500
Sound pressure level	L_p	dB[A]	<75	
Weight ³⁾	m	kg	2.8 (3.1)	
Ambient temperature in operation	T_{amb}	°C	0 ... 40	
Type of protection according to IEC 60529	---	-	IP65	
Insulation class according to DIN EN 60034-1	---	-	155	
Latest amendment: 2008-04-30				

1) 2)

Manufacturing tolerance ±5 %

3)

(...) Values for motors with holding brake, sorted (holding brake 1, holding brake 2 ...)

Fig.4-11:

MSK - Technical data (standard cooling)

Designation	Symbol	Unit	Holding brake 1
Holding torque	M_h	Nm	4.0
Rated voltage	U_N	V	24
Latest amendment: 2006-07-21			

Şekil C1.1: Delta Robot Deneysel Çalışmasında Kullanılan Servo Motor Kataloğu.

Ek D: Delta Robot Deneysel Çalışmasında Kullanılan Redüktör Kataloğu

TK⁺ 010 MF 1-/2-stage

			1-stage					2-stage									
Ratio	i		3	4	5	7	10	12	16	20	25	28	35	40	50	70	100
Max. torque ¹⁾	T_{in}	Nm	84	84	84	80	50	84	84	84	84	84	84	84	84	80	50
		in.lb	743	743	743	531	443	743	743	743	743	743	743	743	743	531	443
Max. acceleration torque ²⁾ (max. 1000 cycles per hour)	T_{acc}	Nm	70	70	70	60	50	70	70	70	70	70	70	70	70	60	50
		in.lb	620	620	620	531	443	620	620	620	620	620	620	620	620	531	443
Nominal torque (at n_n)	T_{nn}	Nm	50	50	50	45	40	50	50	50	50	50	50	50	50	45	40
		in.lb	443	443	443	398	354	443	443	443	443	443	443	443	443	398	354
Emergency stop torque ³⁾ (permitted 1000 times during the service life of the gearbox)	T_{stop}	Nm	95	115	115	110	100	115	115	115	115	115	115	115	115	110	100
		in.lb	841	1018	1018	974	885	1018	1018	1018	1018	1018	1018	1018	1018	974	885
Permitted average input speed (at T_{nn} and 20 °C ambient temperature) ⁴⁾	n_{in}	n_{in}	2100	2200	2500	2500	2500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3800	4500
Max. input speed	n_{max}	rpm	7500	7500	7500	7500	7500	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Mean no load running torque ⁵⁾ (at n_n = 3000 rpm and 20 °C gearbox temperature)	T_{no}	Nm	2.4	2	1.8	2.4	2.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
		in.lb	21	18	16	21	19	4	4	3	3	3	3	3	1	1	1
Max. backlash	i_b	arcmin	Standard < 4														
Torsional rigidity ⁶⁾	C_{D1}	Nm/arcmin	6	7	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8
		in.lb/arcmin	53	62	71	71	71	62	62	62	62	62	62	62	71	71	71
Max. axial force ⁷⁾	F_{axial}	N	3400														
		lb _f	765														
Max. tilting moment	M_{axial}	Nm	437														
		in.lb	3868														
Efficiency at full load	η	%	96					94									
Service life	L_s	h	> 20000														
Weight (incl. standard adapter plate)	m	kg	5.3					6.1									
		lb _m	12					13									
Operating noise (at reference ratio and reference speed – ratio-specific values available in cymax [®])	L_{pA}	dB(A)	< 66														
Max. permitted housing temperature		°C	+90														
		F	194														
Ambient temperature		°C	0 to +40														
		F	32 to 104														
Lubrication			Lubricated for life														
Direction of rotation			In- and output opposite direction														
Protection class			IP 65														
Metal bellows coupling (recommended product type – validate sizing with cymax [®])			BCT - 00060AAX - 050.000														
Bore diameter of coupling on the application side		mm	X = 014.000 - 035.000														
Mass moment of inertia (relative to the drive) Clamping hub diameter [mm]	C	14	J_1	kgcm ²	-	-	-	-	0.31	0.28	0.24	0.23	0.21	0.2	0.19	0.18	0.18
				10 ⁻⁴ in.lb.s ²	-	-	-	-	0.27	0.25	0.21	0.2	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16
	E	19	J_2	kgcm ²	1.81	1.39	1.18	1.02	0.93	0.75	0.72	0.68	0.66	0.63	0.63	0.63	0.63
				10 ⁻⁴ in.lb.s ²	1.6	1.23	1.04	0.9	0.82	0.66	0.64	0.6	0.6	0.56	0.56	0.56	0.56
	H	28	J_3	kgcm ²	3.22	2.6	2.6	2.43	2.34	-	-	-	-	-	-	-	-
				10 ⁻⁴ in.lb.s ²	2.85	2.48	2.3	2.15	2.07	-	-	-	-	-	-	-	-

Please use our sizing software cymax[®] for a detailed sizing – www.wittenstein-cymax.com
Please contact us for optimum sizing at S1 conditions (Continuous operation).

¹⁾ At max. 10 % M_{rated}
²⁾ Valid for standard clamping hub diameter
³⁾ Refers to center of the output shaft or flange
⁴⁾ Please reduce input speed at higher ambient temperatures

Şekil D1.1: Delta Robot Deneysel Çalışmasında Kullanılan Redüktör Kataloğu.

Şekil E1.1: Delta Robot Deneysel Çalışmasında Kullanılan Sabit Platform Tablası Çizimi.



Ek F: Delta Robot Üretimini Yapan HKTM Firmasının Kataloğu



02

It is perhaps our greatest responsibility to develop world's most innovative technologies with an utmost respect to the planet's limited resources. This is our duty towards both our customers and our children...

For this reason, we comply with the most up-to-date environmental standards and we consider the environmental impacts in each step during the period from the first stage to the minute we present it to you.

Because for us, engineering is to make the world a better place above all.

Our dreams shape our ideas, and our ideas form our strength.

When drawing upon our strength emanating from engineering, we care to respect all living creatures and environment, to ensure that people live and work safely, to create awareness and innovation, to promote internal and external training, to raise our quality criteria at all times, and to share our knowledge that grows with increased experience.



We are working hard to establish a concept that fully meets your needs and expectations during the entire process.

We have certified our environmental awareness with **ISO 14001 Environmental Management System** to consider environmental impacts in all steps from the first stage of the product to the time we offer it to our customers.

We have certified our perspective, which always aims for the better and is based on continuous improvement, with **ISO 9001: 2015 Quality Management System** at our new plant.

We have certified our sensitivity in terms of occupational health and safety of our employees and visitors with **OHSAS 18001 Occupational Health and Safety Management System**.

Regarding our activities for efficient use of energy and natural resources in all our processes, we have got the **ISO 50001 Energy Management System, and we have managed to become the first plant in the sector** and the 14th plant in Turkey to be awarded the **Leed Gold Certificate**, which is granted by the U.S. Green Building Council.

Being aware of the importance of customer satisfaction, we have certified our relevant activities with **ISO 10002 Customer Satisfaction Management System**.

Having sensitivity for information security, we are continuing our studies to reach the standards of **ISO 27001 Information Security System** to make sure that the assets of our company and our customers are free of risks.

hktm | ROBOT
www.hktmrobot.com

Şekil F1.1: Delta Robot Üretimini Yapan HKTM Firmasının Kataloğu.