

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİPER GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ  
YILANSI ROBOTLAR İÇİN YOL PLANLAMA  
ALGORİTMASI VE KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**YALÇIN BULUT**

**DENİZLİ, ARALIK - 2020**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



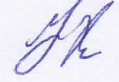
**HİPER GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ  
YILANSI ROBOTLAR İÇİN YOL PLANLAMA  
ALGORİTMASI VE KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**YALÇIN BULUT**

**DENİZLİ, ARALIK - 2020**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**Yalçın BULUT**

## ÖZET

### HİPER GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ YILANSI ROBOTLAR İÇİN YOL PLANLAMA ALGORİTMASI VE KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ  
YALÇIN BULUT

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ERDİNÇ ŞAHİN ÇONKUR)  
DENİZLİ, ARALIK - 2020

Bu tezde gereğinden/hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler için, kapalı alanlar içinde basit geometrik kurallar tarafından idare edilebilen ve gerçek zamanlı çalışan güçlü bir yol planlama algoritması sunulmuştur. Engellerle çevrili manipülatörü yönlendirebilmek için kullanılan bilgilerin tümü ayrıklaştırılmış yol içinde saklıdır. Fiziksel olarak mümkün olması şartıyla, yöntemin kendine özgü manevra özellikleri, manevra uzayının yüzde doksan sekizinin kullanılmasını sağlamıştır. Çeşitli bilgisayar simülasyonlarıyla yöntemin etkinliği kanıtlanmıştır. Bu tez, yukarıda bahsedilen algoritmanın mekanik olarak uygulanabilme zorluklarını da ele almaktadır. Mafsallarında servo motor ve redüktör bulunan, art arda bağlanmış çok yüksek sayıda uzuvlara sahip bir robot manipülatör teorik olarak tasarlanabilir. Ancak, bu mafsal tahrik mekanizması manipülatörün toplam ağırlığını artırdığı için hayata geçirilememektedir. Bunun yerine konumlandırma doğruluğu sorunu olan kablo tahrikli mekanizmalar tercih edilmektedir. Bu tez, kablo tahrikli hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin konumlandırma doğruluğu sorununun üstesinden gelebilmek amacıyla karşı-dengelenmiş iki serbestlik dereceli robotik bir kol sunmaktadır. Robot tabanındaki aktüatörler kablo ve yay kullanarak uzuv mafsallarındaki yer çekimsel torku dengelerken, modül mafsallarındaki hafif ve kompakt aktüatörler hassas hareketi sağlamaktadır. Yöntem sayesinde hassas, hafif ve kompakt hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler üretilebilecektir. Dengeleme süresince uzuv mafsallarında hissedilen tork değerlerinin, geliştirilen iki boyutlu simülatöre sahip kontrol yazılımı aracılığıyla aktüatörlerin nominal tork kapasitelerinin altına indirilebildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Yılansı robot, yol planlaması, engellerden kaçınma, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatör, karşı-dengeli mekanizmalar, yer çekimsel tork dengeleme.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF PATH PLANNING ALGORITHM AND CONTROL METHOD FOR HYPER REDUNDANT SNAKE ROBOTS

PH.D THESIS

YALÇIN BULUT

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ERDINC SAHIN CONKUR)

DENİZLİ, DECEMBER 2020

This thesis presents a robust and real-time path-planning algorithm for redundant/hyper-redundant manipulators governed by simple geometric rules within confined spaces. All the information adopted to steer the manipulator surrounded by obstacles are embedded in a discretized path. Provided that it's physically conceivable, the peculiar maneuvering characteristics of the method enable ninety eight percent of the maneuvering space to be utilized. The proposed method is proved to be effective through various computer simulations. This thesis also addresses the mechanical implementation challenge of the above-mentioned algorithm. A robot manipulator with huge number of links, each of which is successively appended to the proximal link, may theoretically be designed by disposing servo motors and speed reducers to the link joints. However, this joint actuation mechanism augments the total weight of the manipulator, thereby cannot be implemented. Instead, cable driven mechanisms, which brings about the positioning accuracy problem, are preferred. This thesis presents a counter-balanced 2-DOF robotic arm to deal with the positioning accuracy issue of cable driven hyper-redundant manipulators. While the actuators at the robot base, adopting cables and springs, balance the gravitational torques at the link joints, light and compact actuators on the module joints generate precise motion. Hyper-redundant manipulators will be given the opportunity of being precise, light and compact by the method. The torque values at the link joints during balancing have been experimentally verified to be lowered below the nominal torque capacity of the actuators with the aid of a control software incorporating a 2D simulator developed.

**KEYWORDS:** Snake robot, path-planning, obstacle avoidance, hyper-redundant manipulator, counter-balanced mechanisms, gravitational torque compensation.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	vii
SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. HİPER-GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ MANİPÜLATÖRLER İÇİN ÇOK KESKİN MANEVRA KABİLİYETİNE SAHİP GERÇEK ZAMANLI YOL PLANLAMA ALGORİTMASI.....	2
2.1 Giriş .....	2
2.2 Global Yolun Elde Edilmesi ve Genel Kavramlar .....	7
2.3 Yol Planlama Yöntemi .....	10
2.3.1 Yol Boyunca Teğet Nokta Bulmak .....	10
2.3.2 Uzun Bitiş Noktasına En Yakın Yol Noktasını Bulmak .....	11
2.3.3 Teğet Nokta Bulunmadığında En Yakın Kenar Koordinatını Bulmak .....	12
2.3.4 Teğet Nokta Bulunmadığında En Yakın Yol Noktası Koordinatını Bulmak .....	13
2.3.5 Köşe Kimliğinin Saptanması.....	14
2.3.6 Uzun Teğet Nokta Bulma Yetisinin Kasıtlı Olarak Engellenmesi .....	15
2.3.7 Uzun Ani Zıplamalarının Yumuşatılması .....	16
2.3.8 Yol Planlama Algoritmasının Akış Şeması.....	17
2.4 Bilgisayar Simülasyonu Örnekleri .....	18
2.5 Bulgular ve Tartışma .....	22
2.5.1 Manevra Kabiliyeti.....	22
2.5.2 Serbestlik Derecesi Sayısı .....	23
2.5.3 Karmaşıklık ve Yöntemin Geliştirilebilirliği.....	23
2.5.4 Geliştirilen Algoritmanın Literatürdeki Yöntemlerle Kıyaslanması .....	24
2.5.4.1 Uzun Uzun Boylu Manipulatörlere Sahip Olan Yöntemlerle Kıyaslama .....	24
2.5.4.2 Kısa Uzun Boylu Manipulatörlere Sahip Olan Yöntemlerle Kıyaslama .....	32
2.5.4.3 Ticari Ürünler.....	35
2.5.5 Algoritmanın Uygulanması .....	36
2.6 Sonuçlar.....	37
3. GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ ROBOTLARDA KULLANILMAK ÜZERE KARŞI DENGELİ İKİ SERBESTLİK DERECELİ DÜZLEMSEL ROBOTİK KOL TASARIMI VE AKTİF KONTROLÜ .....	38
3.1 Giriş .....	38

3.2	İki Serbestlik Dereceli Yer Çekimsel Tork Dengeleme Sistemi .....	42
3.2.1	Modüllerin Dönmesinden Kaynaklanan Yay Kuvveti Artış ve Azalışları.....	45
3.2.1.1	Kırmızı Yay Kuvveti Artış ve Azalışları .....	46
3.2.1.2	Yeşil Yay Kuvveti Artış ve Azalışları .....	47
3.2.2	İkinci Modülü Karşı-Dengeleme Yöntemi .....	49
3.2.3	Birinci Modülü Karşı-Dengeleme Yöntemi .....	51
3.2.4	Senkronizasyon Prosedürü .....	53
3.3	Deney Düzenegi .....	53
3.4	Bulgular ve Tartışma .....	57
3.4.1	Karşı-dengeleme Tork Değerlerinin Ölçülmesi .....	59
3.4.2	Ek Servo Motorların Güç Tüketiminin Hesaplanması .....	62
3.4.3	Sunulan Dengeleme Sisteminin Hiper-Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Manipülatlörlere Uygulanması .....	64
3.5	Sonuçlar.....	66
<b>4.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>68</b>
<b>5.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>77</b>
	EK A Manipülâtörün Kademeli İlerleyişi .....	77
<b>6.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Yol noktalarına pencereleme işlemi uygulanması. a. Ham yol, b. Düzgünleştirilmiş yol.....	8
<b>Şekil 2.2:</b> Yol planlama algoritmasının genel kavramları. ....	9
<b>Şekil 2.3:</b> Kritik köşelerin tespiti. ....	9
<b>Şekil 2.4:</b> Yarı-kritik köşelerin tespiti. ....	10
<b>Şekil 2.5a-b:</b> Yol boyunca teğet nokta bulma yöntemi. ....	11
<b>Şekil 2.6:</b> Uzun bitiş noktasına en yakın yol noktasını bulma yöntemi.....	12
<b>Şekil 2.7a-b:</b> Teğet nokta bulunmadığında en yakın kenar koordinatını bulma yöntemi. ....	12
<b>Şekil 2.8:</b> Teğet nokta bulunmadığında en yakın kenar koordinatını bulma detayları. ....	13
<b>Şekil 2.9:</b> Uzun ve engelin kesişmesi durumu.....	14
<b>Şekil 2.10a-b:</b> Uzun ve engelin kesişmesine bulunan çözüm. ....	14
<b>Şekil 2.11:</b> Sağ veya sol köşe tespiti.....	15
<b>Şekil 2.12a-d:</b> Uzun teğet nokta bulma yetisinin kasıtlı olarak engellenmesi. ....	16
<b>Şekil 2.13:</b> Ani sıçramaları yumuşatma yöntemi.....	17
<b>Şekil 2.14:</b> Ani sıçramaları yumuşatma sürecinin tamamı. ....	17
<b>Şekil 2.15:</b> Algoritma ile ilgili bazı kavramların tanıtılması. ....	18
<b>Şekil 2.16:</b> Algoritmanın akış şeması. ....	19
<b>Şekil 2.17a-d:</b> Yol planlama algoritmasının bilgisayar simülasyonu örnekleri.....	20
<b>Şekil 2.18a-b:</b> Bilgisayar simülasyonu sonuçları. ....	21
<b>Şekil 2.19:</b> Performans göstergesi ortamı.....	23
<b>Şekil 2.20:</b> Engellerle çevrili çalışma alanı üzerinde bulunan bir uzunlu robot (Çonkur ve Tola 2008).....	24
<b>Şekil 2.21:</b> Uzun etrafındaki sensör grid noktaları (Çonkur ve Tola 2008). ..	25
<b>Şekil 2.22:</b> Uzun sensör grid noktalarının engel grid noktalarıyla çakışması (Çonkur ve Tola 2008). ....	25
<b>Şekil 2.23:</b> Uzun, kendine en yakın engel noktası etrafında döndürülmesi (Çonkur ve Tola 2008). ....	26
<b>Şekil 2.24:</b> Dönme merkezi noktasının tayini (Çonkur ve Tola 2008).....	26
<b>Şekil 2.25a-c:</b> Uzun karşılaşılabileceği farklı senaryolar (Çonkur ve Tola 2008). ....	27
<b>Şekil 2.26:</b> Engel noktaları arasındaki kayma durumunun iyileştirilmesi (Çonkur ve Tola 2008). ....	28
<b>Şekil 2.27:</b> Uzun uç noktasının hareketi (Çonkur ve Tola 2008). ....	29
<b>Şekil 2.28:</b> Uzun uç noktasının rotasının değiştirilmesi (Çonkur ve Tola 2008).....	29
<b>Şekil 2.29:</b> Uzun çalışma alanındaki hareketi (Çonkur ve Tola 2008).....	30
<b>Şekil 2.30:</b> Birden çok uzunlu yılanlı robotun hareketi (Çonkur ve Tola 2008).....	30
<b>Şekil 2.31:</b> Bazı uzunların fiziksel bağlantılarını kaybetmesi. ....	31
<b>Şekil 2.32:</b> Her biri 8 birim uzunluklu 182 uzuna sahip üç boyutlu yol takibi.	33



<b>Şekil 2.33a-b:</b> Her biri 30 birim uzunluklu 49 uzuvu sahip üç boyutlu yol takibi. ....	34
<b>Şekil 2.34:</b> Her biri 90 birim uzunluklu 15 uzuvu sahip üç boyutlu yol takibi. ....	35
<b>Şekil 3.1:</b> C Sharp kontrol yazılımı arayüzü. ....	43
<b>Şekil 3.2a-b:</b> Yer çekimsel tork dengeleme için CAD tasarımı. ....	44
<b>Şekil 3.3:</b> C Sharp kontrol yazılımı arayüzü. ....	45
<b>Şekil 3.4:</b> Kırmızı çelik halatın uzama miktarı. ....	46
<b>Şekil 3.5:</b> Birinci modül tarafındaki yeşil çelik halatın uzama miktarı. ....	48
<b>Şekil 3.6:</b> İkinci modül tarafındaki yeşil çelik halatın uzama miktarı. ....	49
<b>Şekil 3.7:</b> İkinci modülün moment dengeleme diyagramı. ....	50
<b>Şekil 3.8:</b> Birinci modülün moment dengeleme diyagramı. ....	51
<b>Şekil 3.9:</b> Her bir modülün hız profili. ....	53
<b>Şekil 3.10:</b> Deney düzeneğinin mekanik birimleri. ....	54
<b>Şekil 3.11:</b> Deney düzeneğinin kontrol birimleri. ....	54
<b>Şekil 3.12:</b> Servo motorların birinci ve ikinci modülün mafsallarına bağlanması. ....	56
<b>Şekil 3.13:</b> Modüllerin karşı-dengelemeli hareketi. ....	57
<b>Şekil 3.14:</b> Çengel askılı dijital göstergeli elektronik kantar. ....	59
<b>Şekil 3.15:</b> Birinci mafsal için deneysel sonuçlar. ....	60
<b>Şekil 3.16:</b> İkinci mafsal için deneysel sonuçlar. ....	61
<b>Şekil 3.17:</b> Ek servo motorların güç tüketimi. ....	63
<b>Şekil 3.18:</b> On modüllü manipülatör taslağı. ....	65
<b>Şekil 3.19:</b> Kablo sürtünmesini azaltmak için şematik tasarım. ....	66
<b>Şekil A.1a-ş:</b> Manipülatörün kademeli ilerleyişi. ....	86

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> Deney düzeneği ile ilgili teknik bilgiler. ....	55
<b>Tablo 3.2:</b> Birinci mafsal için deneysel sonuçlar. ....	60
<b>Tablo 3.3:</b> İkinci mafsal için deneysel sonuçlar. ....	61
<b>Tablo 3.4:</b> Ek servo motorların güç tüketimi değerleri. ....	63

## SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>GL</b>	: Kılavuz Uzuv
<b>RL</b>	: Referans Uzuv
<b>DS</b>	: Akış Yönü
<b>US</b>	: Akışın Ters Yönü
<b>n</b>	: Uzuv Numarası
<b>r<sub>fn</sub></b>	: Referans Uzuv Numarası
<b>arLink[n]</b>	: Uzuv Dizisi
<b>TP</b>	: Teğet Noktası
<b>AL</b>	: Komşu Uzuv
<b>SPC</b>	: Başlangıç Noktası Koordinatları
<b>EPC</b>	: Bitiş Noktası Koordinatları
<b>F<sub>rs<sub>i/d</sub></sub></b>	: Kırmızı Yay Kuvvetindeki Artış/Azalış
<b>k<sub>rs</sub></b>	: Kırmızı Yay Sabiti
<b>F<sub>gs<sub>i/d</sub></sub></b>	: Yeşil Yay Kuvvetindeki Artış/Azalış
<b>k<sub>gs</sub></b>	: Yeşil Yay Sabiti
<b>F<sub>gshor</sub></b>	: Tüm Modüller Yatay Konumdayken Yeşil Yay Kuvveti
<b>W<sub>s</sub></b>	: İkinci Modülün Ağırlığı
<b>F<sub>gstot</sub></b>	: Birinci ve/veya İkinci Modül Döndürüldüğünde Oluşan Toplam Yeşil Yay Kuvveti
<b>M<sub>gscomp</sub></b>	: İlgili Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Yeşil Yayın Hareketiyle Telafi Edilmesi Gereken Moment Miktarı
<b>F<sub>gscomp</sub></b>	: M <sub>gscomp</sub> 'i Yaratan Yeşil Yay Kuvveti
<b>d<sub>gsabs</sub></b>	: Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Yeşil Yayın Boyundaki Mutlak Uzama/Kısalma Miktarı
<b>d<sub>gsrel</sub></b>	: Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Yeşil Yayın Boyundaki Nispi Uzama/Kısalma Miktarı
<b>F<sub>rshor</sub></b>	: Tüm Modüller Yatay Konumdayken Kırmızı Yay Kuvveti
<b>W<sub>f</sub></b>	: Birinci Modülün Ağırlığı
<b>F<sub>rstot</sub></b>	: Birinci ve/veya İkinci Modül Döndürüldüğünde Oluşan Toplam Kırmızı Yay Kuvveti
<b>M<sub>rscmp</sub></b>	: İlgili Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Kırmızı Yayın Hareketiyle Telafi Edilmesi Gereken Moment Miktarı
<b>F<sub>rscmp</sub></b>	: M <sub>rscmp</sub> 'i Yaratan Kırmızı Yay Kuvveti
<b>d<sub>rabs</sub></b>	: Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Kırmızı Yayın Boyundaki Mutlak Uzama/Kısalma Miktarı
<b>d<sub>rrel</sub></b>	: Vidalı Mil Tahrikli Lineer Modüle Bağlı Kırmızı Yayın Boyundaki Nispi Uzama/Kısalma Miktarı

## ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca bilgi birikimini benden esirgemeyen, tecrübelerini aktarırken gösterdiği olağanüstü çaba ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Erdiñ Şahin ÇONKUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yine tecrübelerinden, bilgi birikimlerinden ve tavsiyelerinden yararlandığım Tez İzleme Komitesi'ndeki çok değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Yasin YILMAZ ve Sayın Doç. Dr. Erkan ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince varlığını ve desteğini hep yanımda hissettiğim sevgili nişanım Sema Nur ÇEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getirirken maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Gereğinden çok serbestlik dereceli robotlarda engeller arasında engellere çarpmadan ilerlemek konusu önem arz etmektedir. Çünkü bu tip robotlar art arda eklenen çok sayıda uzuvla, dar geçit alanlarına sahip engeller arasından geçebilme potansiyeline sahiptir. Böylece her türlü karışık ortama uyum sağlayabilmesi ve girilmesi zor bölgelere rahatlıkla girerek kendisinden beklenen görevi yerine getirmesi mümkündür.

Tez kapsamında yörünge planlama algoritması geliştirilen robotun, yılsarı hareketlerini yerde değil havada yaptığı varsayılmıştır. Bu bağlamda yılsarı robot, robotik kol olarak da nitelendirilebilir. Çalışma alanının bilindiği durumlarda robot, temele en uzaktaki uzvunun uç noktasını takip etme zorunluluğu olmadan keskin manevralar yaparak engeller arasından hareket ederek hedefine ulaşmaktadır.

Seri robot manipülatörlerinde; ardışık iki uzuv arasına yerleştirilen aktüatör ve aktüatöre bağlı redüktör; tasarım basitliği ve kontrol kolaylığı sağladığı halde, bu aktüatörün ve redüktörün, mafsallara binen yükü taşıyabilecek kadar kapasiteli olması onların aynı zamanda ağır olması sonucunu doğurduğundan dolayı bu tahrik mekanizması hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerde kullanılamamaktadır. Bu yüzden bu tezde, bisiklet fren teli vasıtasıyla her bir motorun üzerine binen tork dengelenerek; kompakt, hafif ve yüksek konumlandırma doğruluğuna ve hassasiyetine sahip hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin hayata geçirilebilmesinin önü açılmıştır. Bu yöntem, geliştirilen yol planlama algoritmasının hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlere uygulanabilmesi için bir çözüm önerisi olarak sunulmuştur.

## **2. HİPER-GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ MANİPÜLATÖRLER İÇİN ÇOK KESKİN MANEVRA KABİLİYETİNE SAHİP GERÇEK ZAMANLI YOL PLANLAMA ALGORİTMASI**

### **2.1 Giriş**

Gereğinden çok serbestlik dereceli olma durumu (redundancy) hakkında birçok tanım vardır. Bunlardan bazıları şu şekilde ifade edilebilir: Manipülâtörün eklem uzayı boyutunun (joint space dimension) işlem elemanı uzayının boyutundan (end-effector space dimension) daha büyük veya görev uzayı boyutunun (task space dimension) işlem elemanı uzayının boyutundan daha küçük olduğu durumlarda, manipülâtör gereğinden çok serbestlik dereceli olarak adlandırılır (Conkur ve Buckingham 1997<sup>a</sup>). Bu manipülâtörler her ne kadar mekanik ve kontrol prosedürleri açısından birtakım zorluklar içerse de Chiacchio ve diğ. (1991); gereğinden çok serbestlik derecesi, bir manipülâtöre çalışma alanında öyle bir hareket kabiliyeti sağlar ki; manipülâtör bu sayede etrafındaki engellere çarpmadan yoluna devam ederek Nakamura (1991) bakım, onarım ve muayene gibi işlemler gerçekleştirebilir (Ma ve diğ. 1994). Manipülâtör çalışma alanı içerisinde bir hedef noktasına ilerlerken, manipülâtörün uzuvlarının birbirlerine ve/veya etrafındaki engellere çarpmaması için özel bir yol bulunmalıdır (Seereeram ve Wen 1995). Gereğinden ve/veya hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülâtörler bu özel yolu takip edebilirler (Schilling ve diğ. 1995). Hareket planlamasının (motion planning) amacı, bu özel yolu planlamaktır (Takahashi ve Schilling 1989). Manipülâtörün işlem elemanının takip edeceği yol önceden biliniyorsa, uygun eklem değişkenlerinin bulunmasına gereğinden çok eklemli çözümleme (redundancy resolution) adı verilir (Seereeram ve Wen 1995). Hareket planlama, alt seviye (low-level) ve üst seviye (high-level) planlama olarak ikiye ayrılır. Üst seviye planlama engellerden kaçınmayla ilgilenirken, bu çarpışmasız yol planlamasının ne kadar hızlı gerçekleştirileceği alt seviye planlamanın konusudur (Khatib 1985).

Hareket planlama algoritmalarının temelini oluşturan bazı meşhur yaklaşımlar; potansiyel alan (potential field), hücre ayrıştırma yaklaşımı (cell decomposition) ve yol haritasıdır (roadmap). Bunların yanı sıra, yol planlama algoritmaları Das ve diğ. (2016); geometrik yöntemden Latombe (1991) veya gereğinden çok eklemli çözümlenme ve yol planlamanın, eklem ve görev uzayı hareketini ilişkilendiren diferansiyel denklemlerin çözülmesi sayesinde işbirliği içinde kullanıldığı kinematik modelden faydalanırlar (Seereeram ve Wen 1995). Literatürdeki çeşitlilikten dolayı yol planlama algoritmalarını sistematik biçimde sınıflandırmak zor olsa da Conkur (2003), yol planlama yöntemleri; Jacobian temelli (Jacobian based), eğri temelli (curve based), geometrik ve yol takip (path tracking) olmak üzere kabaca dört gruba ayrılabilir (Tang ve diğ. 2020). Ancak bu grupların herhangi birine dahil olmayan çalışmalar da aşağıda bahsedildiği üzere literatürde mevcuttur.

Engellerden kaçınma amacıyla, uzunluğu sabit bir omurga eğrisi (backbone curve) elde edilebilir. Bu eğrinin, sürekli uzuvlu hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli bir manipülatörün şeklini alma kabiliyeti vardır. Ayrık uzuvlu bir manipülatörün konfigürasyonu bu eğrinin şekline mümkün olduğunca yakın olarak uydurulabilir. Ancak, manipülatörün gereğinden çok serbestlik derecesi düştükçe bu yöntemin performansı azalır. Yüksek eğrilik değerine sahip omurga eğrileri de yöntemi olumsuz etkiler (Chirikjian ve Burdick 1990). Sayısal potansiyel alanın kullanıldığı bir yöntem ise, gradyan inişinden (gradient descent) faydalanarak manipülatörün ayrık linklerini etrafındaki engellerle herhangi bir çarpışma yaşamadan yönlendirir. Bu algoritma; alanın, manipülatörün mafsallarında sanal tork oluşturmasını sağlar. Yöntem, karmaşık ters kinematik işlemlerine ihtiyaç duymaz, yerel minimumları ortadan kaldırır ve gerçek zamanlı çalışır. Ayrıca, performansı uzuv sayısından bağımsızdır; ancak eğer noktada takılıp kalma sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Herhangi bir uzuv üzerindeki kontrol noktalarının mümkün olduğunca yüksek olmasını gerektirdiğinden dolayı hesap yoğunluğu içerir (Graham ve Buckingham 1993). Potansiyel alan ve enerji prensibi iş birliği içinde kullanılarak da yılanlı robotların yol planlaması yapılabilir. Lagrange hareket denklemleri kullanılarak çarpışmasız yollar elde edilebilir. Manipülatörün her bir uzvu, yay ve sönümleyici olarak modellendiği için uzuvların uzunlukları değişkendir. Bu algoritma, herhangi bir uzvun diğer uzuvlarla çarpışmasını hesaba katmamaktadır

(McLean ve Cameron 1993). Uzuvarın sanal yay olarak modellendiği benzer başka bir çalışma daha literatürde mevcuttur (McLean ve Cameron 1997). Bir diğer yol planlama yöntemi, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün konfigürasyonunu kontrol edebilmek için serpenoid eğrisinden faydalanmıştır. Engellerin nerede olduklarının saptanması, ilgili eğriyi tanımlayan fonksiyonun katsayılarını değiştirerek gerçekleştirilir. Bu, oldukça zaman alıcı bir süreçtir; ancak sonrasında çarpışmasız yol planı gerçek zamanlı olarak elde edilir (Ma ve Konno 1997). Çalışma alanındaki engellerden, anahtarlama amaç fonksiyonu (switching objective function) kullanılarak kaçınılabilir. Manipülatörün serbest bölgedeki (free-space) hareketi, elastik model yöntemi kullanılarak planlanabilir (Liang ve Liu 1999). Omurga eğrisi ile genelleştirilmiş Voronoi Diyagramını (Generalized Voronoi Graph) birleştirip yol planlama için lider-takipçi yaklaşımını (follow-the-leader strategy) benimseyen bir yöntem de sunulmuştur. Manipülatörün temelden uzak en uç uzvunun izlediği yolu diğer tüm uzuvlar takip ederler. Uzunluğunun genişliğine oranı büyük olan, yani ince ve uzun uzuvlara sahip manipülatörler söz konusu olduğunda, bu uzuvların konfigürasyonunu eğriye uydurmak zorlaşır, dolayısıyla uzuvların engellere çarpma olasılığı artar (Choset ve Henning 1999). Sözde-ters hız kontrolü (pseudo-inverse velocity control) ve çekici kutuplar yaklaşımının (attractive poles concept) birlikte kullanılmasıyla Wunderlich (2004) veya sensör verilerinden faydalanarak da yol planlanabildiği gösterilmiştir (Reznik ve Lumelsky 1994). Engellerin B-yüzeyleri (B-surfaces) vasıtasıyla modellendiği bir yaklaşım da, yol planlamasında kullanılmıştır (Azariadis ve Aspragathos 2005). BFA (Backtrack-free) isimli bir yol planlama algoritması, manipülatörün her bir uzvunun yol planlamasını öklit uzayında ayrı ayrı yapar. Yöntemin hesap süresi uzuv sayısı ile doğrusal olarak artar. Algoritma, uzuvların birbirleriyle olan etkileşimlerini hesaba katmadığı için uzuvların birbirleriyle çarpışmalarının önüne geçilemez (Islam 2008, Islam ve diğ. 2008). Öklit uzayında, En Küçük Mesafe Tekniği (Minimum Distance Technique) kullanılarak, hem uzuvların kendi aralarındaki hem de uzuvlarla engeller arasındaki mesafeler hesaplanır. Bu uzaklık bilgilerinden yararlanılarak uzuvların birbirleriyle ve engellerle çarpışmaları önlenir (Burhanuddin ve diğ. 2013).

Her bir modülü Stewart platformundan oluşan yılanı bir robotun yol planlaması, manipülatörün konfigürasyonunun serpenoid eğrisine uydurulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Stewart platformu, pnömomatik silindirler kullanılarak tahrik



edilmiştir. Algoritma, nispeten düşük eğriliğe sahip olan yollarda verimli çalışmaktadır (Miao ve diğ. 2014). Değişken uzunluklu hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün yolu, alt yollara bölünmüştür. Her bir alt yol, yarım elipsin çevresiyle temsil edildikten sonra manipülatörün takip edeceği yolu bu temsili alt yollara benzetebilmek için gerekli olan uzuv sayısı hesaplanır ve eklem açıları ters kinematik yardımıyla bulunur (Jamali ve diğ. 2014). Üç boyutlu bir çevrede rastgele yerleştirilmiş engellerin arasında hareket eden hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli bir manipülatörün yol planlaması için parçacık sürü optimizasyonundan (particle swarm optimization) faydalanılan bir teknik yardımıyla, manipülatörün ters kinematiğine uygun eklem açıları araştırılıp bulunduktan sonra bir uygunluk fonksiyonu aracılığıyla uygun yol noktaları bulunur (Collins ve Shen 2016).

Her bir uzvu elektromanyetik enerjiyle tahrik edilen ayırık uzuvlu hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robotik kol da literatürde sunulmuştur. Her uzvu ya tam sağa ya da tam sola döndürülebilen robot, yol planlaması için lider-takipçi yaklaşımını benimsemiştir. Kinematik modeli, Denavit-Hartenberg parametrelerine dayanmaktadır. Uzuvarın iki boyutlu uzaydaki kararlı iki konumundan hangisinin seçiminin yöntemin yol takip performansını nasıl etkilediğinin ölçütü, en küçük kareler yöntemiyle elde edilmiş ve optimize edilmiş olup Tappe ve diğ. (2015), yöntem üç boyutlu uzayda da çalışacak hale getirilmiştir (Tappe ve diğ. 2017). Her bir ayırık modülü kablolarla tahrik edilen hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün yol planlamasında Tang ve diğ. (2017), serpantin eğrisi (serpentine curve) kullanılmıştır. Eğriyi tanımlayan fonksiyon verildiğinde, manipülatörün konfigürasyonu bu eğriye uydurulmuştur. Küçük eklem açıları, robotun manevra kabiliyetini olumsuz etkilemektedir (Tang ve diğ. 2018). Örnekleme-tabanlı (sampling-based) algoritmalar da yol planlamasında kullanılmaktadır (De Maeyer ve diğ. 2018). Ayırık uzuvlu serpantin robotik kolun yol planlaması, omurga eğrisi temelli lider-takipçi yaklaşımıyla geometrik olarak çözülmüştür (Xie ve diğ. 2019). Yol planı için spline fonksiyonu kullanılan bir diğer çalışmada, yol ayırık noktalara bölünmüştür. Geliştirilen algoritma, uzuv eklemlerinin konumlanması gereken yol noktalarını (path points) tahmin eder. Bu aşamada, sürekli yolun ayırıklaştırılmasından kaynaklanan herhangi bir hata interpolasyon algoritmasıyla telafi edilir (Tang ve diğ. 2020).

Yol planlamayla ilgili bugüne kadar yaptığımız çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün uzuvlarının ve engellerin, sırasıyla doğrular ve elipsler olarak modellendiği yol planlaması için geometrik bir yaklaşım sunulmuştur. Kontrol algoritması uzuvlar ve engeller arasında herhangi bir kesişim tespit ettiğinde, uzuvları elipslerin dışına doğru itmektedir. Yöntemin tanımlanan bir indekse göre keskin manevra kabiliyeti nispeten düşüktür (Conkur ve Buckingham 1997<sup>b</sup>); fakat ışın analizi (beam analysis) kullanılarak bu kabiliyet artırılmıştır (Conkur ve diğ. 2005). Planlanacak yol B-spline eğrileri ile yaklaşık olarak oluşturulabilir. Geliştirilen algoritma, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün uzuvlarını bu eğrilere teğet tutarak yolu takip ettirir (Conkur 2003). B-spline eğrileri analitik denklem içeriğinden kaynaklanan sınırlamalardan dolayı sürekli yol ayrıklaştırılmıştır. Bu yol, manipülatörün temelinden hedef noktaya kadar birbirine çok yakın noktalardan oluşmaktadır. Önerilen master uzuv konsepti yardımıyla, manipülatör bu yolu düzgünce takip eder (Conkur 2005).

Yolu takip etme veya manipülatörün uzuvlarını yola eşleştirme pek çok açıdan etkili bir araç olsa da, bu yöntemin doğasında büyük bir kısıtlama mevcuttur. Bu kısıtlama; uzuv boyu yolun eğriliğine kıyasla uzadıkça, manipülatörün yolu düzgün biçimde takip edememeye başlamasından kaynaklanır. Dolayısıyla, manevra yapacak oldukça fazla alan olmasına rağmen, manipülatör engeller arasında sıkışıp kalır. Tezin bu bölümü, Conkur ve diğ. (2005)'te bulunan ışın (beam) ve Conkur (2005)'teki noktalardan oluşan yol prensibinin birleşiminden faydalanarak bu soruna çözüm üretmektedir. Yöntem, gereğinden/hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlere çok keskin manevra kabiliyeti kazandırmaktadır. Yöntemin üstünlüğü, manevra alanını verimli biçimde kullanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Geometrik yaklaşım metodu basit, sağlam ve düşük hesap yoğunluklu; dolayısıyla hızlı ve güvenilir yapmaktadır. Sunulan yöntemin yol planlama kabiliyeti sadece önceki çalışmalarımızinkinden değil aynı zamanda literatürdeki tüm yöntemlerinkinden çok daha yüksektir. Kıyaslama için performans ölçütü, tezin ilerleyen bölümlerinde açıklanacaktır.

Bu bölümün geri kalanı şu şekilde özetlenebilir: Bölüm 2.2, global yolun nasıl elde edildiğini açıklığa kavuştururken, Bölüm 2.3'te yol planlama algoritması

detaylı bir biçimde açıklanmaktadır. Bölüm 2.4, yöntemin verimliliğini göstermesi açısından örnek bilgisayar simülasyonları içermektedir. Bölüm 2.5'te yöntemin keskin manevra kabiliyeti, performans ölçütüne göre ortaya çıkarılmış olup; yöntemin performansı literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Sonuçlar, Bölüm 2.6'da verilmiştir.

## 2.2 Global Yolun Elde Edilmesi ve Genel Kavramlar

Global yol elde edilirken çevrenin bilindiği ve statik olduğu varsayılmaktadır (Samadi ve Othman 2013). Dinamik engellerin var olduğu bir ortamdaki yolun güncellenmesi ise bu engellerin gelecekteki yörüngelerini, buldukları andaki mevcut davranışlarına bakıp tahmin ederek gerçekleştirilir (Van Den Berg ve diğ. 2006).

(2.1) numaralı eşitlikte görülen Laplas (Laplace) denklemi  $\phi(r)$  ile gösterilen bir potansiyel tanımlar. Bu potansiyel,  $r$  ile gösterilen skaler bir noktanın potansiyel alan değerini temsil eder. (2.1) numaralı eşitlik, ızgaraya (grid) bölünmüş sürekli ve kapalı uzay üzerindedir. Engellerin sınırları ve hedef nokta bu uzayın sınırlarını belirler. Laplas denklemi; eş aralıklı, birbiriyle bağlı ızgaralara bölünmüş iki boyutlu uzaydaki Dirichlet sınır şartları altında, (2.2) numaralı eşitlikte görülen kısmi fark denklemi (partial difference equation) ile temsil edilebilir. Bu denklemde görülen  $i$  ve  $j$ , sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultularındaki ızgara noktalarını ifade etmektedir.

$$\nabla_2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

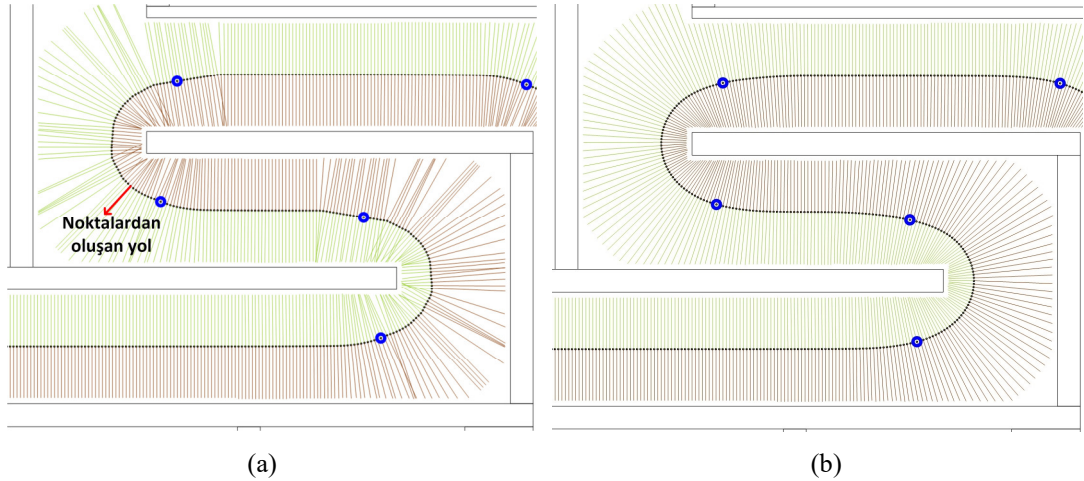
Denklem (2.2) vasıtasıyla ızgara üzerine iterasyon işlemi uygulanır. Hedef noktaya, sınır noktalarına ve ızgara üzerindeki diğer noktalara sırasıyla  $-2^{126}$ , sıfır ve bir verildikten sonra, iterasyon vasıtasıyla ızgara üzerindeki tüm alan değerleri elde edilir. Alan üzerindeki herhangi bir noktanın değeri doğrusal interpolasyonla elde edilir.

$$\phi_{(i,j)} = \frac{(\phi_{(i+1,j)} + \phi_{(i-1,j)} + \phi_{(i,j+1)} + \phi_{(i,j-1)})}{4} \quad (2.2)$$

Denklem (2.3), en büyük inişin (largest descent) doğrultusunu verir. Böylece, nokta robotun engellerden kaçınarak hedefine ulaşması için gerekli olan noktalardan oluşmuş yol elde edilir (Conkur ve diğ. 2005).

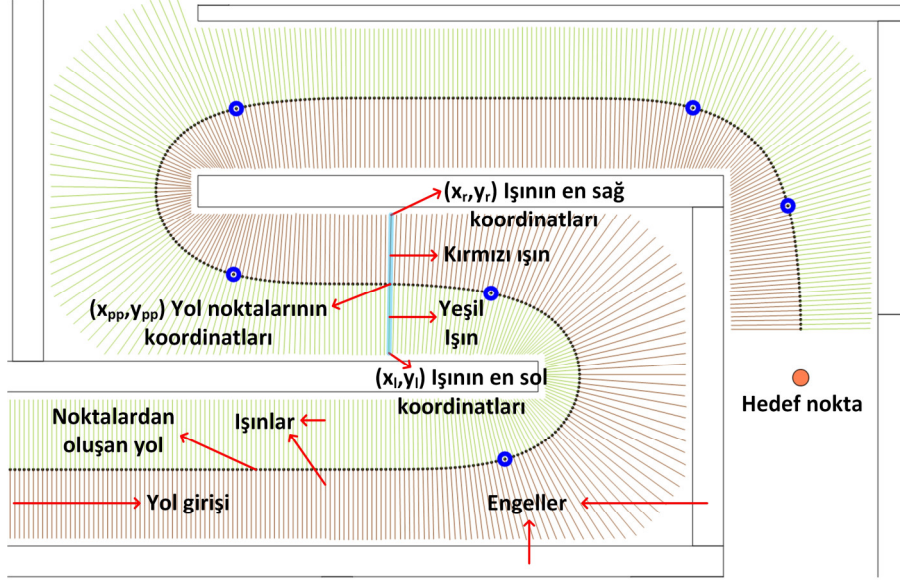
$$\alpha = a \tan 2\left(\frac{\phi(i,j-1) - \phi(i,j+1)}{\phi(i-1,j) - \phi(i+1,j)}\right) \quad (2.3)$$

Şu ana kadar açıklanmış ilkeler kullanılarak, yol noktaları sayısal olarak Şekil 2.1’de görüldüğü gibi elde edilir. Sayısal potansiyel alan kullanılmıştır; fakat onun yerine yolu elde etmek için benzer başka bir yöntem de kullanılabilir. Yol noktaları elde edildikten sonra, bu noktalar pencereleme (windowing) olarak adlandırılan, yolu mümkün olduğunca düzgün hale getiren sayısal başka bir işleme daha tabi tutulurlar. Bu işleme göre, yol noktalarının her koordinatı, kendisinden önceki ve sonraki yol noktalarının koordinatlarının ortalaması alınarak yeniden belirlenir. Bu önceki ve sonraki noktaların sayısı arttıkça yol sürekli bir eğriye yakınsar. Şekil 2.1-a ham yolu gösterirken, Şekil 2.1-b’de pencereleme işlemine tabi tutulan düzgünleştirilmiş yol görülmektedir.



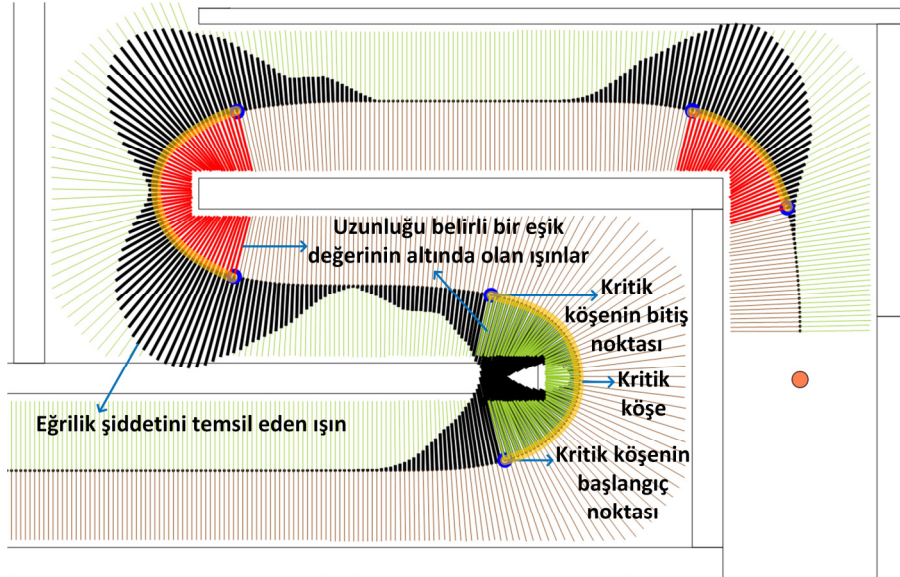
Şekil 2.1: Yol noktalarına pencereleme işlemi uygulanması. a. Ham yol, b. Düzenleştirilmiş yol

Tezin bu bölümünde ihtiyaç duyulacak genel kavramların bazıları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’te görülmektedir. Işınlar Conkur ve diğ. (2005), her yol noktasından geçen hayali teğete dik doğrulardır. Hedef noktasına ilerlerken noktaların sağ ve solunda kalan ışınlar sırasıyla kırmızı ve yeşil ışın olarak adlandırılmıştır.



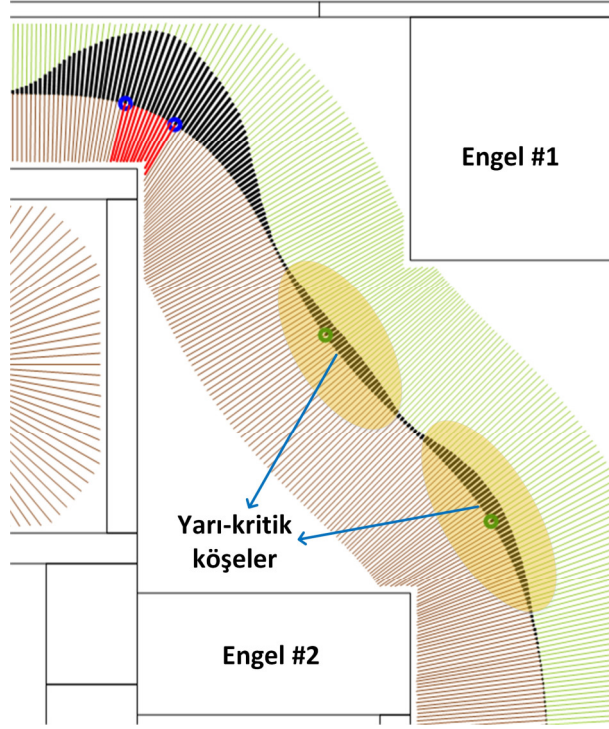
Şekil 2.2: Yol planlama algoritmasının genel kavramları.

Kritik köşelerin tespiti, yol planlama algoritmasının kendi kararlarını otomatik olarak verebilmesi açısından çok büyük önem arz etmektedir. Algoritma, her bir yol noktasının eğriliğini, kırmızı ve yeşil ışın uzunluğunu hesaplamaktadır. Eğer kırmızı ve yeşil ışın uzunluğu belirli bir eşik değerinin altındaysa ve eğrilikler belirli bir eşik şiddetinin üzerindeyse, bu şartlara uyan yol noktalarının Şekil 2.3'te görüldüğü gibi kritik köşe içinde olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.3: Kritik köşelerin tespiti.

Şekil 2.4'te görülen engel-1 ve engel-2'den kaynaklanan yarı-kritik köşeler de mevcuttur. Kritik ve yarı-kritik köşelerin ayırımı, ışın uzunluğu ve eğrilik şiddeti için kullanılan eşik değerleri belirlemektedir.



Şekil 2.4: Yarı-kritik köşelerin tespiti.

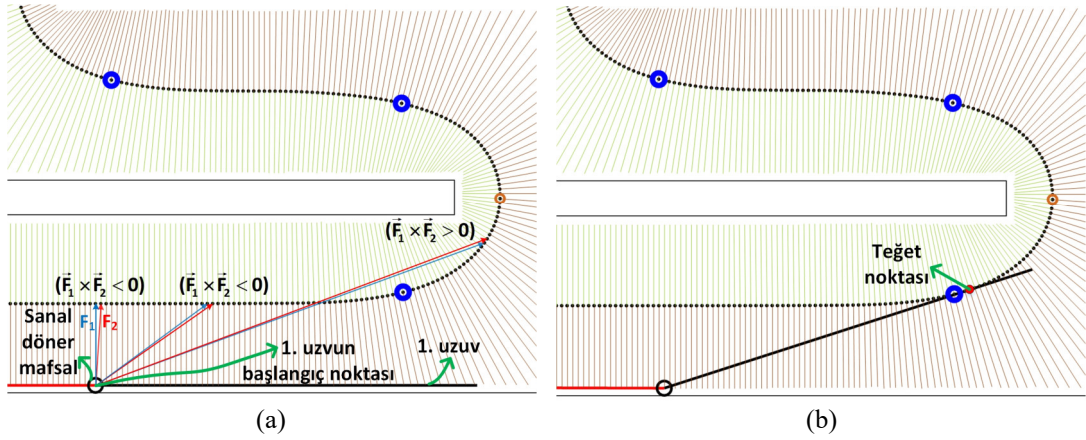
## 2.3 Yol Planlama Yöntemi

Bu kısımda, yol planlama yöntemi detaylı olarak açıklanacaktır.

### 2.3.1 Yol Boyunca Teğet Nokta Bulmak

İlgili uzvun başlangıç noktasından, bu uzvun başlangıç noktasına en yakın olan yol noktasına Şekil 2.5-a'da görüldüğü gibi bir  $\vec{F}_1$  vektörü çizilir. Benzer şekilde uzvun başlangıç noktasından bir önceki vektör için kullanılan yol noktasının hemen yanındaki yol noktasına ise bir  $\vec{F}_2$  vektörü çizildikten sonra bu iki vektör, vektörel olarak çarpılır. Aynı çarpım işlemine yol noktalarının indislerini birer artırarak devam edilir. Vektörel çarpımın sonucu işaret değiştirdiği zaman, işaretin

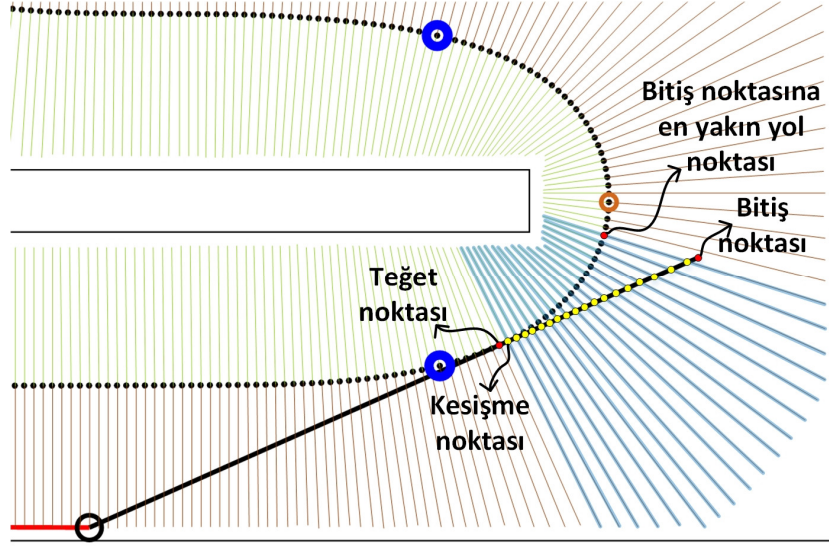
değişmesine neden olan yol noktası Şekil 2.5-b’de görüldüğü gibi teğet nokta olarak kabul edilir.



Şekil 2.5a-b: Yol boyunca teğet nokta bulma yöntemi.

### 2.3.2 Uzvun Bitiş Noktasına En Yakın Yol Noktasını Bulmak

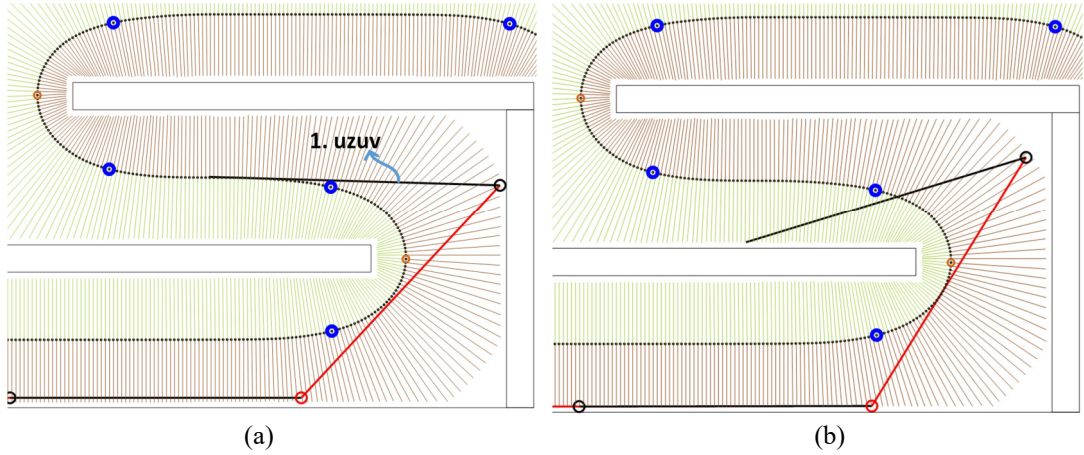
Uzvu yol noktasına teğet olduğu nokta ile uzvun bitiş noktası arasındaki kısım, uzvun bitiş noktasına en yakın yol noktasını bulmak için kullanılmıştır. Uzuv ve ışınlar, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi kesişim noktalarına sahiptir. Teğet yol noktasına en yakın kesişim noktasından başlayarak, uzvun bitiş noktası ile kesişim noktaları arasındaki mesafeler hesaplanır. Bu mesafe belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde, mesafe hesap işlemi sonlandırılır ve bu hesap işleminin sona ermesine neden olan yol noktası, uzvun bitiş noktasına en yakın yol noktası olarak kabul edilir. Bu bilgi, özellikle, uzvun uç noktasının kritik ve/veya yarı-kritik köşelerde olup olmadığının anlaşılması amacıyla kullanılacaktır.



Şekil 2.6: Uzun bitiş noktasına en yakın yol noktasını bulma yöntemi.

### 2.3.3 Teğet Nokta Bulunmadığında En Yakın Kenar Koordinatını Bulmak

Teğet nokta bulunmadığında, algoritma uzvu boyu şartına uyan en yakın kenar koordinatını Şekil 2.7’de gösterildiği gibi bulur.

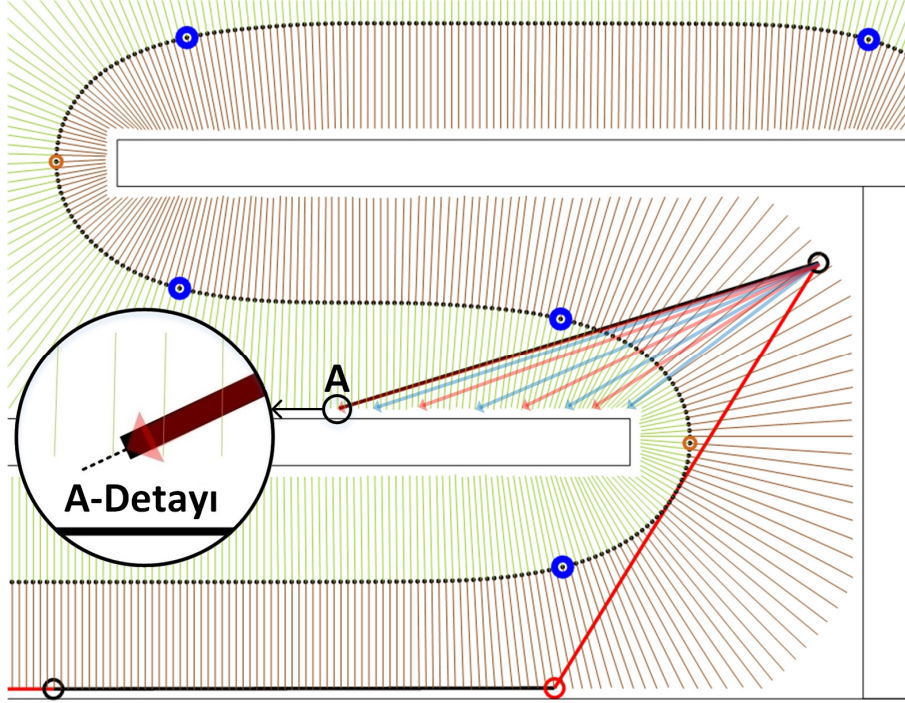


Şekil 2.7a-b: Teğet nokta bulunmadığında en yakın kenar koordinatını bulma yöntemi.

Uzvu başlangıç noktasının en yakın olduğu yol noktasından başlamak üzere, uzvu başlangıç noktasından o yol noktasına bağlı bulunan ışının en soluna Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bir vektör çizilir ve şiddeti hesaplanır. Bu şiddet uzvu boyuna eşit veya boyundan büyük değilse, yol noktasının indisi şart sağlanana kadar birer birer artırılır. Koşul sağlandığında, uzvu başlangıç noktasından, şartı sağlattıran ışının en



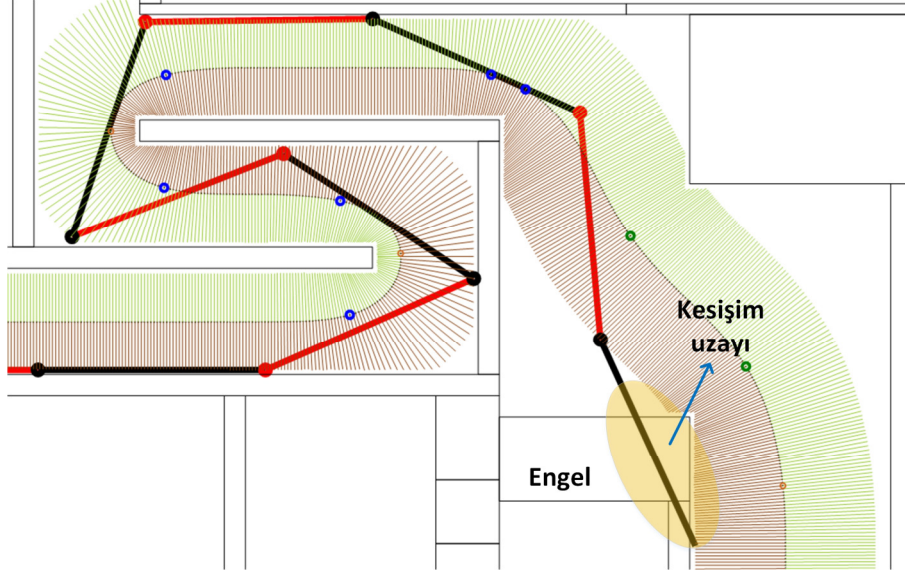
soluna birim vektör çizilir. Uzun bitiş noktasının koordinatları, uzun başlangıç noktasına birim vektörün uzun boyuyla çarpılmasından elde edilen vektörün eklenmesiyle elde edilir.



Şekil 2.8: Teğet nokta bulunmadığında en yakın kenar koordinatını bulma detayları.

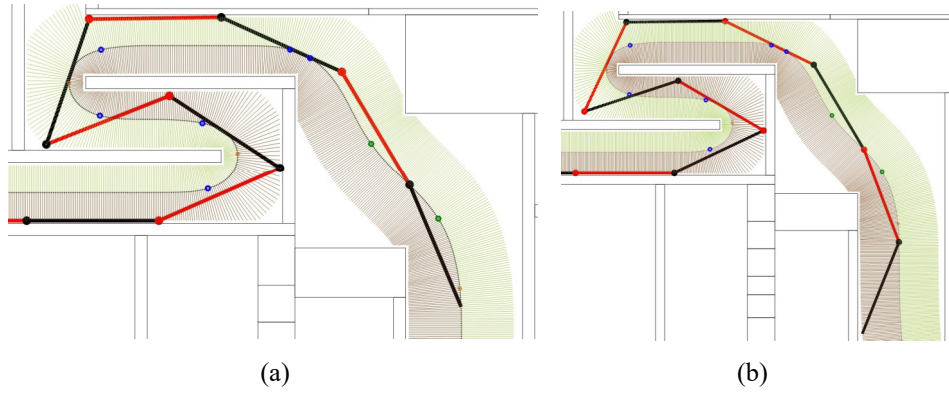
### 2.3.4 Teğet Nokta Bulunmadığında En Yakın Yol Noktası Koordinatını Bulmak

Yarı-kritik köşe bölgesinde, uzun yol üzerinde bulabileceği herhangi bir teğet noktası bulunmuyorsa; algoritma, uzun boy şartını sağlayan en yakın kenar koordinatlarını bulacağından, uzuv engellerle Şekil 2.9'da görüldüğü gibi kesişir.



Şekil 2.9: Uzuv ve engelin kesişmesi durumu.

Bu soruna çözüm olarak; algoritma, uzuv yarı-kritik köşe bölgesinden uzaklaşana kadar en yakın kenar koordinatlarını bulmak yerine Şekil 2.10'da gösterildiği gibi uzuv boy şartını sağlayan en yakın yol noktası koordinatını bulur.

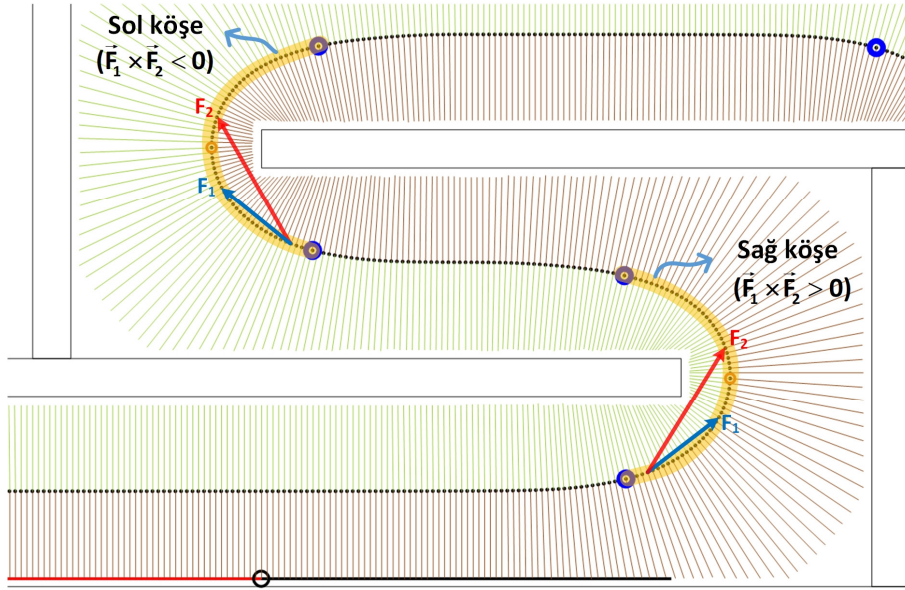


Şekil 2.10a-b: Uzuv ve engelin kesişmesine bulunan çözüm.

### 2.3.5 Köşe Kimliğinin Saptanması

Köşe içinde başlangıç ve bitiş noktası yol noktaları üzerinde olan iki vektör oluşturulur. Bu iki vektörün vektörel çarpımının sonucunun pozitif veya negatif olmasına göre bu köşe sırasıyla Şekil 2.11'de görüldüğü gibi sağ köşe veya sol köşe olarak adlandırılır. Uzunun teğet noktası bulmadığı durumlarda; algoritma, en yakın kenar koordinatını, uzun yaklaşığı köşenin kimliğine göre kararlaştırır. Yani, kritik

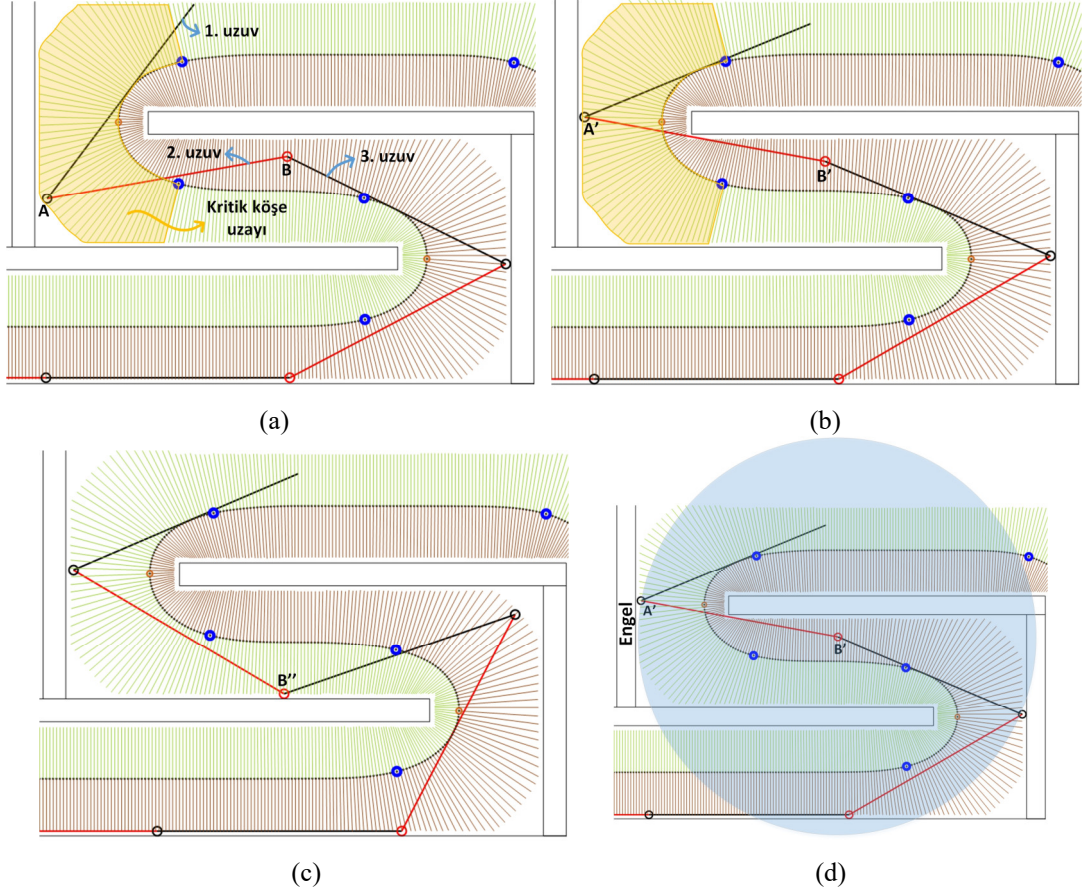
köşe, sağ veya sol köşe olarak adlandırılmışsa, uzuv köşeye yaklaşmadan önce ışının sırasıyla sağ veya sol uç taraflarında pozisyonunu alır.



Şekil 2.11: Sağ veya sol köşe tespiti.

### 2.3.6 Uzun Teğet Nokta Bulma Yetisinin Kasıtlı Olarak Engellenmesi

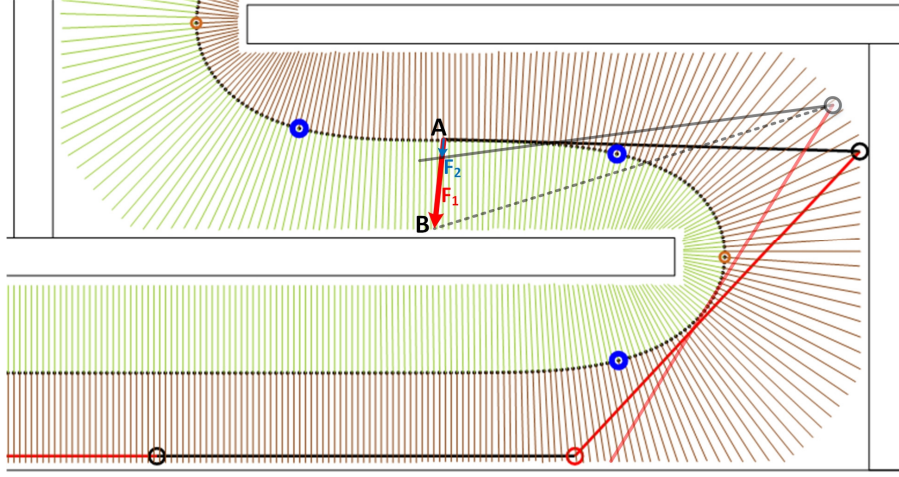
İkinci uzvun bitiş noktası (Şekil 2.12-a), kritik köşe içinde geometrik sınırlamalar nedeniyle belirli bir eşik değeri mesafesinin üstünde A noktasından A' noktasına zıpladığında (Şekil 2.12-b), üçüncü uzvun teğet nokta bulma yetisi, ikinci uzvun teğet noktası bulana kadar kasıtlı olarak felce uğrattılır. Aksi hâlde, ikinci uzvun engelle çarpışacaktır. Bu yüzden, üçüncü uzvun bitiş noktası, B' noktasından B'' noktasına taşınır (Şekil 2.12-c). B'' noktası, teğet nokta bulunmadığında en yakın kenar koordinatıdır. A noktasından A' noktasına zıplama sırasında, ikinci uzvun bitiş noktası engelle çarpışmaz. Bu durum, merkezi B' noktası ve yarıçapı ikinci uzvun boyu olan bir dairenin Şekil 2.12-d'de çizilmesiyle ispatlanmıştır. Bunun yanı sıra, eğer birinci uzvun zaten bir teğet noktası bulmuşsa, ikinci uzvun teğet nokta bulma yetisi de kasıtlı olarak engellenmektedir.



Şekil 2.12a-d: Uzun teğet nokta bulma yetisinin kasıtlı olarak engellenmesi.

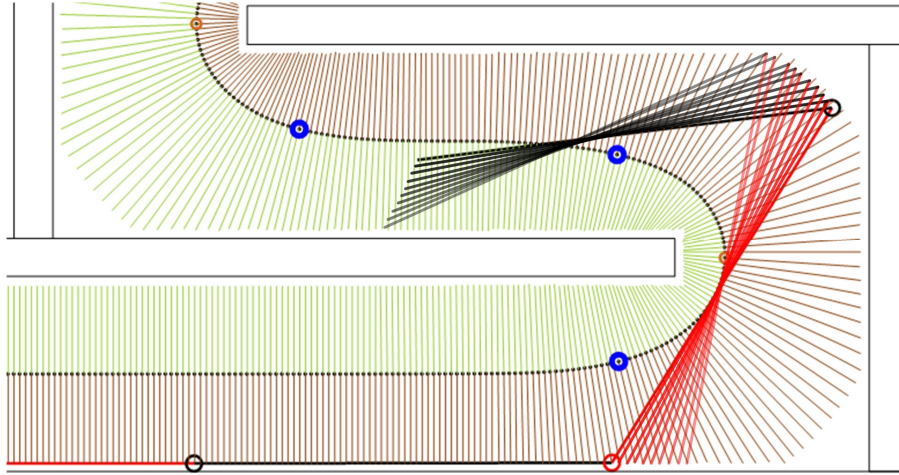
### 2.3.7 Uzun Ani Zıplamalarının Yumuşatılması

Uzun teğet noktalardan en yakın sağ veya sol kenar koordinatlarına zıplamasının, manipülâtörün hareketinin sürekliliği açısından olabildiğince yumuşatılması gerekmektedir. Birinci uzvun bitiş noktası, yumuşatma algoritması olmadan daha önce de bahsedildiği gibi Şekil 2.13'te görülen A noktasından B noktasına ani sıçramalar gerçekleştirmekteydi. Hareketin yumuşatılması için öncelikle, başlangıç ve bitiş noktaları sırasıyla A ve B noktaları olan bir  $\vec{F}_1$  vektörü oluşturulur.  $\vec{F}_1$  vektörünün birim vektörü elde edildikten sonra A ve B noktaları arasındaki mesafe, istenilen yumuşatma derecesi kadar eşit parçalara bölünür. Bir parçanın uzunluğu  $\vec{F}_1$  vektörünün birim vektörü ile çarpılarak  $\vec{F}_2$  vektörü elde edilir. Birinci uzuv artık  $\vec{F}_2$  vektörünün bitiş noktasına teğet geçirilir.



Şekil 2.13: Ani sıçramaları yumuşatma yöntemi.

Aynı prensip birinci uzuv ilerledikçe, uzvun bitiş noktası Şekil 2.14'te görüldüğü gibi kenar koordinata erişene kadar devam ettirilir.

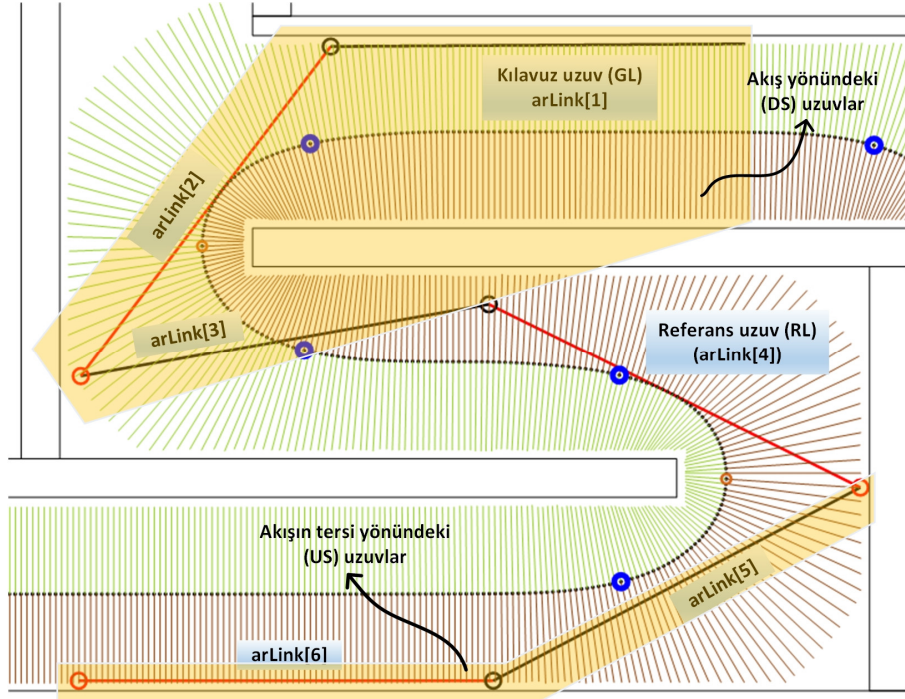


Şekil 2.14: Ani sıçramaları yumuşatma sürecinin tamamı.

### 2.3.8 Yol Planlama Algoritmasının Akış Şeması

Şekil 2.15'te altı uzuvlu yol planlama algoritmasının ekran görüntüsü görülmektedir. Şekil 2.15 üzerinde, Şekil 2.16'da görülen akış şemasının anlaşılabilmesi için gerekli bazı kısaltmalar mevcuttur. Akış şeması; her biri algoritmanın referans uzvu, akış yönündeki uzuvları ve akışın tersi yönündeki uzuvlarını ilgilendiren olmak üzere sırasıyla Bölüm A, B ve C olarak üç ana parçaya bölünmüştür. Manipülatorün, hedef noktaya ulaşacak yeterli sayıda uzva sahip

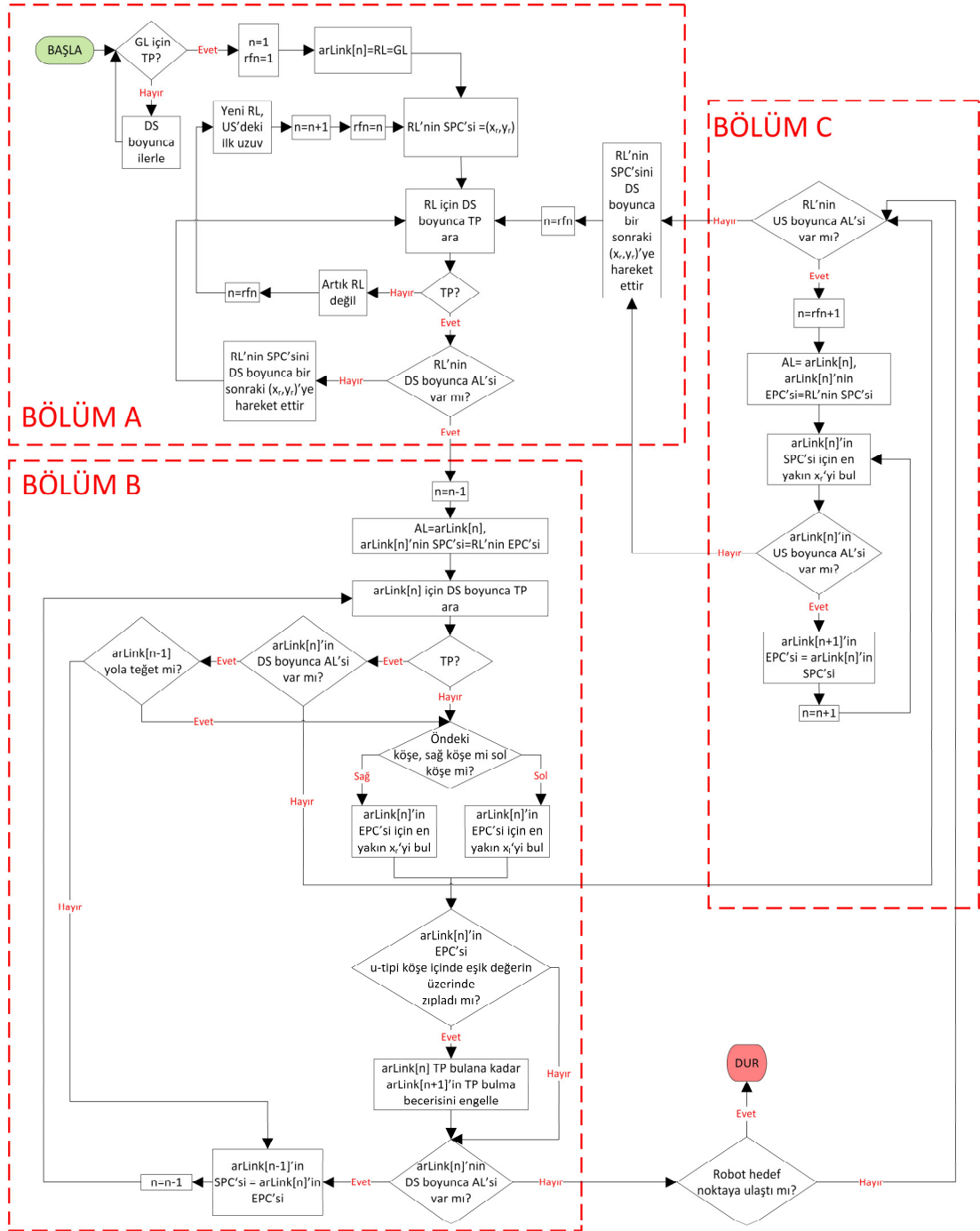
olduğu varsayılmıştır. Uzuvarın engellere çarpmaksızın elde edilen konfigürasyonları, her bir uzuv için bireysel olarak hesaplanmıştır. Algoritmada, sanal döner mafsalların boyutları hesaba katılmamıştır.



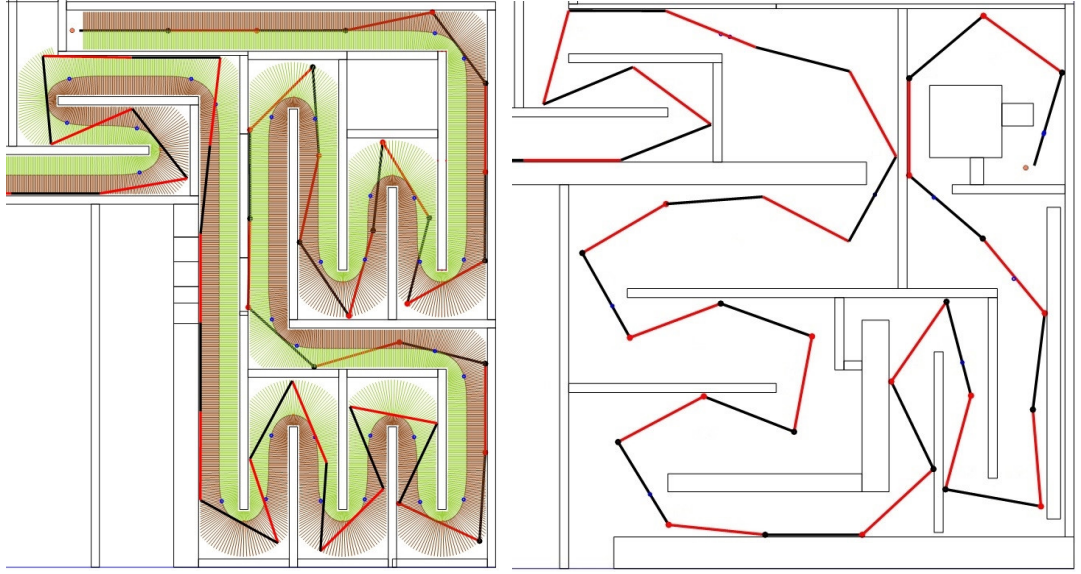
Şekil 2.15: Algoritma ile ilgili bazı kavramların tanıtılması.

## 2.4 Bilgisayar Simülasyonu Örnekleri

Bilgisayar üzerinde dört farklı çalışma alanında test edilen yöntem, ayrıık uzuvlara sahip olan manipülatöre Şekil 2.17'de görüldüğü üzere çok yüksek manevra kabiliyeti kazandırmaktadır. Şekil 2.17-a'da tüm manevra alanlarının, uzuvların boylarına oranla çok keskin olduğu en zorlu çevre senaryosu görülmektedir. Oysaki, Şekil 2.17-b, Şekil 2.17-c ve Şekil 2.17-d, çok keskin manevra alanlarının yanında yumuşak manevra bölgeleri de içermektedir. Bu yönüyle algoritmanın; sadece özel çevre senaryolarında çalışabildiği değil, genel çevre senaryoları için uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2.16'daki akış şemasının daha iyi anlaşılabilmesi açısından Şekil 2.17-a'da görülen ışıklar kasten çizdirilmiştir.

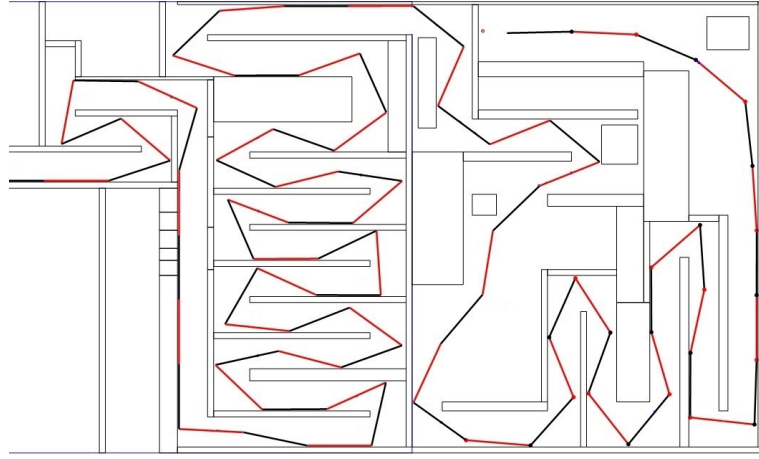


Şekil 2.16: Algoritmanın akış şeması.

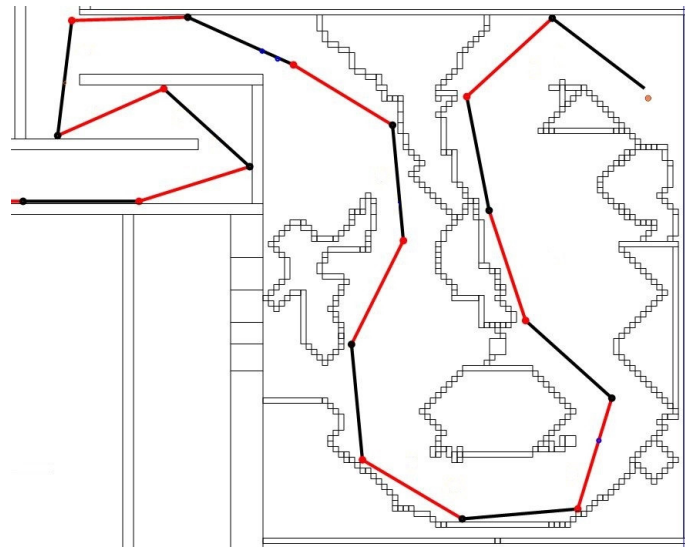


(a)

(b)



(c)



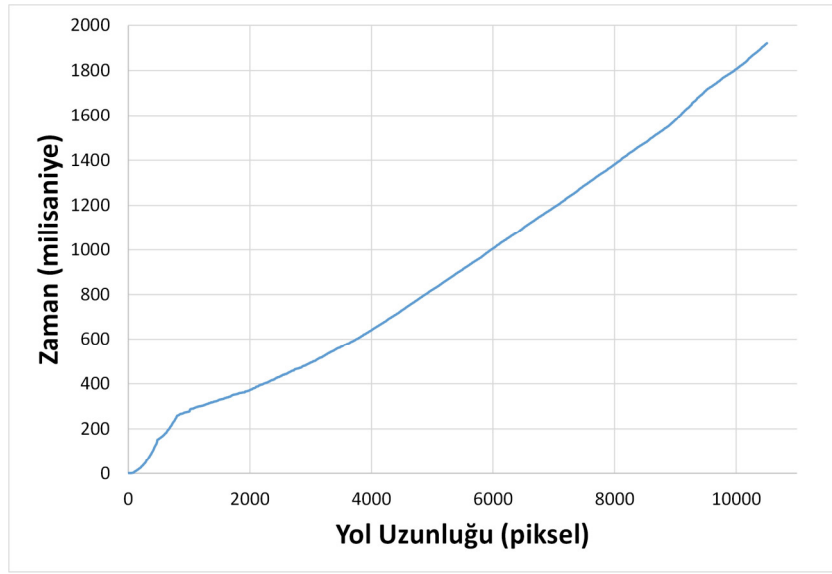
(d)

Şekil 2.17a-d: Yol planlama algoritmasının bilgisayar simülasyonu örnekleri.

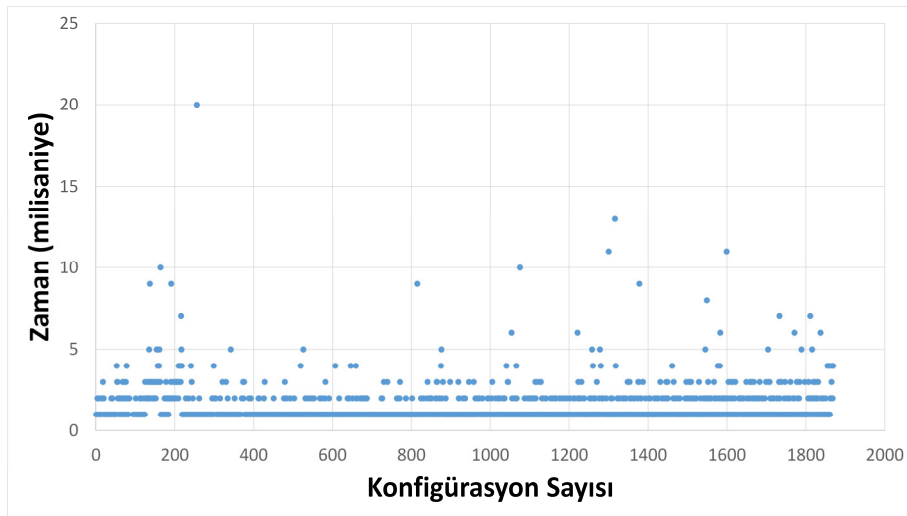


Manipulatörün Şekil 2.17-a'daki yolda kademe kademe nasıl ilerlediği EK A'daki Şekil A.1'de görülmektedir.

Şekil 2.18-a'daki grafik, Şekil 2.17-a'daki yolun uzunluğu ile manipulatörün bu yolu tamamlayarak hedef noktaya ulaşma süresi arasında doğrusala yakın bir ilişki kurar. Manipulatör bu 10505 piksel uzunluğundaki yolu tamamlayabilmek için toplam 1870 farklı konfigürasyona bürünür. Manipulatör hedefine 1921 milisaniyede ulaşır ki bu, manipulatörün her farklı konfigürasyonu için ortalama 1.03 milisaniye zaman harcadığı anlamına gelir. Her bir konfigürasyon için harcanan zaman ayrıntılı olarak Şekil 2.18-b'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.18a-b: Bilgisayar simülasyonu sonuçları.

Yazılım C Sharp'ta geliştirilmiş olup simülasyonlar Intel® Core™ i5-4210U CPU 2.40 GHz dizüstü bilgisayarda yürütülmüştür.

## 2.5 Bulgular ve Tartışma

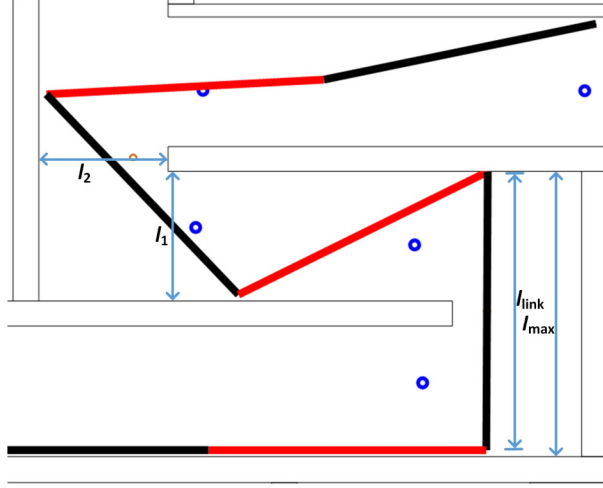
Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen algoritmanın yetenekleri ve algoritmayı, literatürdeki diğer yöntemlerden ayıran özellikler detaylı olarak tartışılacaktır.

### 2.5.1 Manevra Kabiliyeti

Hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robotik kollar çok fazla sayıda serbestlik derecesine sahip olduğundan dolayı, dar alanlarda ilerlerken manipülatörün konfigürasyon yönetimi on yıllardır önemli bir sorundur. Bu soruna, bu tezde orijinal bir çözüm geliştirilmiştir. Bu sayede, manipülatör, çok keskin manevra kabiliyetine sahip olmakla birlikte, fiziksel olarak mümkün olduğu müddetçe manevrasını en az sayıda uzuvla başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla manevra alanı ziyan edilmez, mümkün olduğunca verimli olarak kullanılır. Manevra kabiliyetini matematiksel olarak ifade edebilmek adına, Conkur ve diğ. (2005)'te sunulan ve Şekil 2.19'da da görülen performans göstergesi ortamı mevcuttur. Bu amaçla, (2.4) numaralı denklemde görülen  $I$  adında bir indeks tanımlanmıştır. Bu denklemde,  $l_{max}$  ve  $l_{uzuv}$  sırasıyla geometrik olarak mümkün olan maksimum uzuv boyunu ve her bir uzvun algoritmadaki boyunu temsil etmektedir. Algoritmada, her bir ayırık uzuv 430 ve  $l_{max}$  440 piksel uzunluğundadır. Dolayısıyla, tez kapsamında geliştirilen yol planlama algoritmasının manevra kabiliyeti için elde edilen indeks değeri 0.98 olarak bulunur. Algoritmanın, fiziksel olarak mümkün olduğu müddetçe, neredeyse hiçbir manevra alanını ziyan etmediği anlaşılmıştır.

$$I = l_{uzuv} / l_{max} \quad (2.4)$$

Keskin manevranın başarıyla gerçekleştirilmesi için Şekil 2.19'da görülen  $l_1$  ve  $l_2$  uzunluklarının her biri en az 200 piksel değerinde olmalıdır.



Şekil 2.19: Performans göstergesi ortamı.

### 2.5.2 Serbestlik Derecesi Sayısı

En az sayıda uzuvla manevra yapabilmesine rağmen, yöntemin performansı belirli bir uzuv sayısı ile sınırlı değildir. Aksine, algoritmanın manipülatörü sürme kabiliyeti ile uzuv sayısı arasında neredeyse doğrusal bir ilişki bulunmakta olup (bkz. Şekil 2.18-a) performans düşüklüğü de yaşanmamaktadır. Uzuv miktarı neredeyse bilgisayarın gücü ile sınırlıdır.

### 2.5.3 Karmaşıklık ve Yöntemin Geliştirilebilirliği

Geliştirilen yöntem basit ve güçlüdür; dolayısıyla hızlı ve güvenilirdir. Conkur ve Buckingham (1997<sup>b</sup>)’de sunulan yöntemde, uzuvlar sürekli olarak engeller tarafından itildiği için zaman kaybı yaşanmaktadır. Çok fazla uzvu idare etmenin zor olmasıyla birlikte bu yöntemlerde kararsız durumlarla da karşılaşılabilir. Bu tez kapsamında geliştirilen yöntemde, yolu ve ışınları elde ettikten sonra her bir uzvun hareketi, önündeki çok az seçenektan birinin seçilmesiyle gerçekleşir. Her bir uzvun çarpışmasız hareketi bireysel olarak hesaplanır.

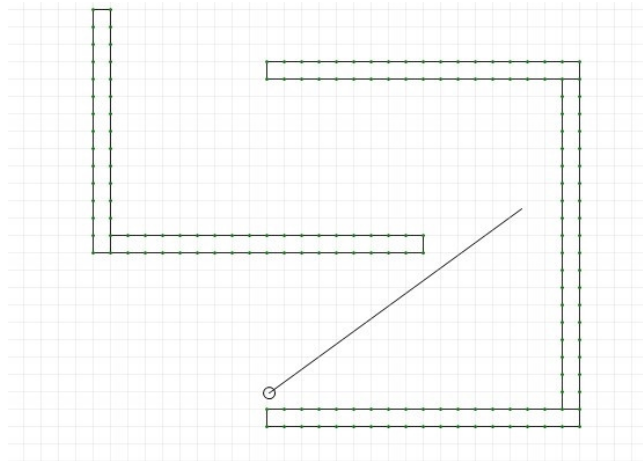
Ayrıca, yöntem kolaylıkla geliştirilebilir. Yani, yönteme yeni özellikler eklemek yöntemin mevcut özelliklerini en az sayıda etkiler. Yöntemin temel yapısı “if-else” blokları üzerine inşa edildiği için, yönteme yeni özellikler eklemek, her bir

uzvun, kendi hareketi için karar verirken önündeki seçenekleri çok az miktarda artırır. Örneğin, Şekil 2.17-a'da görüleceği üzere yolun bazı noktalarında, önünde çarpacak hiçbir engel olmamasına rağmen manipülatör yolun kenarlarına (ışınların en uç noktalarına) neredeyse sürtünerek ilerlemektedir. Yeni bir özellik eklenerek manipülatöre eğer kritik köşelere çok yaklaşmadıysa ve önünde engel yoksa yolun ortasından gitmesi gerektiği, sadece kritik köşelere yeterince yaklaştığında manevraya hazırlanmak için yol kenarlarına çekilmesi gerektiği talimatı verilebilir.

## 2.5.4 Geliştirilen Algoritmanın Literatürdeki Yöntemlerle Kıyaslanması

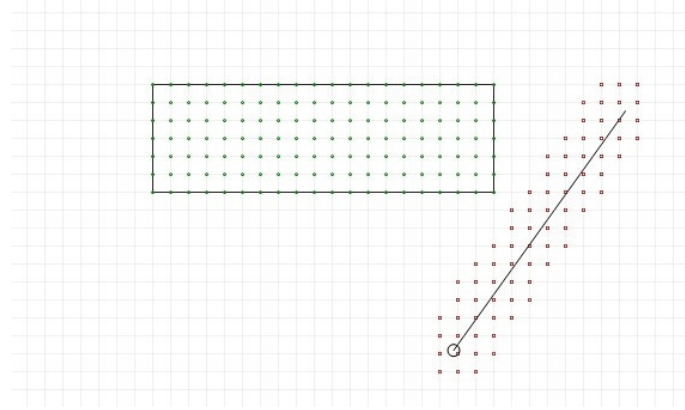
### 2.5.4.1 Uzun Uzun Boylu Manipülatörlere Sahip Olan Yöntemlerle Kıyaslama

Çonkur ve Tola (2008) tarafından yürütülmüş olan 104M260 numaralı Tübitak Kariyer Projesi'nde yılanı robotlar için dar alanlarda keskin manevra kabiliyetine sahip engellerden kaçınma algoritması geliştirilmiştir. Şekil 2.20'de grid noktalarıyla temsil edilen engellerle dolu çalışma alanında tek uzuvlu bir robot görülmektedir. Algoritmanın öncelikli göstermek istediği sadece bir uzvu, engellere çarpmayacak şekilde manevra yaptırarak ilerletmektir. Nihai amaç, birden çok uzuvlu robotu yılanı hareketlerle çarpışma olmadan engeller arasından ilerleterek hedefine ulaştırmaktır.



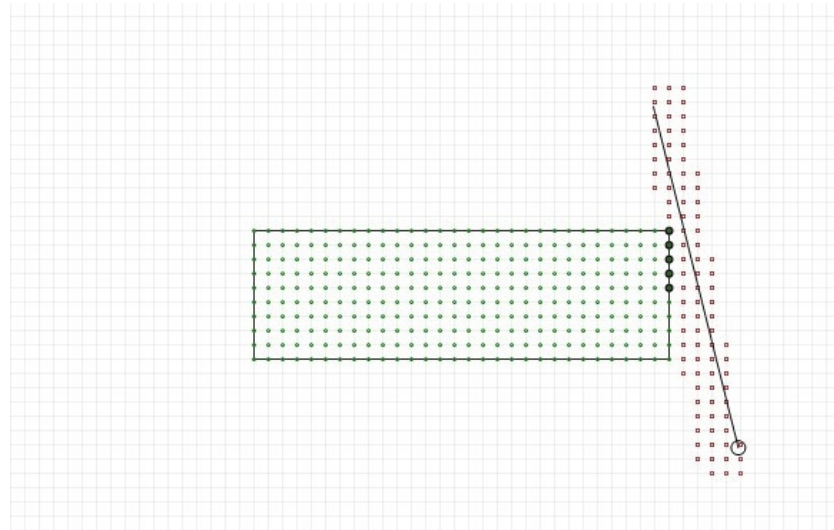
Şekil 2.20: Engellerle çevrili çalışma alanı üzerinde bulunan bir uzuvlu robot (Çonkur ve Tola 2008).

Şekil 2.21’de görüldüğü üzere, uzvun etrafında onu çevreleyen ve uzuvla birlikte hareket eden grid noktaları bulunmaktadır. Bu noktalar, uzvun sensör noktaları olarak nitelendirilebilir. Uzuv, hareketi sırasında engele çok yaklaştığında engelin grid noktaları uzvu saran sensör noktalarından oluşan emniyetli bölgenin sınırlarını ihlal edecek, bu sayede uzvun bu ihlalden haberi olacaktır. Şekil 2.21’de henüz böyle bir sınır ihlali gerçekleşmemiştir.



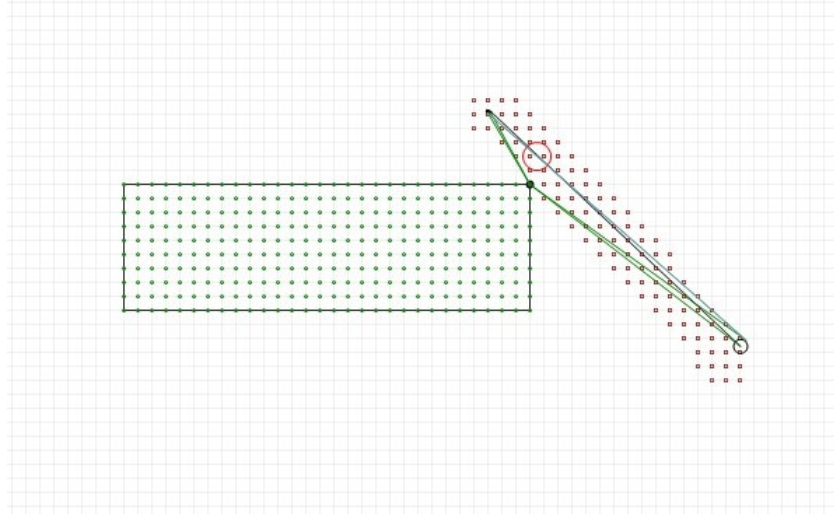
Şekil 2.21: Uzvun etrafındaki sensör grid noktaları (Çonkur ve Tola 2008).

Şekil 2.22’deki senaryoda ise yukarıda bahsedilen emniyetli bölge sınır ihlali koyu olarak çizilen beş engel noktasında gerçekleşmiştir. Bu sorun, uzvu engelden iterek uzaklaştırmak yoluyla çözülebilse de; çözümün kendisi uzvun titreşmesi gibi başka sorunlara yol açmaktadır.



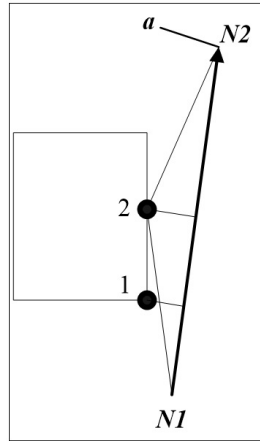
Şekil 2.22: Uzvun sensör grid noktalarının engel grid noktalarıyla çakışması (Çonkur ve Tola 2008).

Bu yüzden, aralarından uzva dik mesafesi en kısa olan engel noktası Şekil 2.23'te görüldüğü gibi dönme merkezi kabul edilip, uzvun bu nokta etrafında önce döndürülüp sonra varacağı noktaya ötelenmesi daha uygun bir çözüm olarak görülmüştür.



Şekil 2.23: Uzvun, kendine en yakın engel noktası etrafında döndürülmesi (Çonkur ve Tola 2008).

Ancak uzva dik mesafesi en yakın engel noktasının uzvun dönme merkezi olarak seçilmesi de başka bir soruna yol açmaktadır. Şekil 2.24'te görülen senaryoda uzvun uç noktasının  $N2$  noktasından  $a$  noktasına ulaşması istendiğinde, uzva en yakın dik mesafeyi sağlayan nokta 1 numaralı engel noktasıdır. Bu nokta dönme merkezi olarak tanımlanırsa, uzuv engelden uzaklaşmak yerine engele daha da çok yaklaşacaktır. En makul tercih, uzvun güvenli bölge sınırını ihlal eden engel noktaları arasında uzvun uç kısmına ( $N2$ ) en yakın engel noktası, yani 2 numaralı noktanın seçimi olacaktır.

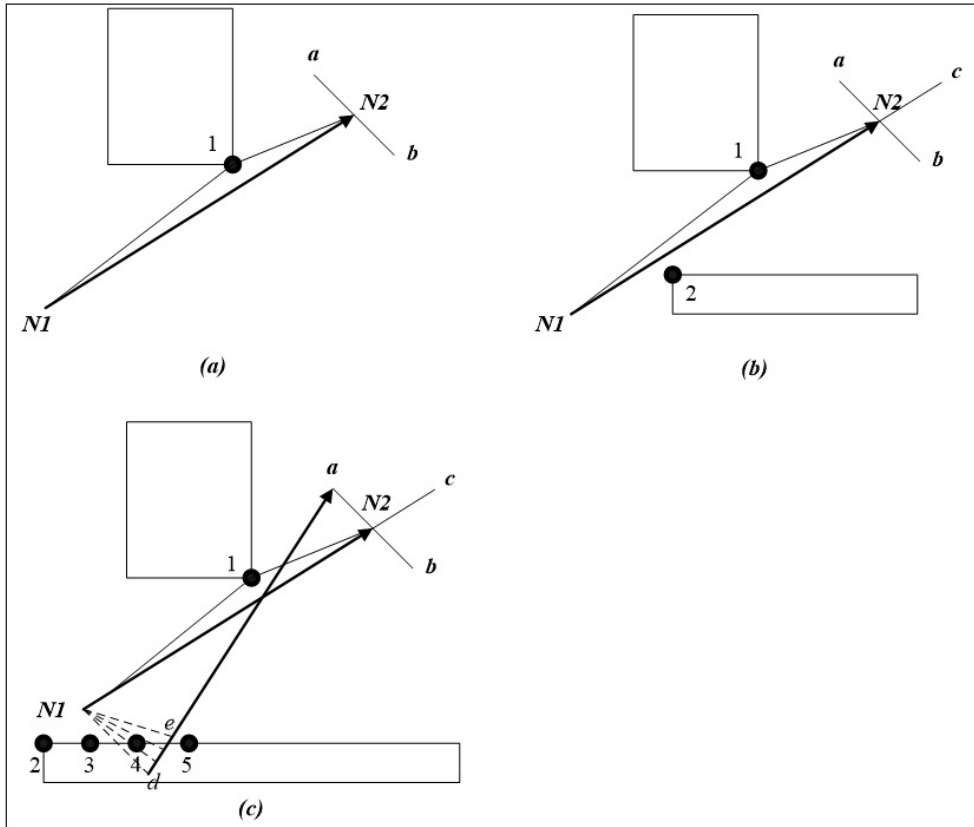


Şekil 2.24: Dönme merkezi noktasının tayini (Çonkur ve Tola 2008).

Bu yöntemin geçerliliğinin gözlemlenmesi için Şekil 2.25'te görülen farklı senaryolar oluşturulmuştur. Şekil 2.25-a'da uzuv  $a$  noktasına doğru hareket ettirilecekse 1 numaralı engel noktası etrafında döndürülecektir. Uzuv eğer  $b$  noktasına doğru ilerleyecekse ilgili noktanın bulunduğu bölgede herhangi bir çarpışma tehlikesi olmadığı için **serbest bölge modunda** çalıştırılacaktır.

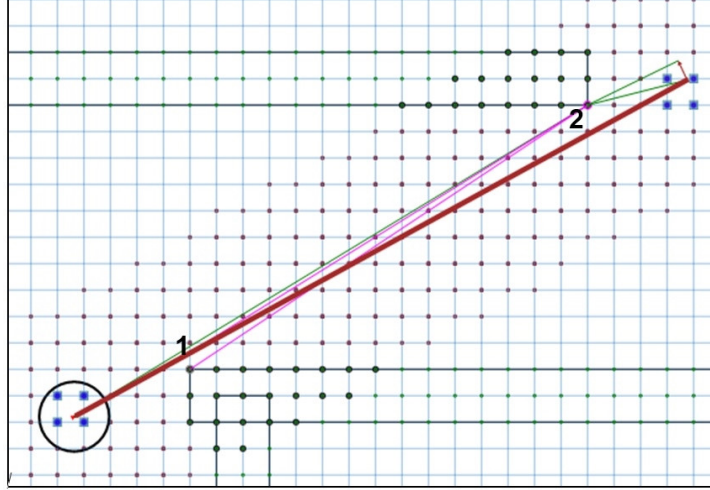
Şekil 2.25-b'de, uzuv  $a$  noktasına doğru hareket ettirilecekse, uzvun ileri-geri hareket etmek dışında başka bir seçeneği kalmamıştır. Aksi takdirde çarpışma kaçınılmazdır. Uzuv şayet  $b$  noktasına doğru ilerleyecekse en makul hareket uzvun 2 numaralı engel noktası etrafında döndürülmesi olacaktır.

Şekil 2.25-c'de en zor durum senaryosu görülmektedir. Uzuv  $a$  noktasına doğru hareket ettirilecekse uzuv 1 numaralı engel noktası etrafında döndürülecektir. Uzvun  $NI$  numaralı uç kısmının fiziksel olarak  $d$  noktasına gelmesinin,  $NI$ 'den  $d$ 'ye çizilen doğrulardan elde edilen veriler neticesinde imkânsız olduğu görüldüğü için; uzuv,  $NI$  noktası hareket sonunda  $e$  noktasına ulaşacak şekilde 1 noktası etrafında döndürülürken; 2, 3, 4 ve 5 noktalarını aşarak engele çarpmasını önlemek için ötelenmek zorunda bırakılacaktır.



Şekil 2.25a-c: Uzvun karşılaşılabileceği farklı senaryolar (Çonkur ve Tola 2008).

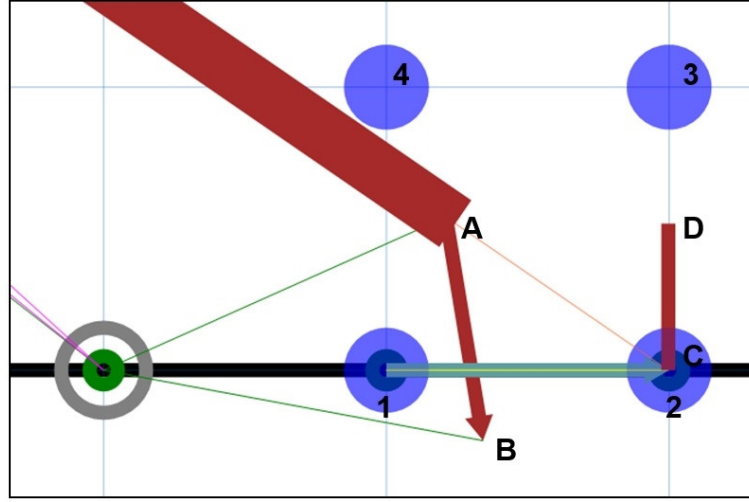
Şekil 2.25-b ve Şekil 2.25-c'deki durum senaryoları için birtakım iyileştirmeler yapılmıştır. Şekil 2.25-b'deki durum için uzvun, Şekil 2.26'da görülen 1 ve 2 numaralı iki engel noktasını dikkate alarak yeniden bir değerlendirme yapmasına imkân sağlanmıştır. Bu durum değerlendirmesi neticesinde uzva imkân dahilinde dönebileceği kadar dönme becerisi kazandırılmıştır.



Şekil 2.26: Engel noktaları arasındaki kayma durumunun iyileştirilmesi (Çonkur ve Tola 2008).

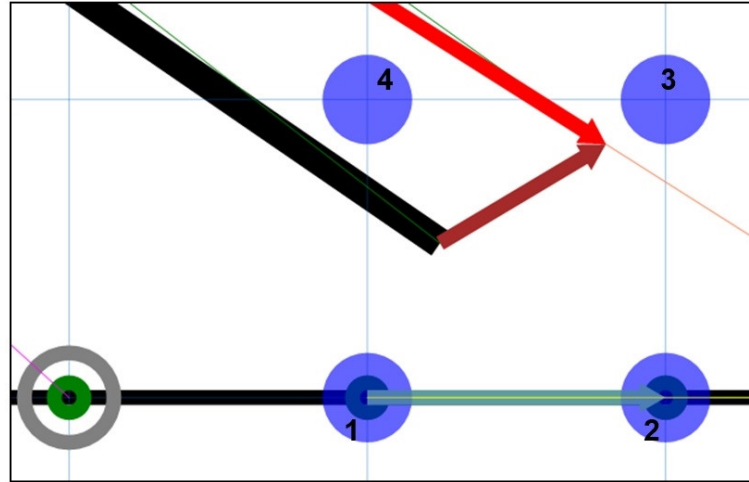
Şekil 2.25-c'deki durum için yeniden geliştirilen yöntem, engel noktalarının bir grid karesinin köşeleri üzerinde bulunup bulunmadığının kontrolü üzerine inşa edilmiştir. Şekil 2.27'de bir grid karesinin 1-4 numaralı köşeleri ile uzvun uç noktası görülmektedir. Uzvun uç noktasının A'dan B'ye gitmesi engelle çarpışmayla sonuçlanacağı için imkânsızdır. Algoritma vasıtasıyla grid köşelerinin engel noktası içerip içermediği anlaşılır ve uzvun uç noktasının iki engel noktasını birleştiren doğrunun içinden geçmesine izin verilmez. Engel noktalarını birleştiren doğruyla uzvun uç noktası arasındaki tolere edilebilecek maksimum dik mesafe **DC** doğru parçası ile temsil edilmektedir.





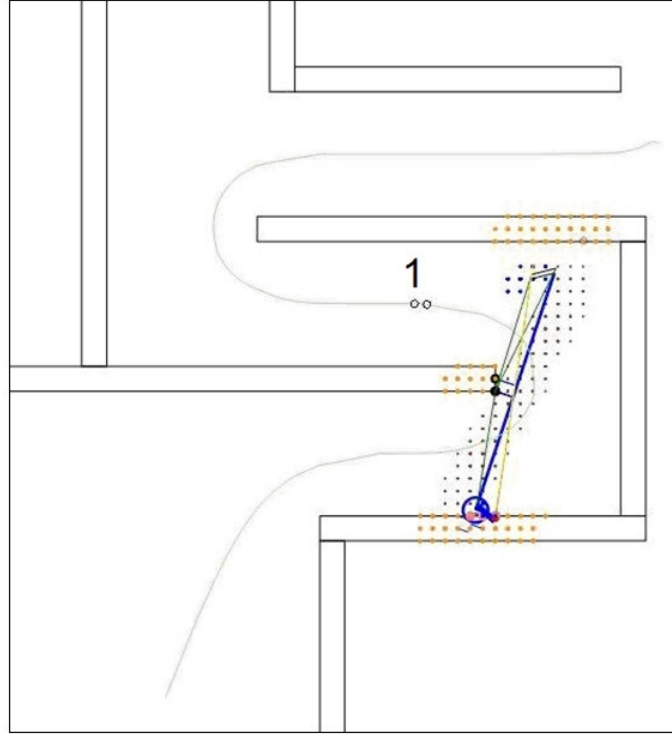
Şekil 2.27: Uzun uç noktasının hareketi (Çonkur ve Tola 2008).

Şekil 2.28’de uzun belirlenen kurallar neticesinde rotasının yeniden belirlenmesi gösterilmiştir.



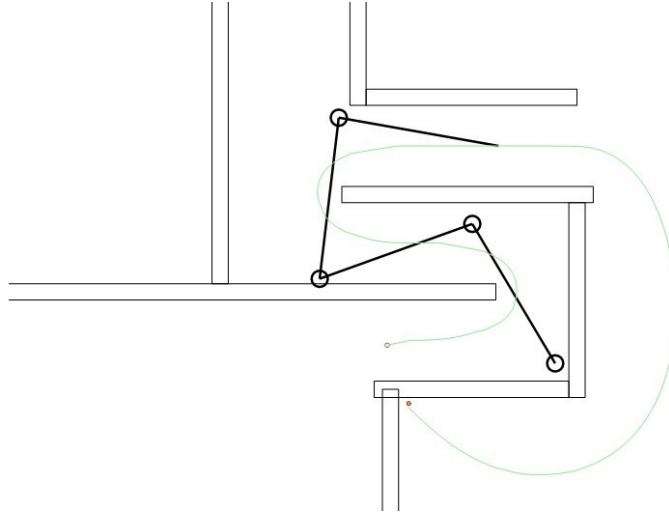
Şekil 2.28: Uzun uç noktasının rotasının değiştirilmesi (Çonkur ve Tola 2008).

Uzun uç noktası, Şekil 2.29’deki 1 numaralı, iki boyutlu potansiyel alan yardımıyla oluşturulan yolu takip etmektedir. Fiziksel olarak mümkün olduğu müddetçe, uzun uç noktası potansiyel alan tarafından belirlenen yol üzerinde ilerlemektedir. Fakat keskin manevra gereken durumlarda uzun uç noktasının fiziksel olarak yolu takip etmesi imkânsız hale gelmektedir. Dolayısıyla, uzun uç noktası bir süreliğine yoldan ayrılmak zorunda kalmaktadır.



Şekil 2.29: Uzun çalışma alanındaki hareketi (Çonkur ve Tola 2008).

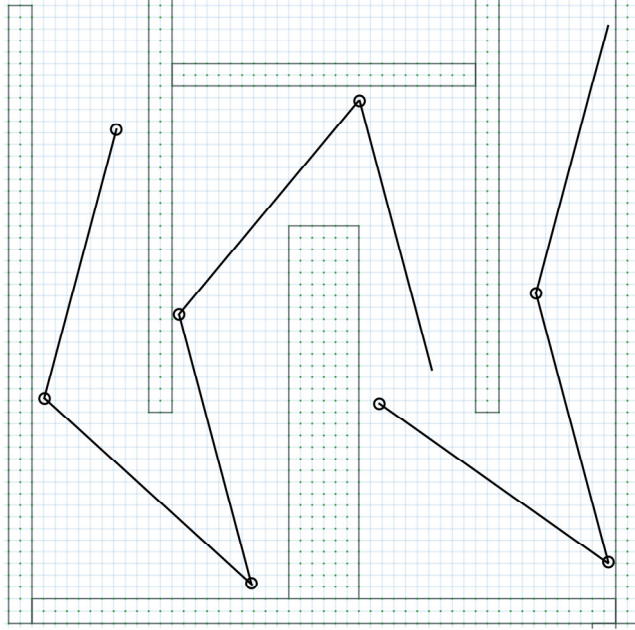
Yılsansı robotun tek uzvu için yukarıda söz edilen yöntemin Şekil 2.30'daki gibi birden çok uzuvlu bir yapıya uygulanması için, robotun sahip olduğu tüm uzuvların birbiriyle iletişim halinde olması gerekmektedir.



Şekil 2.30: Birden çok uzuvlu yılsansı robotun hareketi (Çonkur ve Tola 2008).

Çonkur ve Tola (2008)'de sunulan algoritmada bahsedilen iletişim kurulmaya çalışılmışsa da tam olarak başarılammıştır. Şekil 2.31'den de görüldüğü gibi, robotun bazı uzuvları birbirleriyle olan fiziksel bağlantılarını kaybetmektedir.

Sunulan yöntem gelişmeye açık olmakla birlikte bu soruna bir çözüm önermemektedir.



Şekil 2.31: Bazı uzuvların fiziksel bağlantılarını kaybetmesi.

Geliştirilen yöntem, uzvun herhangi bir engelle çarpışıp çarpışmadığını kontrol etmek için çalışma alanı üzerindeki her bir grid noktasını sürekli olarak kontrol etmek zorundadır. Bu haliyle çok fazla işlem yükü içermektedir. Bu tezde sunulan yol planlama algoritması ise engelleri dikkate alarak oluşturulan ışınların sadece iki uç koordinatını dikkate aldığı için işlem yükü çok hafiftir.

Ayrıca, Çonkur ve Tola (2008) tarafından geliştirilen metodun aksine, bu tezde sunulan yöntemde uzuvlar arası kopmalar söz konusu değildir.

Tez kapsamında geliştirilen algoritma, literatürde bulunan iki yayın olan Islam (2008), Tang ve diğ. (2018) ile de kıyaslanmıştır. Bu yayınların sırasıyla manevra kabiliyeti indeksleri 0.25 ve 0.24'tür. Keskin manevra bu yayınlarda gerçekleştirilememiştir; çünkü uzuv uzunlukları yolun eğriliğine göre nispeten kısa kalmaktadır.

Eğer farklı manipülatörler aynı görevi icra edeceklerse, yüksek indeks değerine sahip olan manipülatör tercih edilmelidir. Çünkü bu manipülatör aynı görevi daha az sayıda uzuvla, dolayısıyla daha az sayıda aktüatör ile gerçekleştirir.

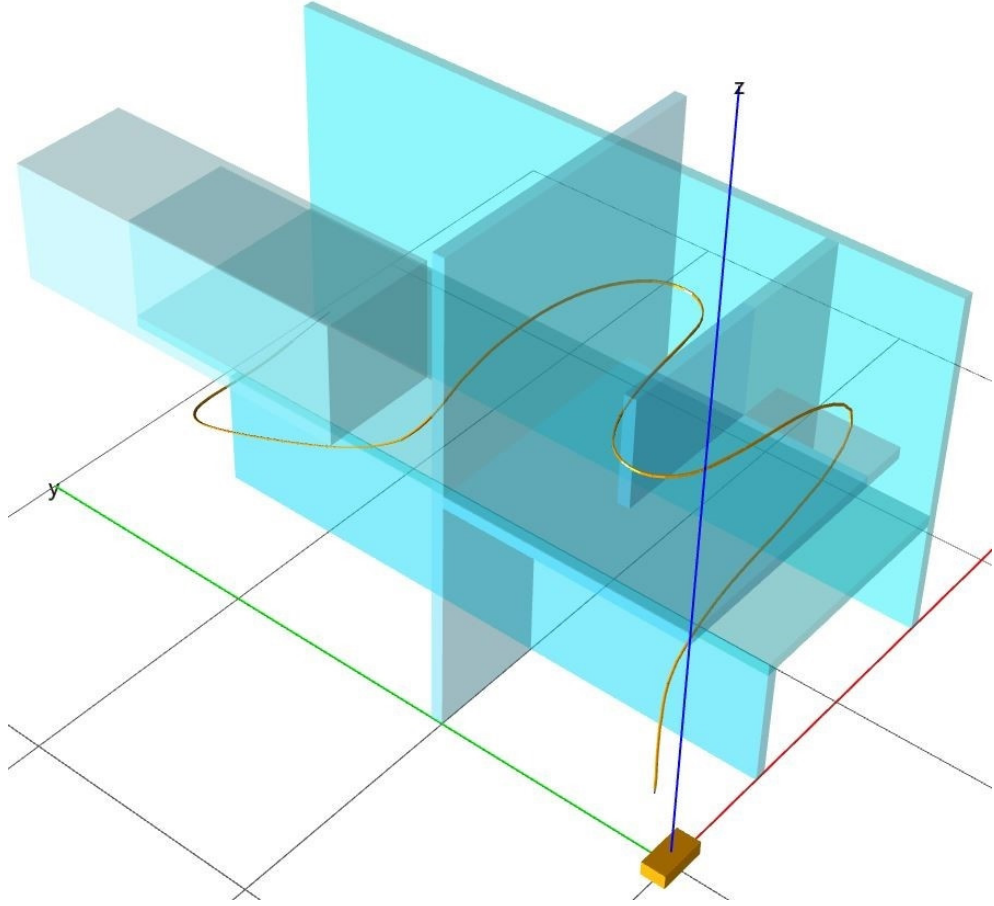
Bildiğimiz kadarıyla, bu tezde geliştirilen algoritmanın manevra kabiliyeti, literatürde bulunan diğer yöntemlerin manevra kabiliyetlerinin çok ötesindedir.

#### **2.5.4.2 Kısa Uzun Boylu Manipülörlere Sahip Olan Yöntemlerle Kıyaslama**

Kıyaslayabilme amacıyla üç boyutlu arayüz (C# WPF) kullanılarak basit bir yol takip algoritması geliştirilmiştir. Manipülör hedef noktaya ulaşırken uzuvlarının uç noktaları, yol noktaları üzerinde tutulmaktadır.

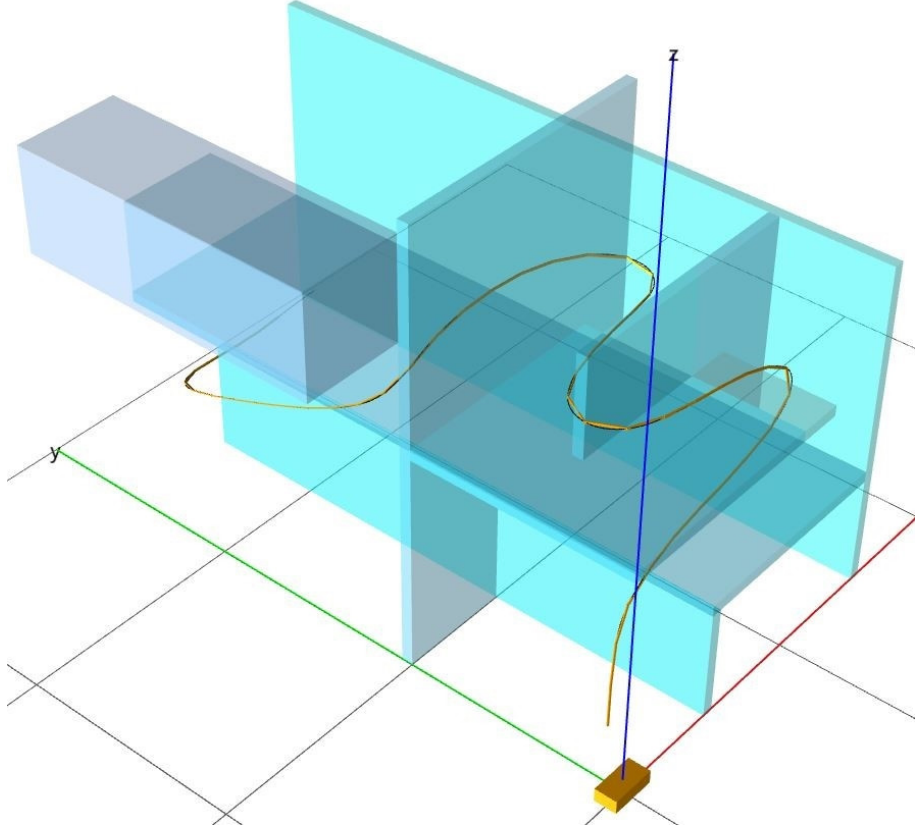
Bu tezde geliştirilen yöntem iki boyutlu ortamda çalışmaktadır. Ancak, üç boyutlu versiyonu C Sharp WPF ortamında geliştirilme aşamasındadır. Üç boyutlu ortamda şimdiye kadar, engeller ve potansiyel alan gibi çalışmalar tamamlanmış ve bu tezde sunulan algoritma üç boyutlu uzayda çalışılacak hale getirilmiştir.

Manipülörün hedef noktaya ulaşırken uzuvlarının uç noktaları, yol noktaları üzerinde tutularak; algoritma, çok kısa uzuvlu manipülörlerden çok uzun uzuvlu manipülörlere kadar çok geniş bir aralıkta çalışmaktadır. Üç boyutlu yazılım kullanılarak; kıyaslama, yolun eğriliğine göre çok kısa uzuvlara sahip algoritmalar ile yapılacaktır. Şekil 2.32, her bir uzvu 8 birim uzunluğunda olan 182 uzuvlu bir manipülörü göstermektedir. Uzun boyları yolun eğriliğine göre çok kısa kalmaktadır. Dolayısıyla yol tamamen uzuvlarla kaplanmış olup yolun kendisi görülememektedir.

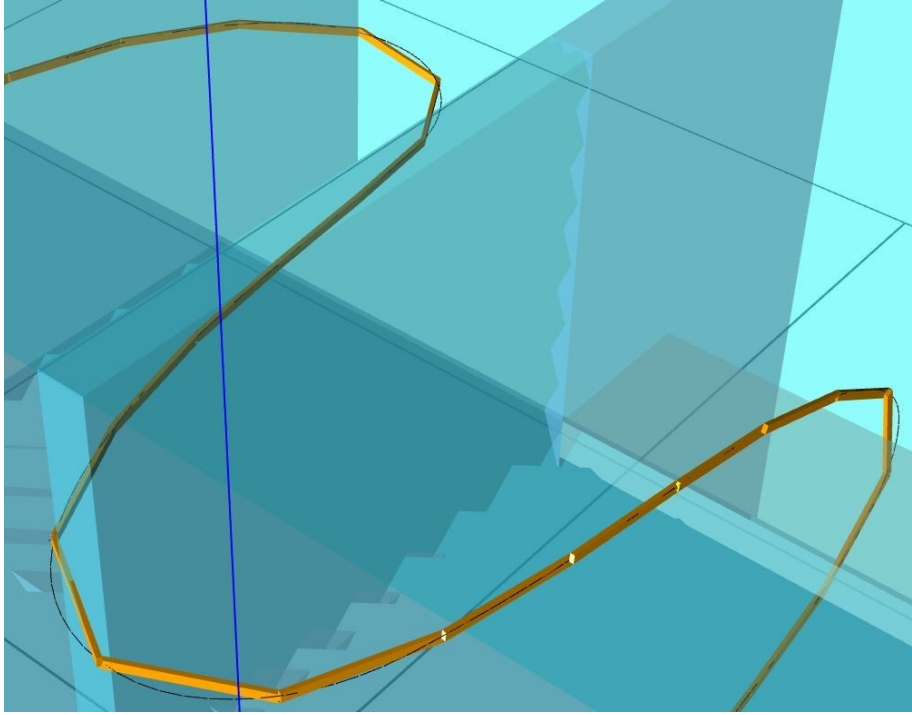


**Şekil 2.32:** Her biri 8 birim uzunluklu 182 uzvuva sahip üç boyutlu yol takibi.

Şekil 2.33, aynı yolu göstermektedir. Bu kez her bir uzvun boyu 30 birim olup toplam 49 uzuv mevcuttur. Uzuvarın eğriyle güzel bir şekilde eşleştirildiği Şekil 2.33-a'da görülmektedir. Hâlâ, uzuvarı yoldan ayırmak zor görünmektedir. Fakat yola Şekil 2.33-b'deki gibi daha yakından bakıldığında, yol ve uzuvar fark edilmekte olup artık manevra gerektiği görülmektedir.



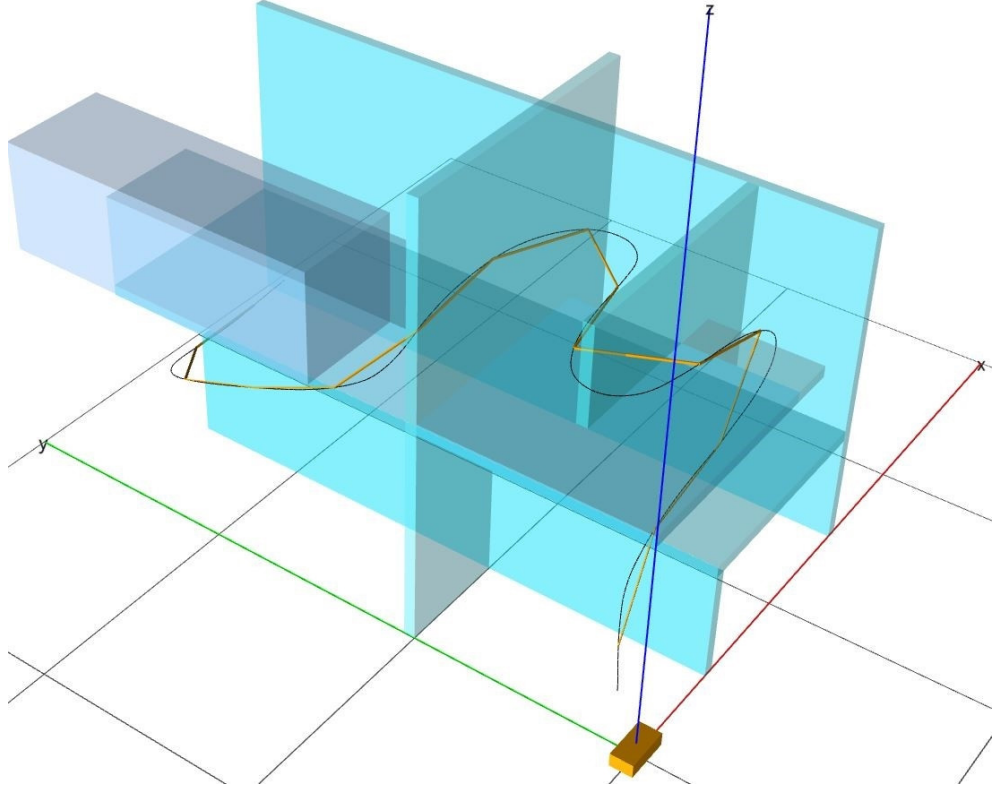
(a)



(b)

Şekil 2.33a-b: Her biri 30 birim uzunluklu 49 uzuva sahip üç boyutlu yol takibi.

Şekil 2.34'te yine aynı yol, bu kez her bir uzvun boyu 90 birim olan toplam 15 uzuv ile takip edilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, engellerle çarpışma kaçınılmazdır. Manipülatörün uzuvlarını yola eşleştiren farklı eşleştirme algoritmaları bu durumu biraz düzeltebilse bile, bu tezde tartışılan yol takibinin geçmişten günümüze süregelen ana problemine çözüm üretememektedirler.



Şekil 2.34: Her biri 90 birim uzunluklu 15 uzuva sahip üç boyutlu yol takibi.

### 2.5.4.3 Ticari Ürünler

Yılsansı robotların ticarileşmiş örnekleri bulunmaktadır. Bu örnekler arasında öne çıkan firmalar; OC Robotics, Hibot, Medrobotics, Hirose Fukushima Lab ACM ve Sintef'tir. Bu şirketler, birbirine çok benzemeyen farklı tipte yılsansı robot üretirler. Bunların arasında, OC Robotics, manevra kabiliyetini kıyaslayabilmemiz açısından en uygun ticari yılsansı robotu üreten firmadır. Bu tezde geliştirilen yol planlama algoritmasının manevra kabiliyeti, OC Robotics'in geliştirdiği yol planlama algoritmalarının manevra kabiliyetinin çok ötesindedir.

### 2.5.5 Algoritmanın Uygulanması

Algoritmanın iki ana özelliği bulunmaktadır. Birincisi, çok keskin manevra kabiliyetine sahip olmasıdır. İkincisi ise, manipülatörün uzuv sayısı, algoritmanın üzerinde uygulandığı bilgisayarın gücüyle sınırlıdır. Herhangi sayıda uzuvla kullanılabilirdiğinden dolayı algoritma oldukça kullanışlıdır. Çok sayıda uzuva sahip manipülatörün mekanik tasarımı kolay bir iş olmamasına rağmen; bu tezde geliştirilen yöntem, tasarımcıları bu tasarım zorluklarıyla yüzleşmeye teşvik etmektedir. Araştırmacıların önündeki zorluklardan biri kuşkusuz geniş eklem açısına sahip mafsal tasarlamak olacaktır. Çünkü en keskin manevra gerektiren ortam (bkz. Şekil 2.19), minimum 294.8 derecelik hareket aralığına sahip olan bir mafsalın hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Çok uzuvlu bir manipülatörü kontrol etme kabiliyetine sahip hâlihazırda bir yöntem olduğunu bilen tasarımcı, ilgili zorluklarla baş etmek için içsel motivasyonunu daha kolay inşa edebilecektir.

Algoritma mevcut haliyle, manipülatörü sadece hedef noktaya ulaştırmak üzerine inşa edilmiştir. İşlem elemanına bağlanacak aparatlar vasıtasıyla robota çeşitli işler yaptırılabilir. Ancak bu işleri nasıl yaptıracağı yeni bir araştırmanın konusu olacaktır. Örneğin hedef noktayı bir iş parçası ve işlem elemanını da lazer kesici takımı olarak düşünelim. Manipülatörün son üç uzvunun, hedef noktaya ulaşıldıktan sonra, iş parçası üzerinde işlem elemanının ilgili kesme koordinatlarına istenilen kesme açısıyla konumlandırılması için yeterli olduğunu varsayalım. O zaman manipülatörün diğer uzuvları, bu üç uzvu bir kızak gibi sadece ileri geri hareket ettirmek için kullanılabilir. Bu sayede son üç uzvun yol planlaması, ilgili kesme görevini yerine getirmek için diğer uzuvlardan bağımsız olarak değerlendirilebilir.

Gerçek zamanlı (real-time) uygulamalar, yumuşak (soft) ve sert (hard) gerçek zamanlı olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Zaman sınırlarının (deadlines) ihlali yumuşak gerçek zamanlı uygulamalarda tolere edilebilir. Ancak, sert gerçek zamanlı uygulamalar çok katı zaman sınırlarına tabi tutulurlar (Srinivasan ve diğ. 1998). Tezin bu bölümüne konu olan kategori, yumuşak gerçek zamanlı uygulamalardır. Şekil 2.17-a'da yer alan çevre baz alındığında, manipülatörün her yeni konfigürasyonunda kırk beş motor açısı belirlenir. Hiper-gereğinden çok serbestlik



dereceli bir manipülatörün bu çevrede alt seviye kontrolle yirmi saniyede hedefine ulaştığını varsayarsak, üst seviye kontrol (bu tezde geliştirilen algoritma) tüm operasyon için yaklaşık olarak iki saniyeye ihtiyaç duymaktadır. Yani, manipülatör ne zaman açılacağına ihtiyaç duysa algoritma teslim etmektedir. Bir diğer deyişle, algoritmanın performansı “*yeterince çabuk*”tur, dolayısıyla yumuşak gerçek zamanlıdır ve zaman açısından kritik uygulamalar için uygundur. Algoritma yol planlarken kararlarını farklı çevrelere göre farklı sayıda ve çeşitte “if-else” bloklarına göre verdiğinden, manipülatörün her yeni konfigürasyonu için üst yürütme zamanı sınırı koyulamamaktadır.

## 2.6 Sonuçlar

Tezin bu bölümünde, engellerle kaplı dar alanlar içinde hareket eden gereğinden/hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler için gerçek zamanlı çalışan basit ama güçlü bir yol planlama algoritması sunulmuştur. Yolunu geometrik olarak planlayan algoritmanın, rakiplerine kıyasla manevra alanını, performans gösterge çevresinden elde edilen indeks değerine ve üç boyutlu yol takip simülasyonlarına göre daha verimli kullandığı ispatlanmıştır. Hedef noktaya varmaya çalışan nokta robotlar için ayrıklaştırılmış yol, manipülatörün yönlendirilmesi için gerekli tüm bilgiyi içermektedir. Her bir uzvun engellerle çarpışmasız konfigürasyonu bireysel olarak hesaplanmıştır. Fiziksel olarak mümkün olduğu müddetçe; manevra alanının kullanımı, uzuvları engel duvarlarına neredeyse hafifçe sürtecek biçimde yönlendirerek azami dereceye çıkarılmıştır. Bu bağlamda, algoritmanın manevra kabiliyeti, literatürdeki diğer örneklerin manevra kabiliyetinin çok ötesindedir. Dolayısıyla, aynı yol için, belirli bir görevi yerine getirmek için ihtiyaç duyulan uzuv ve aktüatör (eyleyici) sayısı azaltılmıştır. Manevra alanından azami olarak faydalanmak, maliyeti ve hesap yoğunluğunu azaltmaktadır. En az sayıda uzuvla hareket etmesine rağmen; yöntemin performansı, uzuv sayısından bağımsız olup uygulanan bilgisayarın gücüyle sınırlıdır. Örnek bilgisayar simülasyonları yöntemin verimliliğini doğrulayarak, yöntemin rakiplerine kıyasla dikkate değer avantajını göz önüne sermektedir.

### 3. GEREĞİNDEN ÇOK SERBESTLİK DERECELİ ROBOTLARDA KULLANILMAK ÜZERE KARŞI DENGELİ İKİ SERBESTLİK DERECELİ DÜZLEMSEL ROBOTİK KOL TASARIMI VE AKTİF KONTROLÜ

#### 3.1 Giriş

Bir robotik kolun serbestlik derecesi, belirli koşullar altında “*gereğinden çok*” olarak adlandırılır (Shamir 1990). Gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler karmaşık işleri yerine getirme görevini üstlenebilirler (Ma 1996). Hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robotik bir kol, kendi ağırlığını da taşıyarak dar alanlardan ilerleyebilir. Dolayısıyla bu robotların ağırlık/güç oranı düşük olan tahrik sistemine sahip olmaları gerekmektedir (Hirose 1996). Robotik kol üzerindeki aktüatörler ve dişli kutuları genellikle pahalıya mâl olmaktadır. Daha ucuz tahrik mekanizmaları kullanmanın bir yolu da, yer çekiminden dolayı robotun mafsallarına binen torku dengelemekten geçmektedir (Kim ve Song 2013, Kim ve Song 2014). Fiyatın yanı sıra, enerjiyi verimli kullanan ve kompakt tahrik mekanizması tasarımları da yer çekimsel torku dengeleyerek gerçekleştirilebilir (van Dorsser ve diğ. 2007, Lauzier ve diğ. 2009). İşlem elemanı (end-effector) sehimlerinden (deflections) kaynaklanan konumlama doğruluğu (positioning accuracy) da, karşı-dengeli manipülatörlerde artış göstermektedir (Klimchik ve diğ. 2017).

Karşı-dengeleme; yer çekiminin mekanizmanın eklemlerinde meydana getirdiği torkun, uzuvların konfigürasyon değişiklikleri de göz önüne alınarak tamamen bertaraf edilmesidir (Gosselin 2006). Dengeleme yöntemleri; pasif ve aktif Azadi ve diğ. (2015) ve/veya sabit ve değişken yüklü dengeleme olarak kategorize edilebilir (Chu ve Kuo 2017). Sadece bazı konfigürasyonlarda pasif dengeleme yapabilen sabit taşıma yüklü manipülatörler, tüm konfigürasyonlarda dengelemenin sağlanabilmesi için yine de aktif olarak dengelenmeye ihtiyaç duyarlar (Yamamoto ve diğ. 2010). Değişken taşıma yüklü mekanizmaların dengelenmesi ise ek enerji

kullanılarak veya kullanılmadan da gerçekleştirilebilir (Chu ve Kuo 2017). Ek enerjiye ihtiyaç duymayan mekanizmalarda, taşıma yükü değişikliğine uyum sağlanırken sistemin potansiyel enerjisi sabit kalır. Mekanizmanın yeni taşıma yüküne adaptasyonu sürecindeki manuel düzenlemeler, dengelemenin tamamen otomatik olmasının önünde bariyer oluşturmaktadır (Barajas ve Paz 2016). Cuo ve Kuo (2017) bu soruna kendi kendini ayarlayan (self-regulator) mekanizma geliştirerek çözüm bulmuşlardır.

Nispeten yavaş hareket eden robotların mafsallarında yer çekiminin oluşturduğu torklar, hızlanma ve yavaşlanmadan kaynaklanan atalet kuvvetlerinin eklemlerde oluşturduğu torklardan büyüktür. Torkların dengelenmesi sırasında, mekanizmanın potansiyel enerjisi uzuvların konfigürasyon değişikliklerinden bağımsız olarak değişmeden kalır. Dengeleme genel olarak karşı ağırlıklar, yaylar, hidrolik prensip veya elektromanyetizmadan faydalanılarak ortaya konur (Arekelian 2016). Bazen bunların kombinasyonları Lacasse ve diğ. (2013)'te olduğu gibi kullanılabilir. İlgili yayında dengeleme için, karşı ağırlıklar ve hidrolik prensibi ortaklaşa kullanılmıştır. Karşı ağırlıklar ek atalet yaratmasın diye kol üzerine monte edilmemiştir. Kuvvetin kablo yerine hidrolik olarak iletimi karmaşık kuvvet iletim hattına olan gereksinimi ortadan kaldırdığı için daha iyi bir çözüm sunmuştur. Allison (2012), birbirine seri olarak bağlanmış iki uzvun her birine ayrı ayrı yerleştirilmiş karşı-dengeleme ağırlıkları kullanmıştır. Teorik olarak bir serbestlik dereceli kol, belirli koşullar altında sıfır serbest uzunluklu (zero free length) yay kullanılarak dengelenebilir; ancak gerçek hayatta sıfır serbest uzunluklu yay bulunmamaktadır (Cambera ve Feliu-Battle 2018). Bununla birlikte, bu yayın yarattığı etki, kablo ve kasnaklar kullanılarak elde edilebilir (Herder 2001). Paralelkenar mekanizmasının yay ile birlikte kullanımı, işlem elemanına bağlı olan taşıma yükünün yarattığı torku, uzvun konfigürasyon değişiminden etkilenmeksizin otomatik olarak dengeler (Hirose ve diğ. 2003). Uzuvları, kendine ait yaylar tarafından dengelenmiş paralelkenar mekanizmalarından oluşan robotik bir kol yer çekimsel torku dengeleyebilmek için uygundur. Ancak mekanizmanın çalışma alanı, paralelkenar mekanizmasının kendi uzuvlarının mekanik olarak birbiriyle çarpışmalarından dolayı sınırlıdır. Bu sorunu yok etmenin bir yolu, paralelkenar mekanizması etkisini oluşturacak bir mekanizma kullanmaktır (Morita ve diğ. 2003). Ulrich ve Kumar (1991); kablo, yay ve dairesel olmayan kasnak kullanarak yer

çekimsel torku dengeleyen iki serbestlik dereceli düzlemsel robotik bir kol geliştirmiştir. Düşük ivmeli hareketlerde manipülatör istendiği gibi çalışmaktadır; ancak işlem elemanının yüksek ivmeli hareketi, ilk uzvun temele bağlandığı eklemden reaksiyon yüküne yol açıp ilk uzvun istem dışı konfigürasyon değişikliğine yol açmaktadır. Hastaların rehabilitasyonlarında kullanılmak üzere tasarlanmış karşı-dengeli mekanik dış iskelet mekanizması (exoskeleton) da bulunmaktadır (Wu ve diğ. 2016). Başka bir dengeleme sistemi ise robotik insan kafasının boynuna uygulanmıştır (Cho ve Kim 2014).

Aktif dengeleme; yay sabiti, kol uzunluğu, yayın bağlandığı uzuvların konumu değiştirilerek veya bu faktörlerin kombinasyonu ile uygulanabilir (Chu ve Kuo 2017). Lian ve diğ. (2016), üç uzvunun her biri yay strokları ayarlanarak dengelenen 3-RPS paralel manipülatör tasarımı sunmuşlardır. Değişken taşıma yüklü dengeleme için karşı ağırlıklar kullanılacaksa, bu ağırlıklar bağlı oldukları kol üzerinde ötelenebilirler (Ciupitu 2015). Kawamura ve diğ. (2014), karşı ağırlık ötelemesini DC motor tahrikli vidalı mil ile gerçekleştirmiştir. Yamamoto ve diğ. (2010), sarmal yay yerine gazlı yay kullanmıştır. Taşıma yükü sabit olduğu halde, sunulan mekanizma yalnızca bazı konfigürasyonlarda pasif olarak dengelenebilmiştir. Bu yüzden, tam dengelemeyi elde edebilmek adına gazlı yayın bağlantı noktasını ayarlayabilmek için sisteme otomatik kontrol dahil etmişlerdir. Van Dorsser ve diğ. (2006), Van Dorsser ve diğ. (2007) nöromusküler hastalığa sahip olan hastalar için bir dengeleme mekanizması geliştirmişlerdir. Yay uzunluğunu değiştirmeden yayın bağlantı noktalarını hareket ettirerek değişken taşıma yükünü dengelemişlerdir. Barajas ve Paz (2016), bir serbestlik dereceli ve değişken taşıma yüküne sahip robot koluna bağlı yayın bir ucunu, yük hücrelerinden alınan verilere ve vidalı mile bağlı DC motorun dinamik modeline göre otomatik olarak kontrol etmişlerdir. Takesue ve diğ. (2011), tek uzuvlu robot kolunun dengelenmesi için ikisi yatay ve ikisi dikey olarak konumlandırılmış dört adet yay kullandıkları bir yöntem önermişlerdir. Değişken taşıma yüküne adaptasyon, dikey konumlu yayların uç noktalarının manuel olarak yer değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Mevcut yatay yaylarla 180° faz farklı ek iki yay daha eklenerek dengeleme işlemi 360° hareket aralığı için uygun hale getirilmiştir. Lauzier ve diğ. (2009), hidrolik iletim esasına göre çalışan dengeleme mekanizması geliştirip bu mekanizmayı hem hidrolik hem de pnömatik silindireler kullanarak test etmişlerdir. Hidrolik silindireli

olanlarda keçelerden kaynaklı sürtünmelerin sorun yarattığı, pnömatik silindirlielerin ise performansının daha iyi olduğu belirlenmiştir. Lacasse ve diğ. (2013), keçelerin sebep olduğu sürtünmeyi standart hidrolik silindirlerin yerine diyaframlı hidrolik silindir kullanarak azaltmıştır. Fakat diyaframlı silindirlerin kısa stroklu olmaları bir dezavantajdır. Chiang ve Chen (2017), birbirlerine seri olarak bağlanmış üç uzuvdan oluşan düzlemsel bir mekanizmanın taşıma yükü değişimini de hesaba katarak yayların yardımıyla başardıkları bir dengeleme yöntemi sunmuşlardır. Martini ve diğ. (2019), olası dengeleme çözümlerini arayan etkili bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde; yay katsayısı, kütle miktarı ve dengeleme ekipmanlarının (yay ve kütle) mekanizma üzerinde nereye konumlandırılacağı gibi parametrelerin uygulanabilir olanları belirlenmiştir. Bu sayede dengeleme elemanlarının mevcut mekanizmaya dahil edilme süreci kolaylaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, MSC Adams<sup>TM</sup> ortamında modellenen endüstriyel paletleme robotu üzerinde sınanarak algoritmanın etkinliği kanıtlanmıştır.

Ebert-Uphoff ve Johnson (2002), paralel manipülatörlerin statik olarak nasıl dengeleneceğini ana hatlarıyla belirtmişlerdir. Olası dengeleme hatalarının neler olabileceği üzerinde durarak uygulamada nelere dikkat edilmesi gerektiğinden bahsetmişlerdir. Carricato ve Gosselin (2009), platform ağırlığı, mekanizmayı ayakta tutan yer çekimi dengeli bacakların oluşturduğu sabit kuvvetler tarafından dengelenen Gough/Stewart tipi paralel manipülatör için bir dengeleme stratejisini raporlamışlardır. Martini (2018), Paralel Kinematik Makinelerinin (PKM) statik olarak dengelenmesini, bu makinelerin platformunu destekleyen ayakları sabit-kuvvet jeneratörü haline getirerek başarmıştır. Motor kuvvetlerinin tamamen dengelendiği, MSC Adams<sup>TM</sup> ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla gösterilmiştir.

Söz konusu birbirlerine seri olarak bağlanmış uzuvlardan oluşan hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin dengelemesi olduğunda, yer çekiminden dolayı her bir eklemin payına düşen tork değeri, uzuvların konfigürasyonundan bağımsız değildir. Her bir uzvu kendi yayına sahip olan paralelkenar mekanizmasından oluşan hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli bir manipülatör, uzuvların konfigürasyonuna olan bağımlılığı yok etmek için önerilmiştir. Bu manipülatörün üç boyutlu uzaydaki hareketi swivel mafsal tipiyle sağlanmıştır (Hirose 1996). Keller ve diğ. (2008), paralelkenar mekanizması ve

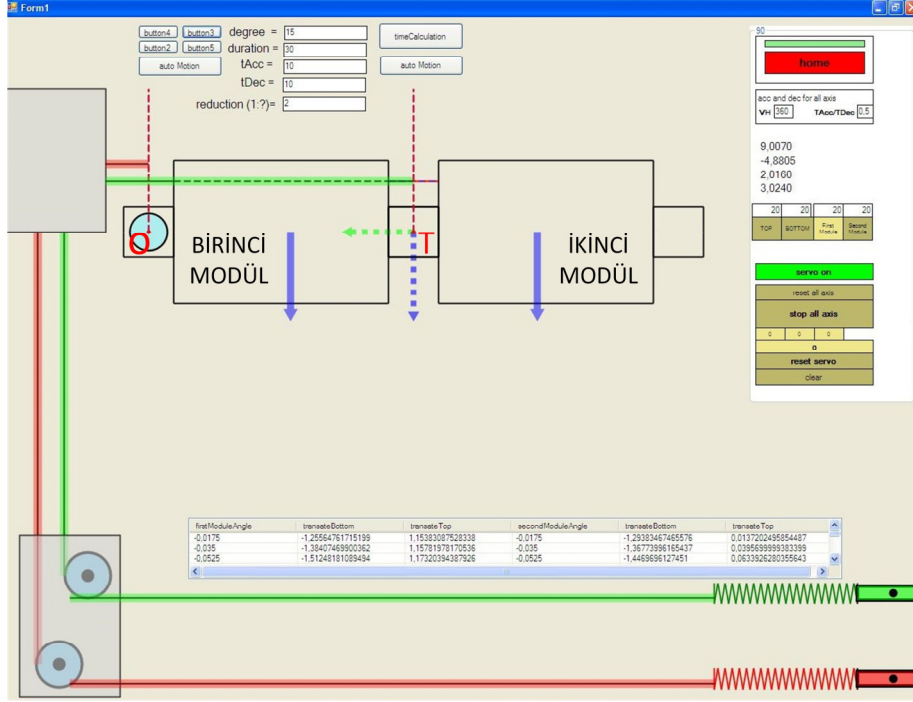
yaylardan oluşan benzer bir hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörün uzuvlarını kablolarla tahrik ederek üç boyutlu hareketi temin etmişlerdir. Hirose ve diğ. (2003) ise, yay ağırlığından kurtulmak için dengelemenin yaylarla değil de halat gerginliği vasıtasıyla elde edildiği, pararelkenar mekanizması kullanan hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli bir manipülatör tasarlamışlardır.

Servo motorlar, yüksek redüksiyon oranlı dişli kutuları ile birlikte kullanılırlar. Düşük konumlama doğruluğu başlıca redüktörde bulunan dişlilerin arasındaki boşluklardan kaynaklanmaktadır (Yang ve diğ. 2015). Pozisyon hatalarının diğer kaynağı ise, mekanizmanın kendi ağırlığından dolayı işlem elemanında meydana gelen sehimlerdir (Klimchik ve diğ. 2017).

Tezin bu bölümünde, iki serbestlik dereceli düzlemsel bir robot kolunun uzuvlarını karşı-dengeleyen bir yöntem geliştirilmiştir. Kola bağlı taşıma yükü olmayan sistemde, her bir uzvun çalışma alanı içindeki olası her konfigürasyonu için mafsalların üzerindeki yer çekimsel torklar aktif olarak dengelenmiştir. Kol üzerindeki mafsallara bağlı servo motorlar, redüktörde bulunan dişlilerin arasındaki boşluklardan kurtulmak için dişli kutusu olmadan kullanılmıştır. Bu sayede daha hassas, aynı zamanda daha kompakt ve hafif robotik bir kol elde edilmiştir. Robotun kontrolü, Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'ten görüleceği üzere, C Sharp programlama dilinde geliştirilen iki boyutlu simülatör içeren kontrol yazılımı sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deney verileri, dengeleme sisteminin uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır. Tezde sunulan iki serbestlik dereceli robot üzerindeki mevcut çalışma, gelecekte hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robot kolları üzerinde gerçekleştirilecek araştırmalar için bir başlangıç noktası olarak kabul edilebilir.

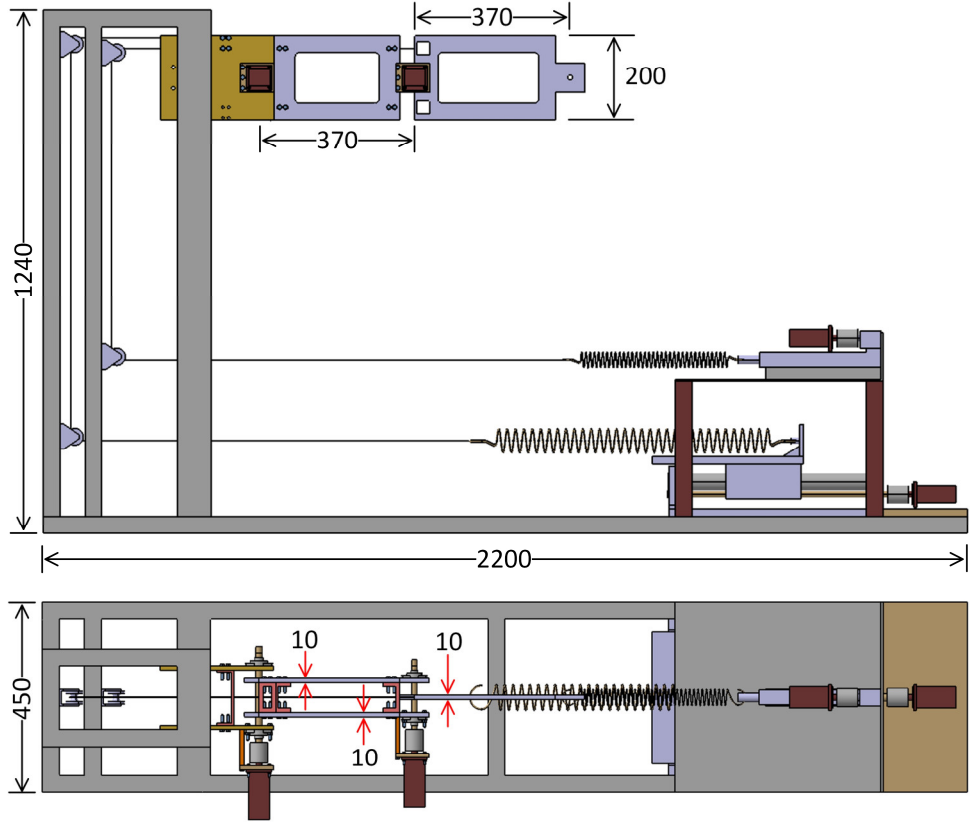
### **3.2 İki Serbestlik Dereceli Yer Çekimsel Tork Dengeleme Sistemi**

Yer çekimsel tork dengeleme için geliştirilmiş C Sharp kontrol yazılımı arayüzü, Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'te görülmektedir. Şekil 3.1 üzerinde görülen O ve T noktaları sırasıyla birinci ve ikinci mafsalı temsil etmektedir. Düz ve kesik çizgili vektörlerin neyi temsil ettiği tezin ilerleyen kısımlarında açıklanmıştır. Vektörlerin şiddeti ölçekli değildir.

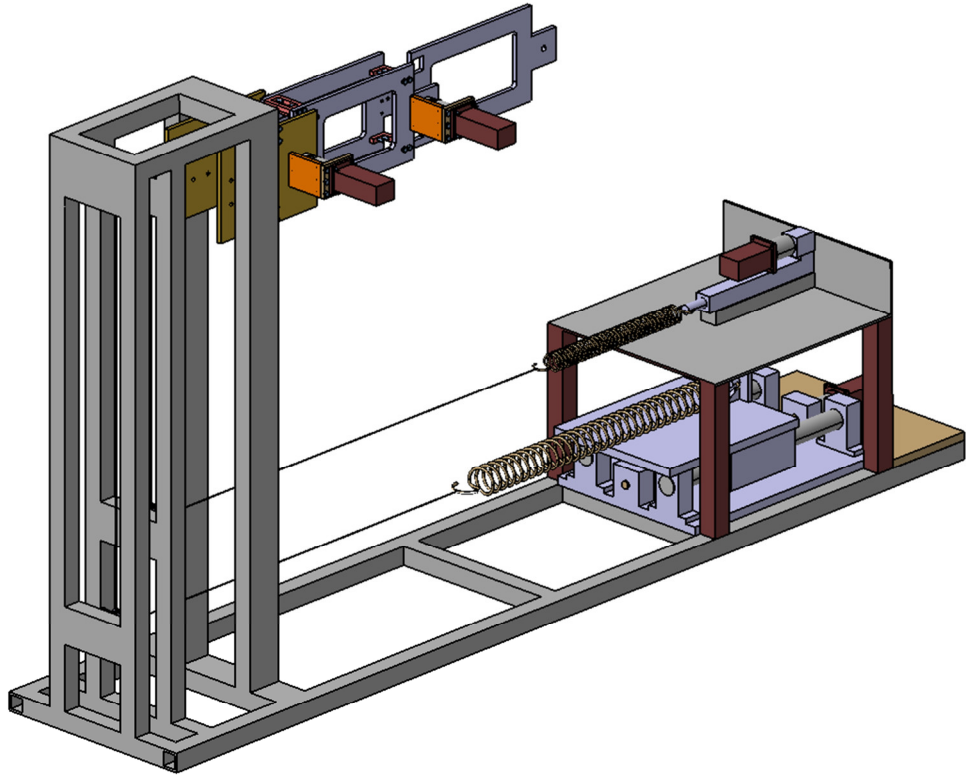


Şekil 3.1: C Sharp kontrol yazılımı arayüzü.

Yer çekimsel tork dengeleme için üç boyutlu tasarım, Şekil 3.2’de görülmektedir. Geliştirilen sistem, her biri bir serbestlik dereceli dönme hareketine sahip olan iki uzvu (modülü) tahrik eden, birinci ve ikinci uzva bağlı servo motorlardan oluşmaktadır. Temele en yakın ve en uzak modüller, sırasıyla birinci ve ikinci modül olarak adlandırılmıştır. Çalışma alanı içinde olmak üzere, uzuvların olası her konfigürasyonu için mafsallara yer çekimi tarafından uygulanan tork, her bir uzvu tahsis edilen yaylarla ayrı ayrı dengelenmiştir. Avare kasnaklar tarafından yönlendirilen çelik halatlar, yay kuvvetlerinin uzuvların moment kollarına nakli için kullanılmıştır. Avare kasnaklara ek olarak, ikinci modülün dengelenmesinden sorumlu çelik halat, ikinci modülün moment koluna ulaşabilmek için birinci modülün içinde açılmış kanaldan geçmektedir. Varsayılan tam denge pozisyonu Şekil 3.1’de görülmektedir. Modüller Şekil 3.3’te görüldüğü gibi her ne zaman konfigürasyonlarını değiştirirse, moment kollarına bağlı çelik halat uçları, geometrik olarak bağlı oldukları noktaların ötelenmesiyle aynı miktarda yer değiştirirler.



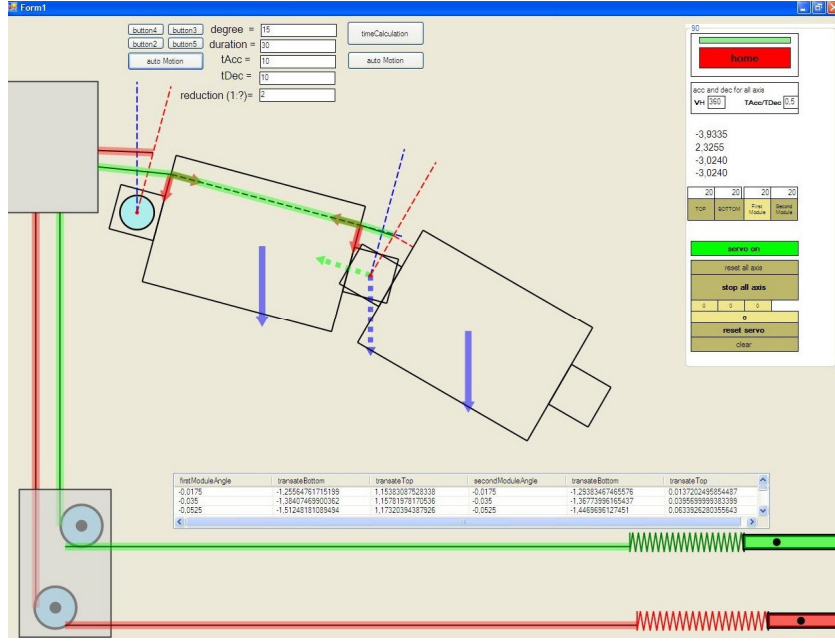
(a)



(b)

Şekil 3.2a-b: Yer çekimsel tork dengeleme için CAD tasarımı.





Şekil 3.3: C Sharp kontrol yazılımı arayüzü.

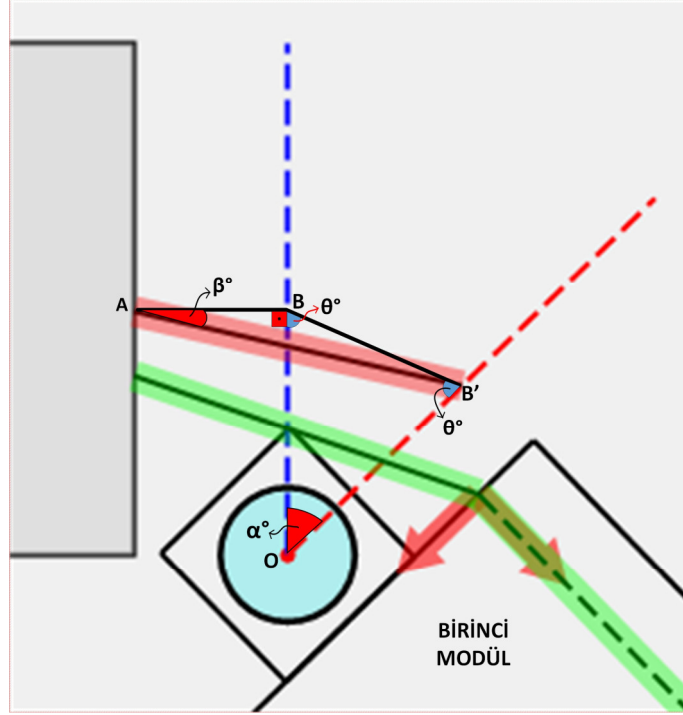
Bu durum, yayların çelik halata bağlı uçlarının da ötelenmesi anlamına gelir; dolayısıyla yay kuvvetleri istem dışı artmış olur. Ayrıca, modüllerin konfigürasyon değişimleri, dengeleme momenti ihtiyaçlarının miktarını da etkiler. Bu etkenler göz önünde bulundurularak, modüllerin çalışma alanındaki herhangi bir konfigürasyonu için, servo motorlar tarafından hareket ettirilen vidalı mil tahrikli lineer modüllere bağlı yayların uzunlukları düzenlenerek karşı-dengeleme sağlanmaktadır.

### 3.2.1 Modüllerin Dönmesinden Kaynaklanan Yay Kuvveti Artış ve Azalışları

Modüllerin dönmesinden kaynaklı yay kuvveti artış ve azalışları, dengeleme algoritması çalıştırılmadan hesaplanacaktır. Varsayılan tam denge konfigürasyonu (bkz. Şekil 3.1) dönme hareketi için referans kabul edilmiştir. Kolaylık olması açısından, birinci ve ikinci modülün moment kollarına bağlı çelik halatlar, sırasıyla kırmızı ve yeşil çelik halat olarak adlandırılmıştır. Kırmızı ve yeşil çelik halatlara bağlı yaylar ise yine aynı mantıkla sırasıyla kırmızı ve yeşil yay olarak adlandırılmıştır.

### 3.2.1.1 Kırmızı Yay Kuvveti Artış ve Azalışları

İlk modül dikey doğrultudan saat yönünde Şekil 3.4'teki gibi  $\alpha^\circ$  döndürüldüğünde, kırmızı halatın B noktasında bulunan ucu B' noktasına ötelenmektedir.  $|AB'|$  uzunluğunun geometrik olarak kosinüs teoremi yardımıyla nasıl bulunacağı (3.1)-(3.3) eşitliklerinde verilmiştir.



Şekil 3.4: Kırmızı çelik halatın uzama miktarı.

$|AB|$  : İlk modül döndürülmeden önceki uzunluk

$|AB'|$  : İlk modül döndürüldükten sonraki uzunluk

$\alpha^\circ$  : İlk modülün dönme açısı

$|OB| = |OB'|$  : İlk modülün moment kolu uzunluğu

$$\theta^\circ = (180^\circ - \alpha^\circ) / 2 \quad (3.1)$$

$$|BB'| = \sqrt{|OB|^2 + |OB'|^2 - 2 * |OB| * |OB'| * \cos(\alpha^\circ)} \quad (3.2)$$

$$|AB'| = \sqrt{|BB'|^2 + |AB|^2 - 2 * |BB'| * |AB| * \cos(90^\circ + \theta^\circ)} \quad (3.3)$$

$|AB'|$  uzunluğunun bulunmasından sonra kırmızı yay kuvvetindeki artış/azalış denklem (3.4)'teki gibi hesaplanır.

$$F_{rs_{i/d}} = k_{rs} * (|AB'| - |AB|) \quad (3.4)$$

### 3.2.1.2 Yeşil Yay Kuvveti Artış ve Azalışları

İlk modül dikey doğrultudan saat yönünde Şekil 3.5'teki gibi  $\alpha^\circ$  döndürüldüğünde, birinci modül tarafındaki yeşil halatın E noktasında bulunan ucu E' noktasına ötelenmektedir.  $|CE'|$  uzunluğunun geometrik olarak kosinüs teoremi yardımıyla nasıl bulunacağı (3.5)-(3.7) eşitliklerinde verilmiştir.

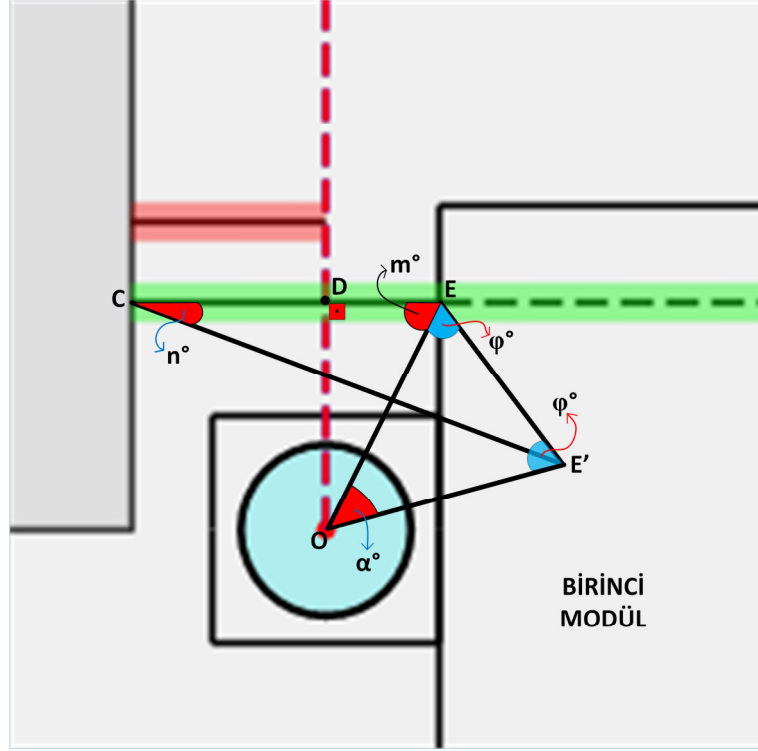
$|CE|$  : İlk modül döndürülmeden önceki uzunluk

$|CE'|$  : İlk modül döndürüldükten sonraki uzunluk

$$\varphi^\circ = (180^\circ - \alpha^\circ) / 2 \quad (3.5)$$

$$|EE'| = \sqrt{|OE|^2 + |OE'|^2 - 2 * |OE| * |OE'| * \cos(\alpha^\circ)} \quad (3.6)$$

$$|CE'| = \sqrt{|CE|^2 + |EE'|^2 - 2 * |CE| * |EE'| * \cos(m^\circ + \varphi^\circ)} \quad (3.7)$$



Şekil 3.5: Birinci modül tarafındaki yeşil çelik halatın uzama miktarı.

İkinci modül kendi referans düzlemindeki yerel dikey doğrultudan saat yönünde Şekil 3.6'daki gibi  $p^\circ$  döndürüldüğünde, ikinci modül tarafındaki yeşil halatın G noktasında bulunan ucu G' noktasına ötelenmektedir.  $|FG'|$  uzunluğunun geometrik olarak kosinüs teoremi yardımıyla nasıl bulunacağı (3.8)-(3.10) eşitliklerinde verilmiştir.

$|FG|$  : İkinci modül döndürülmeden önceki uzunluk

$|FG'|$  : İkinci modül döndürüldükten sonraki uzunluk

$p^\circ$  : İkinci modülün kendi referans düzlemindeki dönme açısı

$|TG| = |TG'|$  : İkinci modülün moment kolu uzunluğu

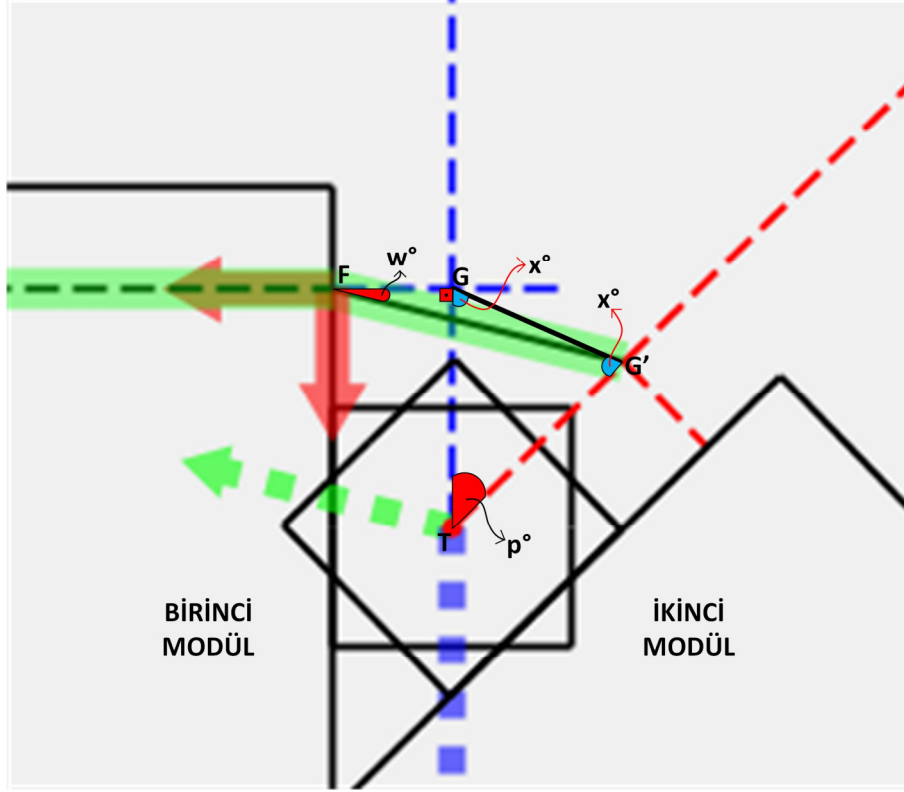
$$x^\circ = (180^\circ - p^\circ) / 2 \quad (3.8)$$

$$|GG'| = \sqrt{|TG|^2 + |TG'|^2 - 2 * |TG| * |TG'| * \cos(p^\circ)} \quad (3.9)$$

$$|FG'| = \sqrt{|FG|^2 + |GG'|^2 - 2 * |FG| * |GG'| * \cos(90^\circ + x^\circ)} \quad (3.10)$$

Yeşil yay kuvvetindeki artış/azalış denklem (3.11)'deki gibi hesaplanır.

$$F_{gs_{i/d}} = k_{gs} * [ (|CE'| - |CE|) + (|FG'| - |FG|) ] \quad (3.11)$$



Şekil 3.6: İkinci modül tarafındaki yeşil çelik halatın uzama miktarı.

### 3.2.2 İkinci Modülü Karşı-Dengeleme Yöntemi

Robotik kolun her parçasının gerçek ağırlığı CAD modeline dahil edilmiştir. Dolayısıyla, ikinci modülün ağırlık merkezi CAD yazılımından doğrudan elde edilmiştir. İkinci modülün moment dengeleme diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Tüm modüller yatay durumda olduğunda (bkz. Şekil 3.1) oluşan yeşil yay kuvveti, denklem (3.12)’den hesaplanabilir.

$$F_{gs_{hor}} = \frac{W_s * |TK|}{|TG'|} \quad (3.12)$$

Birinci ve/veya ikinci modül döndürüldüğünde oluşan toplam yeşil yay kuvveti (3.13) numaralı denklem yardımıyla bulunur.

$$F_{gs_{tot}} = F_{gs_{hor}} + F_{gs_{i/d}} \quad (3.13)$$

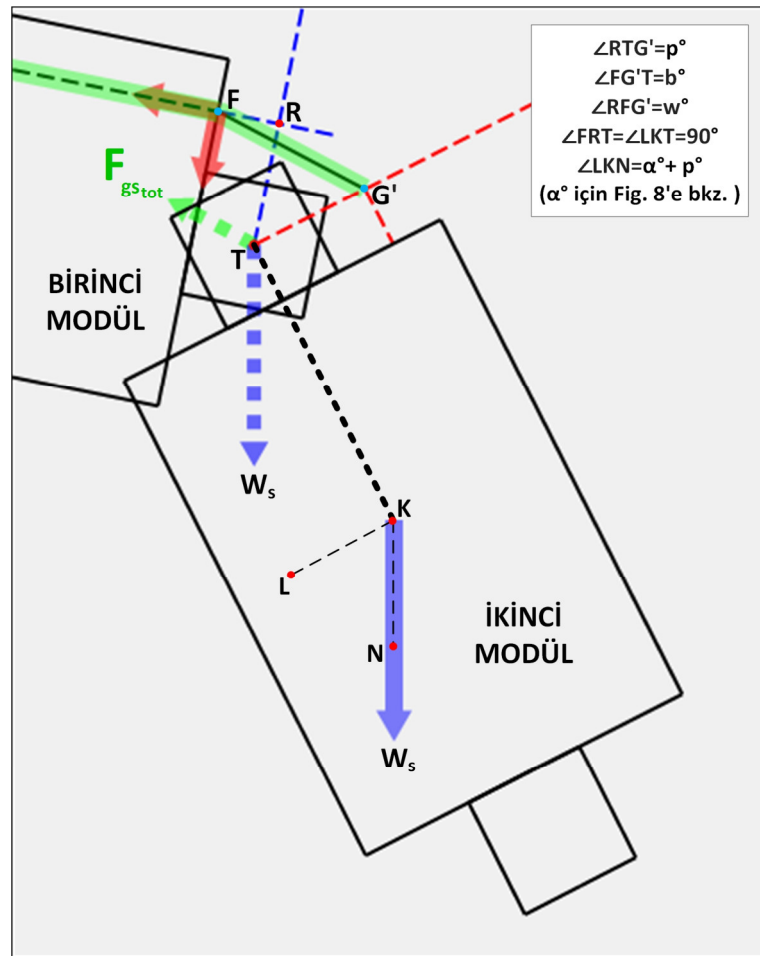
Dengeleme şartı için, ilgili vidalı mil tahrikli lineer modüle bağlı yeşil yayın hareketiyle telafi edilmesi gereken moment miktarı ve bu denklemde bulunan  $b^\circ$ 'nin neye eşit olduğu, sırasıyla denklem (3.14) ve (3.15)'te verilmiştir.

$$M_{gs_{comp}} = F_{gs_{tot}} * \sin(b^\circ) * |TG'| - W_s * \cos(\alpha^\circ + p^\circ) * |TK| \quad (3.14)$$

$$b^\circ = 90^\circ + w^\circ - p^\circ \quad (3.15)$$

Telafi edilmesi gereken  $M_{gs_{comp}}$  miktarını yaratacak yeşil yay kuvveti (3.16) numaralı eşitlikte görülmektedir.

$$F_{gs_{comp}} = \frac{M_{gs_{comp}}}{\sin(b^\circ) * |TG'|} \quad (3.16)$$



Şekil 3.7: İkinci modülün moment dengeleme diyagramı.

Böylelikle, vidalı mil tahrikli lineer modüle bağlı yeşil yayın boyunda, karşı-dengeleme olması için gereken mutlak ve nispi uzama/kısılma miktarları sırasıyla denklem (3.17) ve (3.18)'de görülmektedir.

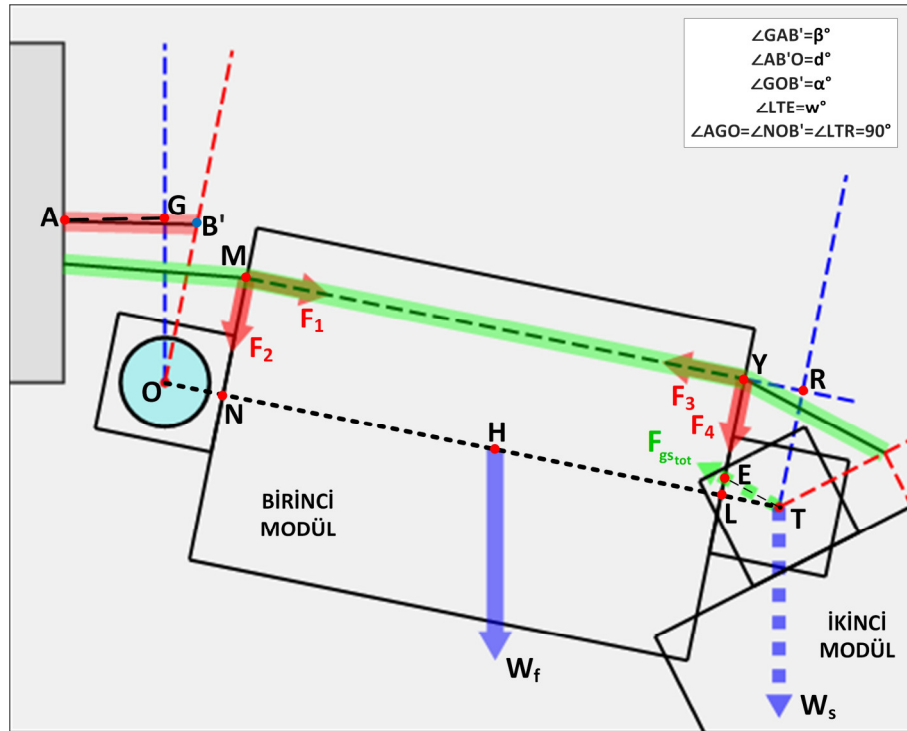
$$d_{gs_{abs}} = \frac{F_{gs_{comp}}}{k_{gs}} \quad (3.17)$$

$$d_{gs_{rel}} = d_{gs_{abs(i+1)}} - d_{gs_{abs(i)}}, \quad i=1,2, \dots \quad (3.18)$$

### 3.2.3 Birinci Modülü Karşı-Dengeleme Yöntemi

Birinci modülün moment dengeleme diyagramı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Tüm modüller yatay durumda olduğunda (bkz. Şekil 3.1) oluşan kırmızı yay kuvveti, denklem (3.19)'dan hesaplanabilir.

$$F_{rs_{hor}} = \frac{W_f * |HO| + W_s * |TO|}{|OB'|} \quad (3.19)$$



Şekil 3.8: Birinci modülün moment dengeleme diyagramı.

Birinci ve/veya ikinci modül döndürüldüğünde oluşan toplam kırmızı yay kuvveti (3.20) numaralı denklem yardımıyla bulunur.

$$F_{rs_{tot}} = F_{rs_{hor}} + F_{rs_{i/d}} \quad (3.20)$$

Dengeleme şartı için, ilgili vidalı mil tahrikli lineer modüle bağlı kırmızı yayın hareketiyle telafi edilmesi gereken moment miktarı, bu denklemde bulunan  $d^\circ$  ve  $w^\circ$ 'nin neye eşit olduğu, sırasıyla denklem (3.21), (3.22) ve Şekil 3.7'de verilmiştir.  $F_1, F_2, F_3, F_4$  yeşil halat gerginliğinin birinci modülde oluşturduğu net kuvvetlerdir.

$$\begin{aligned} M_{rs_{comp}} = & F_{rs_{tot}} * \sin(d^\circ) * |OB'| - W_f * \cos(\alpha^\circ) * |HO| - \\ & W_s * \cos(\alpha^\circ) * |TO| + F_{gs_{tot}} * \sin(w^\circ) * |TO| - \\ & F_1 * |MN| - F_2 * |NO| + F_3 * |YL| - F_4 * |LO| \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$d^\circ = 90^\circ + \beta^\circ - \alpha^\circ \quad (3.22)$$

Telafi edilmesi gereken  $M_{rs_{comp}}$  miktarını yaratacak kırmızı yay kuvveti (3.23) numaralı eşitlikte görülmektedir.

$$F_{rs_{comp}} = \frac{M_{rs_{comp}}}{\sin(d^\circ) * |OB'|} \quad (3.23)$$

Böylelikle, vidalı mil tahrikli lineer modüle bağlı kırmızı yayın boyunda, karşı-dengeleme olması için gereken mutlak ve nispi uzama/kısalma miktarları sırasıyla denklem (3.24) ve (3.25)'te görülmektedir.

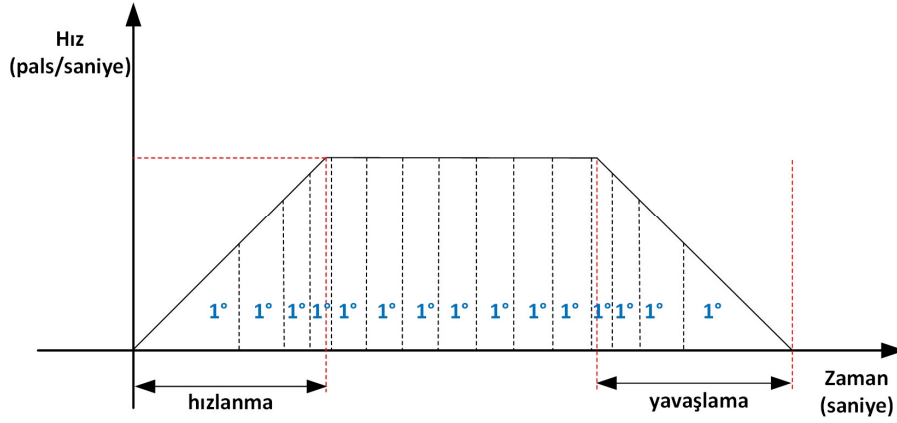
$$d_{rs_{abs}} = \frac{F_{rs_{comp}}}{k_{rs}} \quad (3.24)$$

$$d_{rs_{rel}} = d_{rs_{abs(i+1)}} - d_{rs_{abs(i)}}, \quad i=1,2 \dots \quad (3.25)$$



### 3.2.4 Senkronizasyon Prosedürü

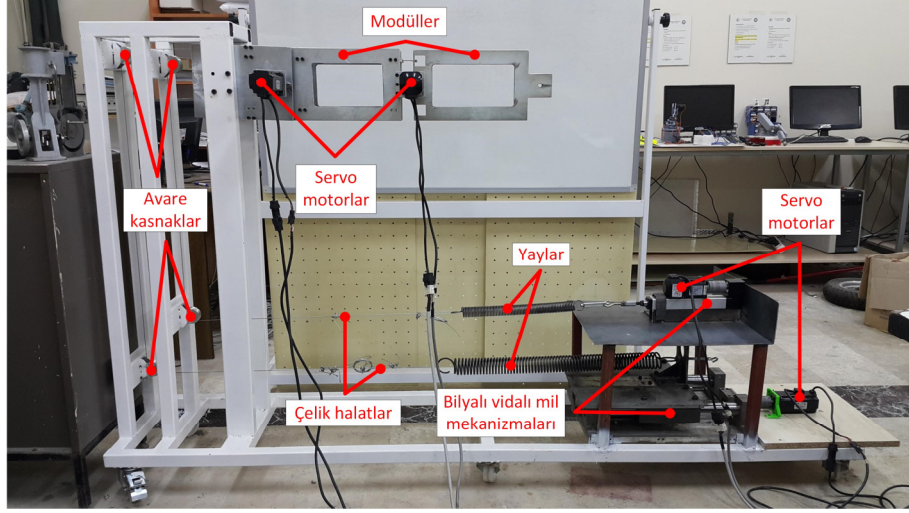
Her modül bir derecelik artışlarla eş zamanlı olarak döndürülürken, bu derece artışına karşılık gelen  $d_{rs_{rel}}$  ve  $d_{gs_{rel}}$  'in interpolasyonu sağlanmalıdır. Her bir derecelik dönüş için interpolasyon zamanı, kullanıcı tarafından tanımlanan toplam dönme açısı, hızlanma ve yavaşlama süreleri ile sabit hız değerine göre hesaplanır. Bu dört parametre kullanılarak, modüllerin hız profilleri Şekil 3.9'daki gibi çıkarılır. Profilin altında kalan alan toplam dönme açısını vermektedir. Her bir derecelik dönme için gerekli süre, profilin altında kalan alanın birer derecelik eş parçalara bölünmesiyle elde edilir. Her eş parça içinde, modülleri ve vidalı mil tahrikli lineer modülleri süren servo motorlar hareketlerini aynı süre içinde tamamlamalıdır.



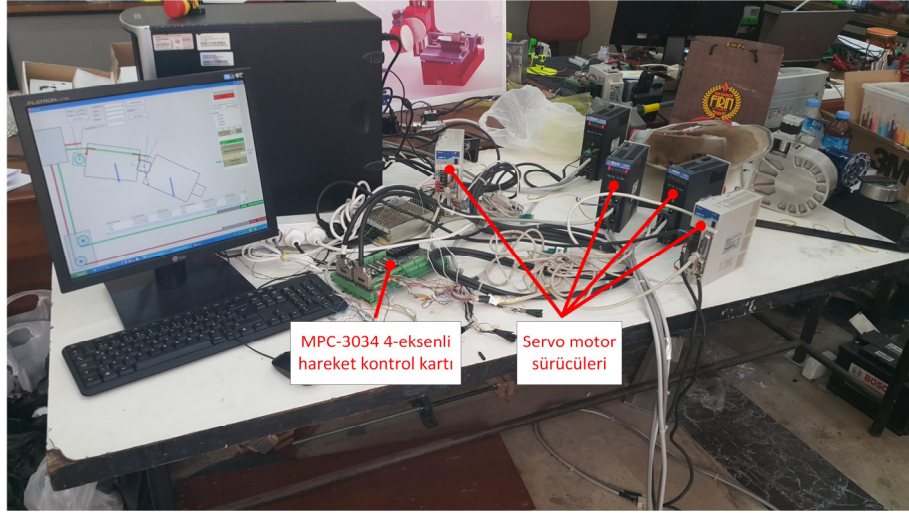
Şekil 3.9: Her bir modülün hız profili.

### 3.3 Deney Düzeneği

Deney düzeneği, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.10: Deneý düzeneđinin mekanik birimleri.



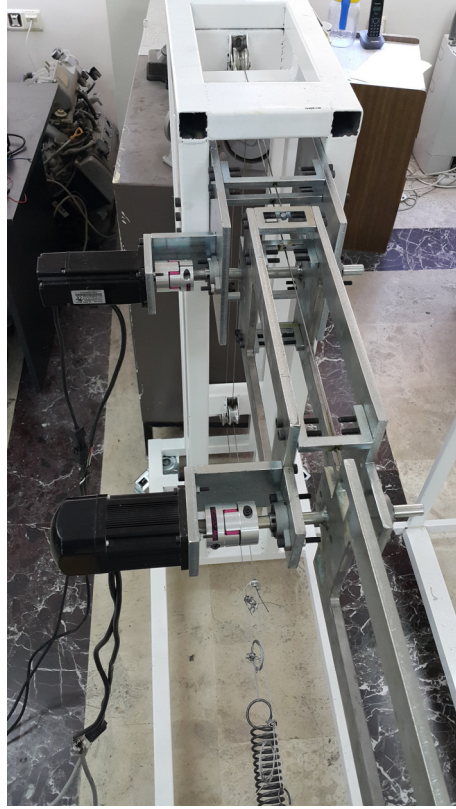
Şekil 3.11: Deneý düzeneđinin kontrol birimleri.

Deneý düzeneđi ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.1'de bulunmaktadır.

**Tablo 3.1:** Deneý düzeneđi ile ilgili teknik bilgiler.

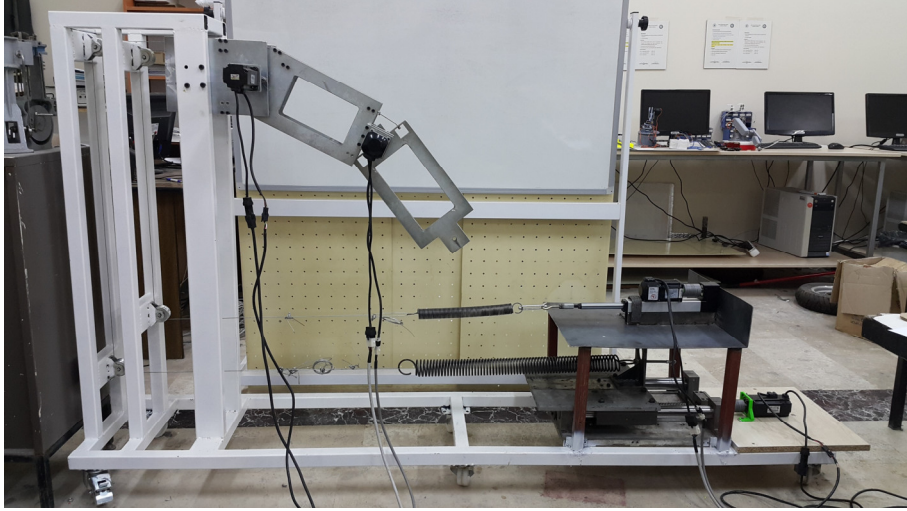
Servo motorların teknik özellikleri				
	Birinci mafsah tahrik eden AC Servo motor	İkinci mafsah tahrik eden AC Servo motor	Kırmızı yay bağlantı noktasını hareket ettirmek için kullanılan AC Servo motor	Yeşil yay bağlantı noktasını hareket ettirmek için kullanılan AC Servo motor
Marka/Model Numarası	Delta ECMA-C30604GS	ADTECH ACH-06040DC	Delta ECMA-C30604GS	ADTECH ACH-06040DC
Güç	0.4 [kW]	0.4 [kW]	0.4 [kW]	0.4 [kW]
Nominal tork kapasitesi	1.27 [N•m]	1.3 [N•m]	1.27 [N•m]	1.3 [N•m]
Maksimum tork kapasitesi	3.82 [N•m]	3.8 [N•m]	3.82 [N•m]	3.8 [N•m]
Diğer teknik özellikler				
Hareket kontrol kartı	MPC-3034 4-axis			
Kırmızı yay katsayısı	891.6 [N/m]			
Yeşil yay katsayısı	453.3 [N/m]			
Birinci modülün ağırlığı	11.004 [kg]			
İkinci modülün ağırlığı	3.508 [kg]			
Birinci modülün dengeleme olmadan maruz kaldığı maksimum tork	34.124 [N•m]			
İkinci modülün dengeleme olmadan maruz kaldığı maksimum tork	5.948 [N•m]			
Kablolar	1x19 paslanmaz çelik halat, 1.5 mm çap			
Kuvvet transdüseri	±50 g hassasiyete sahip çengel askılı dijital göstergeli elektronik kantar (Dikomsan, OCS-LP-150)			

Servo motorlar, her iki modülün mafsahına dişli kutusu olmadan Şekil 3.12’de görüldüğü gibi doğrudan bağlanmıştır.



Şekil 3.12: Servo motorların birinci ve ikinci modülün mafsallarına bağlanması.

Her modül, kontrol yazılımıyla Şekil 3.13'te görüldüğü gibi tam yatay konfigürasyondan saat yönünde  $25^\circ$  döndürülmüştür. Her mafsalsal normalde  $45^\circ$  hareket aralığına sahiptir ve bu açı mekanik olarak istenirse artırılabilir. Üstteki yayı süren lineer aktüatörün maksimum stroku nedeniyle  $25^\circ$ 'ye kadar döndürülebilmişlerdir. Daha yüksek stroklu aktüatörler kullanılırsa, karşı-dengeleme yöntemi modüllerin daha yüksek hareket aralığı için de test edilebilir. Ancak, söz konusu hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipulatörler olduğunda,  $0-25^\circ$  açı aralığı kabul edilebilirdir. Örneğin, OC Robotics® firması tarafından üretilen ticari hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipulatörler dar mafsalsal açısı aralığına sahiptir. Fakat bu küçük açıların birikmesiyle büyük hareket kabiliyeti elde edilir. Dolayısıyla,  $0-25^\circ$  açı aralığı, sunulan prototip dengeleme sisteminin nasıl davrandığını görmek için yeterince makuldür.



Şekil 3.13: Modüllerin karşı-dengelemeli hareketi.

### 3.4 Bulgular ve Tartışma

Literatürde karşı-dengelemeyle alakalı olarak pek çok çalışma bulunsa da, bu yayınların çok az kısmı hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin yer çekimsel tork dengelemesi ile ilgilidir. Bu yayınlar, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin pasif karşı-dengelemesini paralelkenar mekanizması kullanarak yaparlar. Paralelkenar mekanizması, kompakt değildir ve bu mekanizmanın pozisyonlama doğruluğu ve hareket aralığı düşüktür. Üç boyutlu uzayda hareket etmek için karmaşık mafsal mekanizmalarına ihtiyaç duyarlar (Hirose 1996, Hirose ve diğ. 2003, Keller ve diğ. 2008). Literatürdeki diğer karşı-dengeleme yöntemleri pozisyonlama doğruluğu, hafiflik ve kompaktlık açısından hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlere uygun değildirler. Örneğin, Nguyen ve diğ. (2020) tarafından sunulan bir yöntem, paralelkenar tipinde olmayan uzuvlara sahip düzlemsel bir robotik kolun pasif dengelemesini dişli-yay modülleri (gear-spring modules, GSM) kullanarak başarmıştır. Bu modüller esasında bir yay üzerine etkiyen dişli krank-biyel mekanizmasıdır. Her uzuv kendi dişli-yay modülünü üzerinde barındırmaktadır. Dolayısıyla sisteme ardışık olarak dahil edilen fazladan ağırlıkların işlem elemanı üzerinde yarattığı sehimler nedeniyle robot kolunun konumlandırma hassasiyetinin düşeceği aşikârdır. Dengelemeyle alakalı denklemler, geometrik varsayımlar ve montaj şartlarına dayandırılarak elde edilmiştir. Bu sınırlamalardan biri, biyel kolu uzunluğunun krank yarıçapından çok

daha büyük olmasını dayattığından, uzuvlar istenildiği kadar küçük tasarlanamazlar. Ayrıca, yay katsayısının krank yarıçapının karesiyle ters orantılı olduğunun anlaşılması, seçilecek yayın boyutlarının da sistemin geometrik tasarım parametrelerine bağlı olduğunun bir göstergesidir. Bu geometrik bağılıklar, önerilen dengeleme mekanizmasının üzerinde kullanılacağı hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robot kolu tasarımını iri yarı bir hale getirmektedir. Bunların yanı sıra, tam dengelemenin sadece tek serbestlik dereceli robotik kol üzerinde gerçekleştiği raporlanmıştır. Montaj şartlarından dolayı, tasarlanan hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robot kolunun tam dengelenmesi sadece dişli-yay modüllerinin önceden belirlenen bazı montaj açıları için garanti edilmiştir. Bu açılar haricinde robotik kol eklemlerine etkiyen yer çekimsel torkun ancak belirli bir bölümü dengelenebilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen karşı-dengeleme yöntemlerinin literatürdeki diğer yöntemlere göre avantajı; yöntemin yukarıda bahsedilen dezavantajları ortadan kaldırması ve mafsalları çelik halatlarla tahrik edilebilen geniş bir yelpazedeki manipülatörlere uygulanabilmesidir. Yöntemin tek dezavantajı, vidalı mil tahrikli lineer modülleri süren ek servo motorlara ihtiyaç duymasıdır. Fakat, elde edilen yüksek konumlandırma hassasiyeti, ek servo motorların kullanılmasına değmektedir.

Endüstriyel robotların son üç ekseninin çelik halatlarla kontrol edilmesi, mafsalların tasarımı açısından zorluk içermektedir. Bu soruna verimli bir çözüm bulabilmek için araştırma yürütmekteyiz. Araştırma neticesinde uygulanabilir sonuçlar elde edilebilirse, tez kapsamında geliştirilen karşı-dengeleme yöntemi endüstriyel robotlara da uygulanabilecektir. Şimdilik yöntem, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlere daha kolay uygulanabilmektedir. Çünkü bu manipülatörlerin mafsalları, endüstriyel robotlara göre daha az hareket aralığına ihtiyaç duymaktadır.

Dengeleme sistemi olmadığı takdirde, uzuvların üzerindeki servo motorların uzuvları tahrik edemeyeceği açıktır. Bu motorlar, aşırı tork hata mesajı vererek çalışmayı durdurmaktadır. Bunun yanı sıra, senkronizasyon prosedürü uygun biçimde gerçekleşmezse, modülleri tahrik eden motorlar aşırı yüke binerler. Bir motor deney esnasında bu sebepten aşırı ısınarak yanmıştır.

Karşı-dengelemeli sistem hareketini altmış saniye içinde herhangi bir hata mesajı vermeden tamamlamıştır.

### 3.4.1 Karşı-dengeleme Tork Değerlerinin Ölçülmesi

Şekil 3.14'te görüldüğü üzere,  $\pm 50$  g hassasiyete sahip çengel askılı dijital göstergeli elektronik kantar (Dikomsan, OCS-LP-150) robotun her bir modülünün moment koluna uygulanan yay kuvvetini ölçmek için kullanılmıştır. Ölçülen veriler standart bir kamera ile kaydedilmiştir.

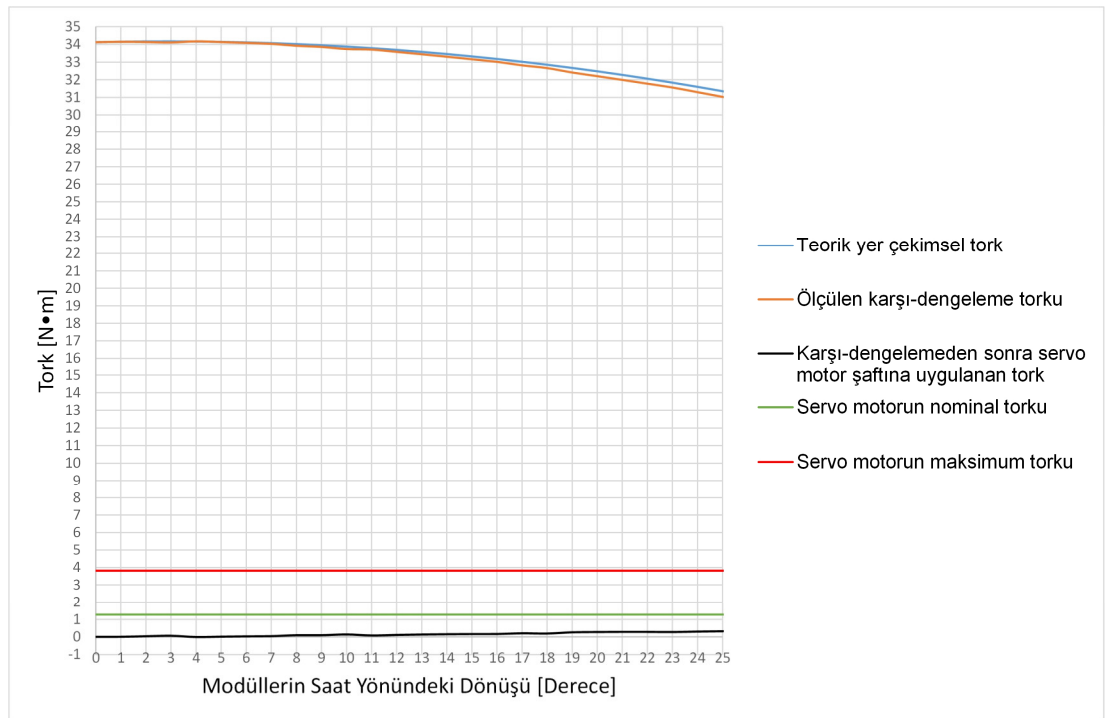


Şekil 3.14: Çengel askılı dijital göstergeli elektronik kantar.

Tezin 3.2.4 numaralı bölümünde belirtildiği üzere, modüllerin her bir derecelik dönüşü için interpolasyon zamanı, kullanıcı tarafından tanımlanan toplam dönme açısı, hızlanma ve yavaşlama süreleri ile sabit hız değerine göre hesaplanır (bkz. Şekil 3.9). Modüller birer derecelik dönüşlerini özellikle ivmelenme bölgelerinde farklı zaman aralıklarında tamamlarlar. Geliştirilen algoritma bu zaman aralıklarını otomatik olarak hesaplar. Bir video kesme yazılımı (Boilsoft Video Splitter) kullanılarak her bir zaman aralığına karşılık gelen kısımlar yay kuvveti ölçüm videosundan kesilerek kaydedilmiş ve yay kuvvetleri (Tablo 3.4) bu kesilmiş video kısımlarından okunmuştur. Kuvvet ve moment kolu arasındaki açılar C Sharp'ta geliştirilen kontrol yazılımı tarafından hesaplandığından, deneysel karşı-dengeleme tork değerleri bu şekilde belirlenmiş olur. Deneysel bulgular, Tablo 3.2, Tablo 3.3, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da bulunmaktadır.

**Tablo 3.2:** Birinci mafsâl için deneysel sonuçlar.

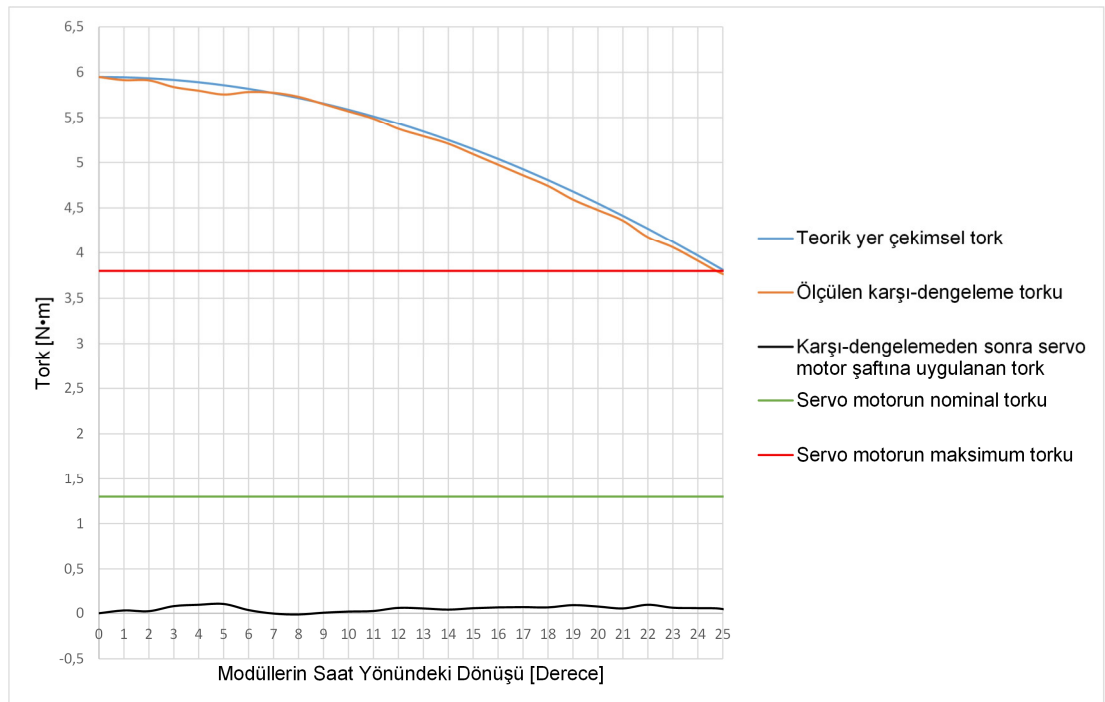
Hareket Derecesi	Teorik Yer Çekimsel Tork [N•m]	Deneyisel Karşı-Dengeleme Torku [N•m]	Karşı-Dengelemeden Sonra Servo Motor Şaftına Uygulanan Tork [N•m]
0	34.1248	34.1248	0
1	34.1519	34.1474	0.0045
2	34.1673	34.1327	0.0346
3	34.1711	34.1090	0.0621
4	34.1633	34.1718	-0.0085
5	34.1441	34.1319	0.0122
6	34.1133	34.0848	0.0286
7	34.0711	34.0308	0.0403
8	34.0174	33.9232	0.0942
9	33.9522	33.8567	0.0955
10	33.8756	33.7375	0.1381
11	33.7875	33.7067	0.0808
12	33.6879	33.5769	0.1110
13	33.5768	33.4424	0.1344
14	33.4542	33.3032	0.1510
15	33.3201	33.1597	0.1604
16	33.1746	33.0121	0.1625
17	33.0175	32.8144	0.2031
18	32.8490	32.6590	0.1900
19	32.6689	32.4085	0.2604
20	32.4774	32.2007	0.2768
21	32.2745	31.9897	0.2847
22	32.0600	31.7758	0.2842
23	31.8342	31.5591	0.2751
24	31.5969	31.2947	0.3022
25	31.3483	31.0282	0.3201





**Tablo 3.3:** İkinci mafsal için deneysel sonuçlar.

Hareket Derecesi	Teorik Yer Çekimsel Tork [N•m]	Deneyel Karşı-Dengeleme Torku [N•m]	Karşı-Dengelemeden Sonra Servo Motor Şaftına Uygulanan Tork [N•m]
0	5.9486	5.9486	0
1	5.9450	5.9141	0.0309
2	5.9341	5.9116	0.0225
3	5.9159	5.8377	0.0782
4	5.8904	5.7975	0.0930
5	5.8578	5.7561	0.1017
6	5.8180	5.7833	0.0347
7	5.7710	5.7746	-0.0036
8	5.7170	5.7302	-0.0132
9	5.6560	5.6502	0.0057
10	5.5880	5.5697	0.0183
11	5.5132	5.4887	0.0245
12	5.4316	5.3728	0.0589
13	5.3434	5.2910	0.0525
14	5.2487	5.2088	0.0399
15	5.1475	5.0922	0.0553
16	5.0400	4.9756	0.0644
17	4.9264	4.8590	0.0674
18	4.8067	4.7424	0.0643
19	4.6811	4.5922	0.0889
20	4.5498	4.4760	0.0737
21	4.4129	4.3601	0.0528
22	4.2706	4.1775	0.0931
23	4.1231	4.0624	0.0607
24	3.9705	3.9144	0.0561
25	3.8131	3.7670	0.0460



**Şekil 3.16:** İkinci mafsal için deneysel sonuçlar.

Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; sunulan yöntem her iki mafsala binen yer çekimsel torku büyük ölçüde dengelemeyi başarmıştır. Tahmin edileceği üzere, yayın lineer olmayan davranışı ve sistemdeki sürtünme yöntemin performansını bir miktar olumsuz etkilemiştir. Ayrıca, senkronizasyon için interpolasyon 1°'den daha küçük açılar için gerçekleştirilirse sistemin dengeleme hassasiyeti artacaktır.

Yöntemin performansını test edebilmek adına modüllerin her iki mafsalında da 400 watt'lık servo motorlar kullanılmıştır. Deneysel bulgular, daha küçük kapasiteli servo motorların da kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Bu sayede, daha kompakt, daha hafif ve daha yüksek konumlama doğruluğuna sahip hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robotik kollar hayata geçirilebilecektir.

### 3.4.2 Ek Servo Motorların Güç Tüketiminin Hesaplanması

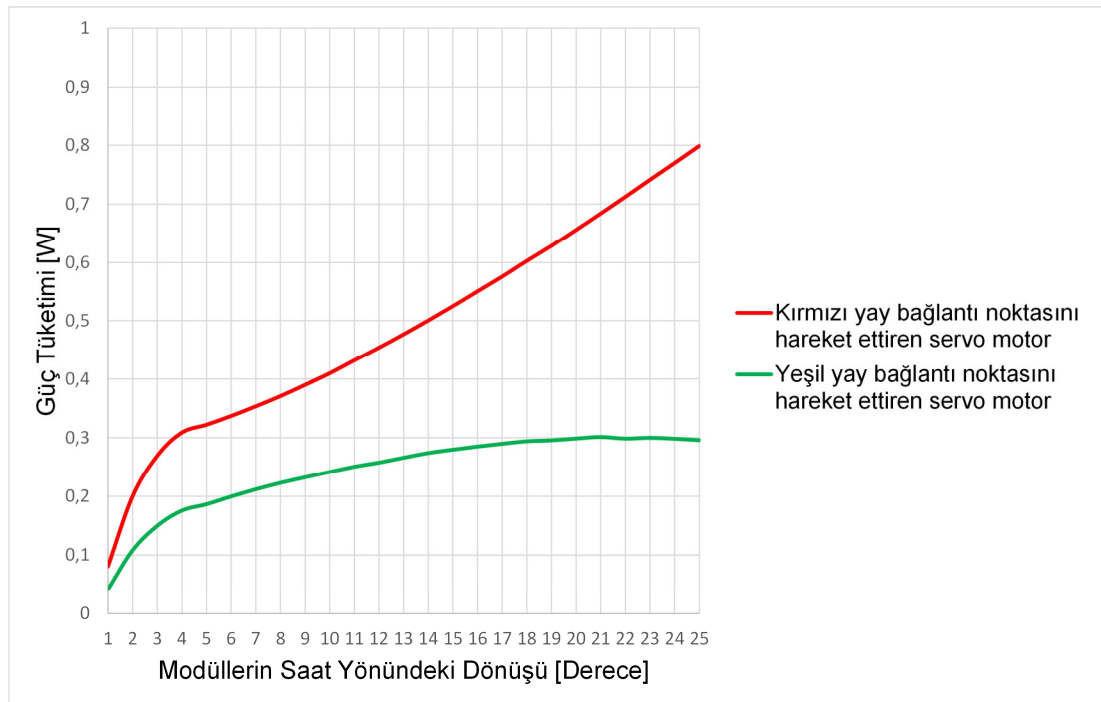
Tezin 3.4.1 numaralı bölümünde yay kuvvetlerinin nasıl ölçüldüğü açıklanmıştır. Yayların bağlandığı lineer modüllerin her ikisi de bilyalı vidalı mil mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizmayı tahrik eden motorların yenmesi gereken, mekanizmaya aksel olarak uygulanan yay kuvvetinden kaynaklı sürtünme torku denklem (3.26)'ya göre hesaplanmaktadır (Wei ve Lai 2011, Ball Screw THK General Catalog 2020).

$$T_f = \frac{F_{ap} * L}{2 * \pi * \eta} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'da bulunan  $T_f$ ,  $F_{ap}$ ,  $\eta$  ve  $L$ , sırasıyla aksel yay kuvvetinden kaynaklı sürtünme torku, uygulanan aksel kuvvet, bilyalı vidalı mil verimi ve vidalı mil adımını temsil etmektedir. Bilyalı vidalı mil veriminin 0.90 ve 0.95 arasında olduğu kabul edilmektedir (Ball Screw THK General Catalog 2020). Açısal hızlar kontrol yazılımı tarafından belirlendiğinden, torkla açısal hızın çarpımı bilyalı vidalı mil şaftına iletilmesi gereken gücü vermektedir. Bilyalı vidalı mil verimi 0.90 olarak seçilmiştir ve bilyalı vidalı millerin her ikisi de 5 mm adıma sahiptir. Lineer kızakların sürtünmesi ihmal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.4 ve Şekil 3.17'de görülmektedir. Servo motorların kapasitelerine (400 watt) göre çok düşük güç ilettikleri anlaşılmıştır.

**Tablo 3.4:** Ek servo motorların güç tüketimi değerleri.

Derece	Kırmızı yay bağlantı noktasını hareket ettirmek için kullanılan servo motor				Yeşil yay bağlantı noktasını hareket ettirmek için kullanılan servo motor			
	Ölçülen Yay Kuvveti [N]	Hesaplanan Tork [N•m]	Açısal Hız [rad/s]	Güç [W]	Ölçülen Yay Kuvveti [N]	Hesaplanan Tork [N•m]	Açısal Hız [rad/s]	Güç [W]
1	359.5000	0.3180	0.2540	0.0808	84.5000	0.0748	0.5547	0.0415
2	359.5000	0.3180	0.6290	0.2000	84.5000	0.0748	1.4455	0.1081
3	359.5000	0.3180	0.8464	0.2692	83.5000	0.0739	2.0257	0.1496
4	360.5000	0.3189	0.9682	0.3088	83.0000	0.0734	2.3909	0.1756
5	360.5000	0.3189	1.0098	0.3220	82.5000	0.0730	2.5534	0.1864
6	360.5000	0.3189	1.0566	0.3370	83.0000	0.0734	2.7181	0.1996
7	360.5000	0.3189	1.1083	0.3534	83.0000	0.0734	2.8846	0.2118
8	360.0000	0.3185	1.1643	0.3708	82.5000	0.0730	3.0525	0.2228
9	360.0000	0.3185	1.2245	0.3900	81.5000	0.0721	3.2216	0.2323
10	359.5000	0.3180	1.2885	0.4098	80.5000	0.0712	3.3914	0.2415
11	360.0000	0.3185	1.3560	0.4318	79.5000	0.0703	3.5616	0.2505
12	359.5000	0.3180	1.4269	0.4538	78.0000	0.0690	3.7321	0.2575
13	359.0000	0.3176	1.5010	0.4767	77.0000	0.0681	3.9026	0.2658
14	358.5000	0.3171	1.5781	0.5005	76.0000	0.0672	4.0728	0.2738
15	358.0000	0.3167	1.6582	0.5251	74.5000	0.0659	4.2424	0.2796
16	357.5000	0.3163	1.7410	0.5506	73.0000	0.0646	4.4114	0.2849
17	356.5000	0.3154	1.8265	0.5760	71.5000	0.0633	4.5794	0.2897
18	356.0000	0.3149	1.9145	0.6030	70.0000	0.0619	4.7463	0.2939
19	354.5000	0.3136	2.0052	0.6288	68.0000	0.0602	4.9119	0.2955
20	353.5000	0.3127	2.0982	0.6562	66.5000	0.0588	5.0759	0.2986
21	352.5000	0.3118	2.1937	0.6841	65.0000	0.0575	5.2383	0.3012
22	351.5000	0.3110	2.2915	0.7125	62.5000	0.0553	5.3988	0.2985
23	350.5000	0.3101	2.3916	0.7416	61.0000	0.0540	5.5573	0.2999
24	349.0000	0.3087	2.4940	0.7700	59.0000	0.0522	5.7136	0.2982
25	347.5000	0.3074	2.5987	0.7989	57.0000	0.0504	5.8675	0.2959



**Şekil 3.17:** Ek servo motorların güç tüketimi.

Ek servo motorların çok düşük güç harcadığı kanıtlanmış olsa da, çözülmeyi bekleyen ana sorunun, ek servo motorların ne kadar güç tükettiğiyle alakası yoktur. Odaklanması gereken nokta kinematik kontrolü ilgili yayında Bulut ve Conkur (2020) sunulan çok fazla sayıda uzva sahip hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli bir manipülatörün nasıl hayata geçirileceğidir. Bu tezde yapılan çalışmanın, sistemin enerji tüketimini düşürmek gibi bir gayesi hiç olmamıştır. Tezin odak noktası verimden ziyade hassas hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörlerin hayata geçirilebilmesidir.

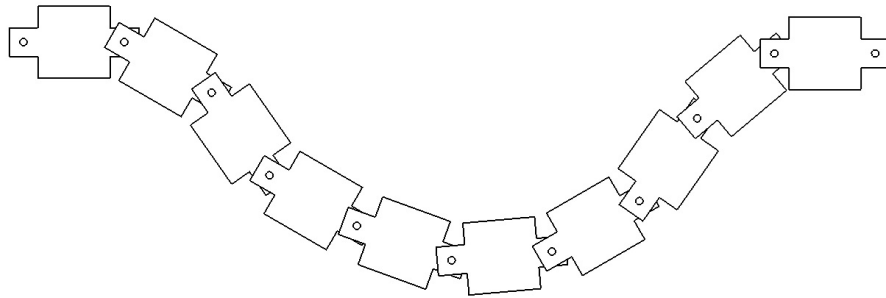
Geleneksel biçimde seri olarak uç uca eklenmiş, mafsallarında dahili servo motor ve dişli kutusu barındıran bir manipülatör tasarımı toplam uzuv sayısını sınırlandırmaktadır. Çünkü; robot kolun dibinden ucuna doğru gidildikçe, her bir uzuv kendinden önceki mafsallarda tork yaratır (Wu ve diğ. 2019). Bunun yerine, hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler kablo kullanılarak hayata geçirilir ki bu durum düşük işlem elemanı hassasiyetine sebep olmaktadır. Bu yüzden bu tezde ilgili hassasiyet sorununa bir çözüm sunulmuştur. Literatürde bu soruna alternatif başka bir çözüm bulunmadığından, bu tezde sunulan yaklaşımın kıymetli olduğu düşünülmektedir. Bir görevi yerine getirmek için yüksek hassasiyet gerekiyorsa, enerji tüketimi ikinci planda kalmaktadır. Bu durum, Edison tarafından icat edilen çok verimsiz ilk ampulün, alternatifi ortaya çıkana kadar çok uzun zaman boyunca kullanıldığı gerçeğiyle benzeşmektedir.

### **3.4.3 Sunulan Dengeleme Sisteminin Hiper-Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Manipülatörlere Uygulanması**

Ayrık uzuvlu hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler, yapılarına göre iki farklı kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategoridekilerin uzuvlarındaki mafsallar dişli kutuları aracılığıyla servo motorlar tarafından doğrudan tahrik edilirler. İkinci kategorideki manipülatörün uzuvları ise uzaktan kablo ile kontrol edilmektedir. Geleneksel biçimde seri olarak uç uca eklenmiş, mafsallarında dahili servo motor ve dişli kutusu barındıran bir manipülatör tasarımı toplam uzuv sayısını sınırlandırmaktadır. Çünkü; robot kolun dibinden ucuna doğru gidildikçe, her bir uzuv kendinden önceki mafsallarda tork yaratır (Wu ve diğ. 2019). İlk

kategori için, minyatür motorlar tarafından tahrik edilen sınırlı sayıda modüle sahip küçük ölçekli hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler çalışılmıştır (Brown ve diğ. 2007). Bilindiği kadarıyla, bugüne kadar çok fazla uzva sahip büyük ölçekli hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler, teorik olarak mümkün olsa da Bulut ve Conkur (2020), pratikte ilk kategoride açıklanan mafsal tahrik mekanizması kullanılarak yukarıda açıklanan sebepten ötürü gerçekleştirilememiştir. Bunun yerine kablo tahrikli mekanizmalar tercih edilmektedir. Ancak robotun işlem elemanını konumlandırma doğruluğu, kabloların yük altında uzamalarından olumsuz etkilenmektedir. Mafsal açısı sensörleri (minyatür potansiyometreler) kullanılarak bu sorun minimize edilmiştir; fakat bu sensörlerin hassasiyeti hâlâ geliştirilmeye muhtaçtır (Wu ve diğ. 2019). Bu tezde sunulan dengeleme yöntemi söz konusu manipülatörlerin çok daha fazla hassasiyete sahip olmasına imkân tanıyacak olup, bu yönüyle bu alanda yeni bir ufuk açacaktır. Örneğin, robot kolunun ilk modülünü tahrik eden Delta ECMA-C30604GS servo motor, 10000 PPR çözünürlüklü artımsal (incremental) tip enkodere sahiptir (ASDA-B Series User Manual 2009). Bu, en küçük ölçü artımının 0.036 derece olduğu anlamına gelir. Modüller üzerinde servo motorlar dişli kutusu olmadan kullanıldığı için modüllerin açısal çözünürlüğü de 0.036 derece olmaktadır.

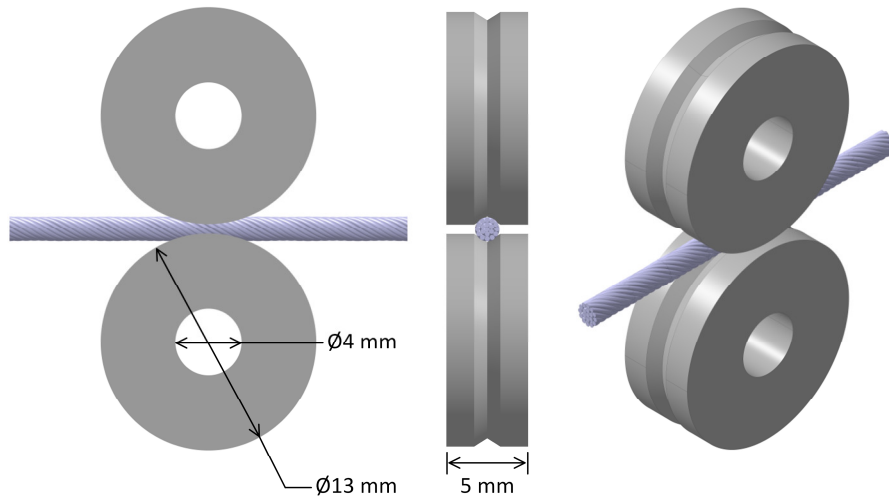
Gelecekte, bu tezde sunulan iki serbestlik dereceli düzlemsel robotik kola uygulanan yer çekimsel tork karşı-dengeleme yönteminde kullanılan matematiksel ve fiziksel prensipler, on modüllü hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robotik kolun karşı-dengelemesi için kullanılacaktır. Bu manipülatör, bir serbestlik dereceli düzlemsel uzuvlar uç uca eklenerek Şekil 3.18'deki gibi elde edilecektir. Bunun yanı sıra, kontrol sistemine taşıma yükü de adapte edilecektir.



**Şekil 3.18:** On modüllü manipülatör taslağı.

Kablo ile modül içindeki kılavuz kanal arasındaki sürtünmeyi ihmal etmek, tezin bu bölümünde çalışılan iki serbestlik dereceli robot için geçerli bir varsayım olabilir. Ancak on modüllü robotik bir kol için bu sürtünme dengeleme sisteminin performansını ciddi ölçüde değiştirebilir. Bu yüzden kabloların, piyasada hazır olarak bulunan V kanallı minyatür rulmanların (V Groove Bearing 2020) arasına Şekil 3.19'daki gibi sıkıştırılarak kullanılması bu soruna bir çözüm olarak önerilebilir.

Ancak, makaralar, sonlu (sıfır olmayan) yarı çapa sahip olduğundan, dengeleme sisteminin verimini olumsuz etkileyen hata kaynaklarına dönüşebilirler. Hatanın büyüklüğü, manipülatörün ölçeğiyle doğru orantılıdır (Ebert-Uphoff ve Johnson 2002). Örneğin, dengeleme sisteminin ilk modülü E (bkz. Şekil 3.5) ve F (bkz. Şekil 3.6) noktalarına makara konularak inşa edilseydi, çelik halatın |CE'| (bkz. Şekil 3.5) ve |FG'| (bkz. Şekil 3.6) bölümleri teorik uzunluklarından sapardı. Çok küçük ölçekli makaraların (Şekil 3.19) bu sorunu azaltacağı açıktır; ancak bu kez de makara shaftının ağır yük altında eğilme sorunu ortaya çıkacaktır. Bu nedenle yukarıdaki faktörler göz önünde bulundurularak en uygun çözüm bulunmalıdır.



Şekil 3.19: Kablo sürtünmesini azaltmak için şematik tasarım.

### 3.5 Sonuçlar

Tezin bu bölümünde sunulan karşı-dengeleme yönteminin altında yatan ana motivasyon kaynağı; daha kompakt ve hafif, daha yüksek pozisyonlama doğruluğuna sahip hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli robot kollarının uygulanabilmesidir.

Bu yüzden yöntemin test edilebilmesi adına, yaylarla karşı-dengelenmiş iki serbestlik dereceli robotik kol tasarlanıp deney düzeneği kurulmuştur. Modüller üzerindeki mafsallara bağlı her iki servo motor da dişli kutusu olmadan kullanılmıştır. Yaylar, ek servo motorlar tarafından tahrik edilen vidalı milli lineer modüllere bağlanmıştır. Çalışma alanı içerisinde modüllerin olası her konfigürasyonu için modül mafsallarına binen yer çekimsel torkun karşı-dengelenmesi için gerekli matematiksel model geliştirilmiştir. Servo motorların senkronizasyonu uzuvların her 1°'lik dönüşü için gerçekleştirilmiştir. Her bir modül eş zamanlı olarak tam yatay pozisyondan saat yönünde 25° döndürülmüştür. Kontrol işlemi; C Sharp'ta geliştirilen, iki boyutlu simülatörü de içeren kontrol yazılımı tarafından yürütülmüştür. Elde edilen deneysel bulgular, geliştirilen yöntemin hiper-gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatöre uygulanması açısından teşvik edicidir.

#### 4. KAYNAKLAR

Allison, J. T., "Plant-Limited Co-Design of an Energy-Efficient Counterbalanced Robotic Manipulator", *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 847–856, (2012).

Arakelian, V., "Gravity compensation in robotics", *Adv. Robot.*, 30 (2), 79–96, (2016).

ASDA-B Series User Manual, (15 October 2020), <https://www.deltacdrives.com/wp-content/uploads/2012/06/ASDA-B-User-Manual.pdf>, (2009).

Azadi, S., Moradi, M. and Esmaili, A., "Optimal balancing of PUMA-Like robot in predefined path", *J. Sci. Ind. Res.*, 74, 209–211, (2015).

Azariadis, P.N. and Aspragathos, N.A., "Obstacle representation by Bump-surfaces for optimal motion-planning", *Rob. Auton. Syst.*, 51, 129–150, (2005).

Ball Screw THK General Catalog, (15 October 2020), [https://tech.thk.com/en/products/pdf\\_download.php?file=511E\\_15\\_BallScrew.pdf](https://tech.thk.com/en/products/pdf_download.php?file=511E_15_BallScrew.pdf).

Barajas, J. C. and Paz, R. A., "Autobalancing a generalized gravity equilibrator", *Int. J. Dyn. Control*, 4, 515–526, (2016).

Brown, H. B., Schwerin, M., Shammas, E. and Choset, H., "Design and control of a second-generation hyper-redundant mechanism", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, USA*, 2603–2608, (2007).

Bulut, Y. and Conkur, E. S., "A real-time path-planning algorithm with extremely tight maneuvering capabilities for hyper-redundant manipulators", *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, doi: 10.1016/j.jestch.2020.07.002, (2020).

Burhanuddin, L.A., Islam, M.N. and Yusof, S.M., "Evaluation of Collision Avoidance path planning Algorithm", *Int. Conf. Res. Innov. Inf. Syst.*, 360–365, (2013).



Cambera, J. C. and Feliu-Batlle, V., "Feedback Linearizing Controller for a Single Link Flexible Arm with a Passive Gravity Compensation Mechanism", *IEEE Int. Conf. Intell. Robot Syst.*, Spain, 6404–6410, (2018).

Carricato, M. and Gosselin, C., "A statically balanced Gough/Stewart-type platform: Conception, design, and simulation", *J. Mech. Robot.*, 1, 1–16, (2009).

Chiacchio, P., Chiaverini, S., Sciavicco, L. and Siciliano, B., "Closed-Loop Inverse Kinematics Schemes for Constrained Redundant Manipulators with Task Space Augmentation and Task Priority Strategy", *Int. J. Rob. Res.*, 10 (4), 410–425, (1991).

Chiang, W. H. and Chen, D. Z., "Design of planar variable-payload balanced articulated manipulators with actuated linear ground-adjacent adjustment", *Mech. Mach. Theory*, 109, 296–312, (2017).

Chirikjian, G. S. and Burdick, J. W., "An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 625–631, (1990).

Cho, C. and Kim, S., "Static balancer for the neck of a face robot", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 228 (3), 561–568, (2014).

Choset, H. and Henning, W., "A Follow-the-Leader Approach to Serpentine Robot Motion Planning", *J. Aerosp. Eng.*, 12 (2), 65–73, (1999).

Chu, Y. L. and Kuo, C. H., "A single-degree-of-freedom self-regulated gravity balancer for adjustable payload", *J. Mech. Robot.*, 9, 1–8, (2017).

Ciupitu, L., "Active Static Balancing of Mechatronic Systems - An Overview", *Appl. Mech. Mater.*, 811, 253–259, (2015).

Collins, T. and Shen, W.-M., "PASO: An Integrated, Scalable PSO-based Optimization Framework for Hyper-Redundant Manipulator Path Planning and Inverse Kinematics", *Information Sciences Institute Technical Report*, (2016).

Conkur, E. S., "Path following algorithm for highly redundant manipulators", *Rob. Auton. Syst.*, 45, 1–22, (2003).

Conkur, E. S., "Path planning using potential fields for highly redundant manipulators", *Rob. Auton. Syst.*, 52, 209–228, (2005).

Conkur, E. S. and Buckingham R., "Clarifying the definition of redundancy as used in robotics", *Robotica*, 15, 583–586, (1997<sup>a</sup>).

Conkur, E. S. and Buckingham, R., "Manoeuvring highly redundant manipulators", *Robotica*, 15, 435–447, (1997<sup>b</sup>).

Conkur, E. S., Buckingham, R. and Harrison, A., "The beam analysis algorithm for path planning for redundant manipulators", *Mechatronics*, 15, 67–94, (2005).

Çonkur, E. S. and Tola, A. T., "Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Robotların (Redundant Robots) Bir Ürün Olarak Geliştirilmesi", *104M260 numaralı Tübitak Kariyer Projesi*, (2008).

Das, P. K., Behera, H.S. and Panigrahi, B. K., "Intelligent-based multi-robot path planning inspired by improved classical Q-learning and improved particle swarm optimization with perturbed velocity", *Eng. Sci. Technol. an Int. J*, 19, 651–669, (2016).

De Maeyer, J., Versteyhe, M. and Demeester, E., "Sampling-based Tube Following for Redundant, Planar Robotic Manipulators", *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom.*, 752–758, (2018).

Ebert-Uphoff, I. and Johnson, K., "Practical considerations for the static balancing of mechanisms of parallel architecture", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-body Dyn.*, 216, 73–85, (2002).

Graham, A. and Buckingham, R., "Real-time collision avoidance of manipulators with multiple redundancy", *Mechatronics*, 3 (1), 89–106, (1993).

Gosselin, C. M., "Adaptive robotic mechanical systems: A design paradigm", *J. Mech. Des. Trans. ASME*, 128, 192–198, (2006).

Herder, J. L., "Energy-free Systems. Theory, conception and design of statically balanced spring mechanisms", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Delft, (2001).

Hirose, S., "Design of Hyper-Redundant Arm", (eds: G. Giralt and G. Hirzinger), *Robotics Research, The Seventh International Symposium*, 548–557, (1996).

Hirose, S., Ishii, T. and Haishi, A., "Float Arm V: Hyper-redundant manipulator with wire-driven weight-compensation mechanism", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1, 368–373, (2003).

Islam, M.N., "Implementation of a New Backtrack Free Path Planning Algorithm for Manipulators", Ph.D Thesis, *University of Fukui*, Fukui, (2008).

Islam, M.N., Tamura, S., Murata, T. and Yanase, T., "Evaluation of a New Backtrack Free Path Planning Algorithm for Manipulators", *IEEJ Trans. Electron. Inf. Syst.*, 128, 1293–1302, (2008).

Jamali, A., Khan, M.R., Osman, M.S., Rahman, M.M., Ashari, M.F., Jamaludin, M.S. and Junaidi, E., "Collision Free Control of Variable Length Hyper Redundant Robot Manipulator", *Appl. Mech. Mater.*, 541–542, 1107–1114, (2014).

Kawamura, A., Hisatsune, T., Matsusaka, K., Uemura, M. and Kawamura S., "Adaptive motion control of a robotic arm with movable counterweights", *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, France, 882–887, (2014).

Keller, D., Perrot, Y., Gargiulo, L., Friconneau, J. P., Bruno, V., Le, R., Soler, B., Itchah, M., Ponsort, D., Chambaud, P., Bonnemason, J., Lamy, S. and Measson, Y., "Demonstration of an ITER relevant remote handling equipment for Tokamak close inspection", *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, France 1495–1500, (2008).

Khatib, O., "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 5, 500–505, (1985).

Kim, H. S. and Song, J. B., "Low-cost robot arm with 3-DOF counterbalance mechanism", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 4183–4188, (2013).

Kim, H. S. and Song, J. B., "Multi-DOF counterbalance mechanism for a service robot arm", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 19 (6), 1756–1763, (2014).

Klimchik, A., Pashkevich, A., Caro, S. and Furet, B., "Calibration of industrial robots with pneumatic gravity compensators", *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, Germany, 285–290, (2017).

Lacasse, M. A., Lachance, G., Boisclair, J., Ouellet, J. and Gosselin, C., "On the design of a statically balanced serial robot using remote counterweights", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 4189–4194, (2013).

Latombe, J.-C., *Robot Motion Planning*, Springer US, (1991).

Lauzier, N., Gosselin, C., Laliberté, T. and Tremblay, P., "Adaptive gravity compensation of decoupled parallel and serial manipulators using a passive hydraulic transmission", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 223, 2871–2879, (2009).

Lian, B., Sun, T., Song, Y. and Wang, X., "Passive and active gravity compensation of horizontally-mounted 3-R P S parallel kinematic machine", *Mech Mach Theory*, 104, 190–201, (2016).

Liang, T.-C. and Liu, J.-S., "An improved trajectory planner for redundant manipulators in constrained workspace", *J. Robot. Syst.*, 16 (6), 339–351, (1999).

Ma, S., "A balancing technique to stabilize local torque optimization solution of redundant manipulators", *J. Robot. Syst.*, 13 (3), 177–185, (1996).

Ma, S., Hirose, S. and Yoshinada, H., "Development of a hyper-redundant multijoint manipulator for maintenance of nuclear reactors", *Adv. Robot*, 9 (3), 281–300, (1994).

Ma, S. and Konno, M., "Obstacle avoidance scheme for hyper-redundant manipulators - global motion planning in posture space", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 161–166, (1997).

Martini, A., "Gravity compensation of a 6-UPS parallel kinematics machine tool through elastically balanced constant - force generators", *FME Trans.*, 46, 10–16, (2018).

Martini, A., Troncossi, M. and Rivola, A., "Algorithm for the static balancing of serial and parallel mechanisms combining counterweights and springs: Generation, assessment and ranking of effective design variants", *Mech. Mach. Theory*, 137, 336–354, (2019).

McLean, A. and Cameron, S., "Snake-based path planning for redundant manipulators", *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 275–282, (1993).

McLean, A. and Cameron, S., "The virtual springs method: Path planning and collision avoidance for redundant manipulators", *Int. J. Rob. Res.*, 15, 300–319, (1997).

- Miao, Y., Gao, F. and Zhang, Y., "Gait fitting for snake robots with binary actuators", *Sci. China Technol. Sci.*, 57 (1), 181–191, (2014).
- Morita, T., Kuribara, F., Shiozawa, Y. and Sugano, S., "A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space", *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, 1, 163–168, (2003).
- Nakamura, Y., *Advanced robotics: redundancy and optimization*, Addison-Wesley Publishing Company, (1991).
- Nguyen, V. L., Lin, C. Y. and Kuo, C. H., "Gravity compensation design of planar articulated robotic arms using the gear-spring modules", *J. Mech. Robot.*, 12, 1–11, (2020).
- Reznik, D. and Lumelsky, V., "Sensor-based motion planning in three dimensions for a highly redundant snake robot", *Adv. Robot.*, 9 (3), 255–280, (1994).
- Samadi, M. and Othman, M. F., "Global path planning for autonomous mobile robot using genetic algorithm", *International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*, 726-730, (2013).
- Schilling, R. J., Read, R., Lovass-nagy, V. and Walker, G., "Path tracking with the links of a planar hyper- redundant robotic manipulator", *J. Robot. Syst.*, 12 (3), 189–197, (1995).
- Seereeram, S. and Wen, J. T., "A Global Approach to Path Planning for Redundant Manipulators", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 11, 152–160, (1995).
- Shamir, T., "The Singularities of Redundant Robot Arms", *Int. J. Rob. Res.*, 9 (1), 113–121, (1990).
- Srinivasan, B., Pather, S., Hill, R., Ansari, F. and Niehaus, D., "A firm real-time system implementation using commercial off-the-shelf hardware and free software", *Fourth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium Proceedings*, 112-119, (1998).
- Takahashi, O. and Schilling, R. J., "Motion planning in a plane using generalized Voronoi diagrams", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 5 (2), 143–150, (1989).
- Takesue, N., Ikematsu, T., Murayama, H. and Fujimoto, H., "Design and prototype of Variable Gravity Compensation Mechanism (VGCM)", *J. Robot. Mechatronics*, 23 (2), 249–257, (2011).

Tang, L., Wang, J., Zheng, Y., Gu, G., Zhu, L. and Zhu, X., "Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 14, 1–12, (2017).

Tang, L., Zhu, L. M., Zhu, X. and Gu, G., "A Serpentine Curve Based Motion Planning Method for Cable-Driven Snake Robots", *25th Int. Conf. Mechatronics Mach. Vis. Pract.*, 5–10, (2018).

Tang, L., Zhu, L. M., Zhu, X. Y. and Gu, G. Y., "Confined spaces path following for cable-driven snake robots with prediction lookup and interpolation algorithms", *Sci. China Technol. Sci.*, 63 (2), 255-264, (2020).

Tappe, S., Pohlmann, J., Kotlarski, J. and Ortmaier, T., "Optimization Strategies for Task Specific Path-Following Capabilities of a Binary Actuated Snake-Like Robot using Follow-The-Leader Control", *IEEE Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, 1574–1581, (2017).

Tappe, S., Pohlmann, J., Kotlarski, J. and Ortmaier, T., "Towards a follow-the-leader control for a binary actuated hyper-redundant manipulator", *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 3195–3201, (2015).

Ulrich, N. and Kumar, V., "Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1536–1541, (1991).

Van Den Berg, J., Ferguson, D. and Kuffner, J., "Anytime path planning and replanning in dynamic environments", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, 2366-2371, (2006).

van Dorsser, W. D., Barents, R., Wisse, B. M. and Herder, J. L., "Energy-Free Adjustment of Gravity Equilibrators With Application in a Mobile Arm Support", *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, USA, 591–599, (2006).

van Dorsser, W. D., Barents, R., Wisse, B. M. and Herder, J. L., "Gravity-balanced arm support with energy-free adjustment", *J. Med. Devices, Trans. ASME*, 1, 151–158, (2007).

Wei, C. C. and Lai, R. S., "Kinematical analyses and transmission efficiency of a preloaded ball screw operating at high rotational speeds", *Mech. Mach. Theory*, 46, 880–898, (2011).

Wu, B., Zeng, L., Zheng, Y., Zhang, S., Zhu, X. and Xu, K., "A closed-loop controller for cable-driven hyper-redundant manipulator with joint angle sensors", *IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics*, China, 2433–2438, (2019).

Wu, Q., Wang, X. and Du, F., "Development and analysis of a gravity-balanced exoskeleton for active rehabilitation training of upper limb", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 230 (20), 3777–3790, (2016).

Wunderlich, J.T., "Simulating a robotic arm in a box: Redundant kinematics, path planning, and rapid prototyping for enclosed spaces", *Simulation*, 80 (6), 301–316, (2004).

Xie, H., Wang, C., Li, S., Hu, L. and Yang, H., "A geometric approach for follow-the-leader motion of serpentine manipulator", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 16, 1–18, (2019).

Yamamoto, R., Hirakawa, A. and Horikawa, O., "Load balancer with automatic lifting force compensation", *ABCM symposium series in mechatronics*, 4, 580–589, (2010).

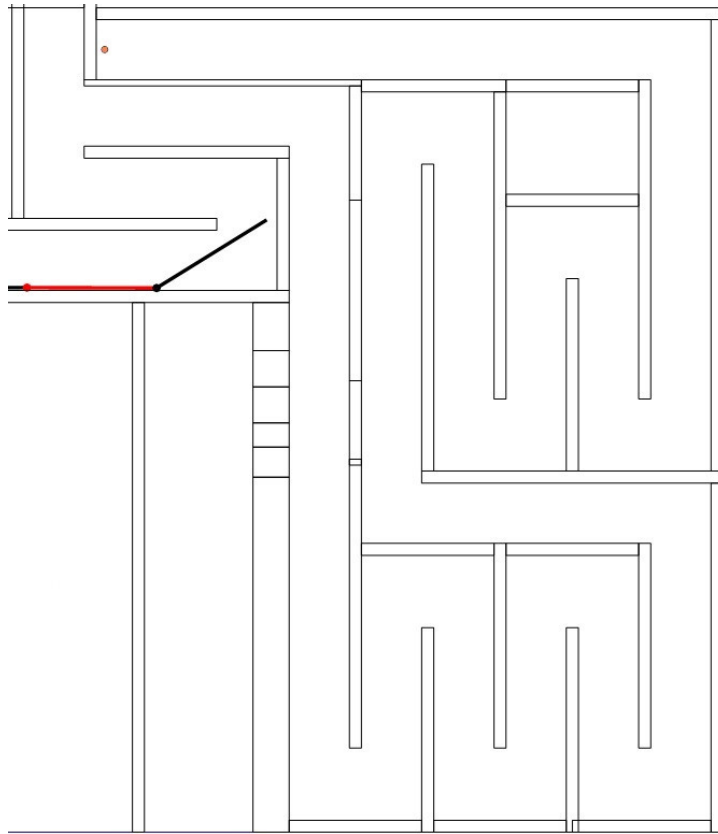
Yang, T., Yan, S. and Han, Z., "Nonlinear model of space manipulator joint considering time-variant stiffness and backlash", *J. Sound Vib.*, 341, 246–259, (2015).

V Groove Bearing, (15 October 2020), <https://www.vxb.com/4mm-Bore-Bearing-with-13mm-Pulley-V-Groove-Track-p/v-groove-4x13x5.htm>.

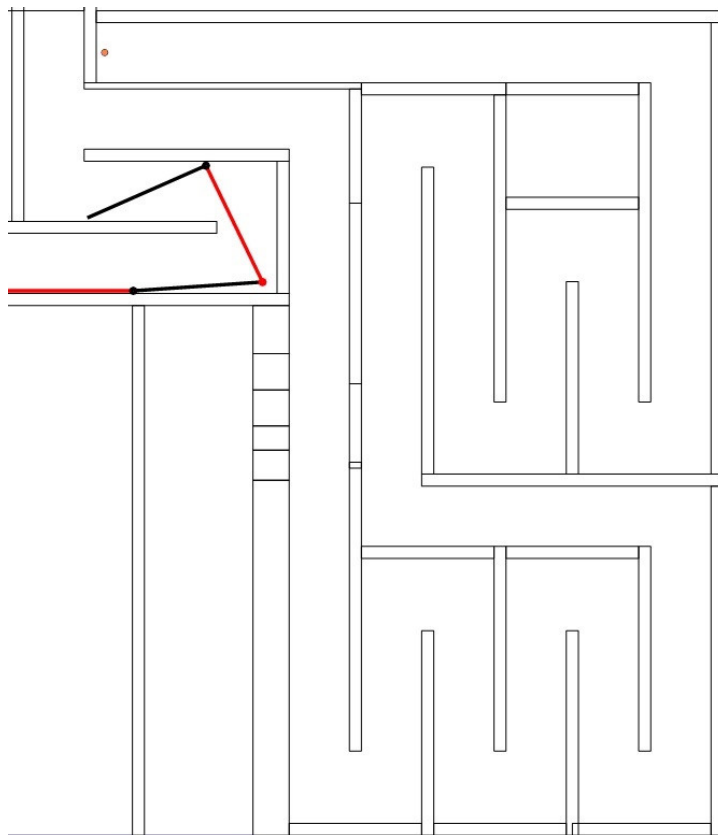
# **EKLER**







(b)



(c)





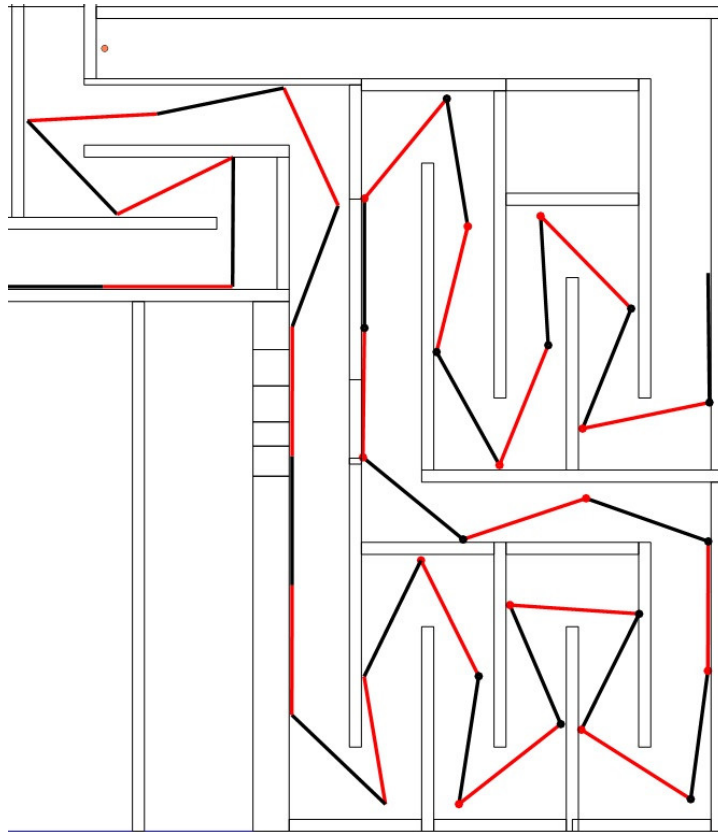




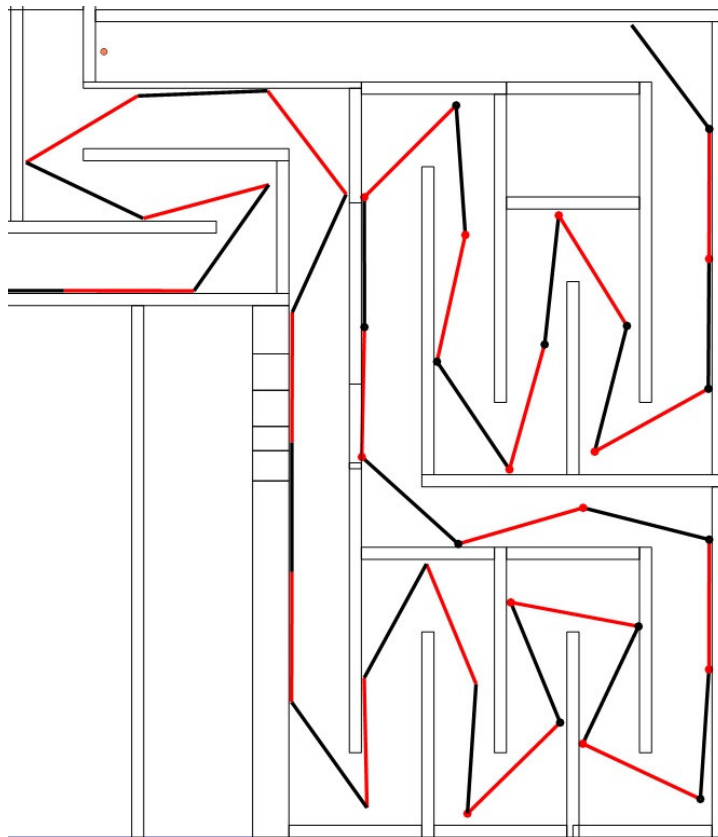




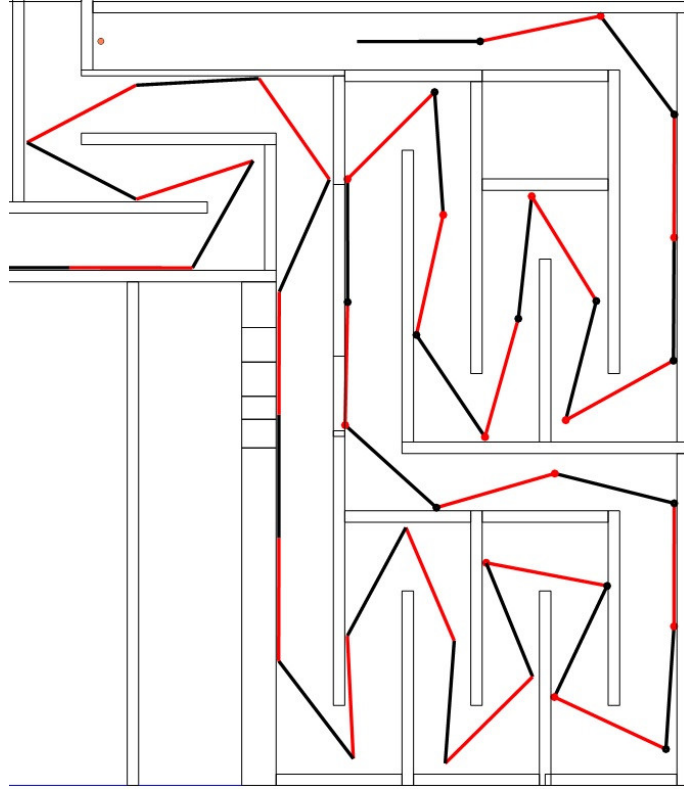




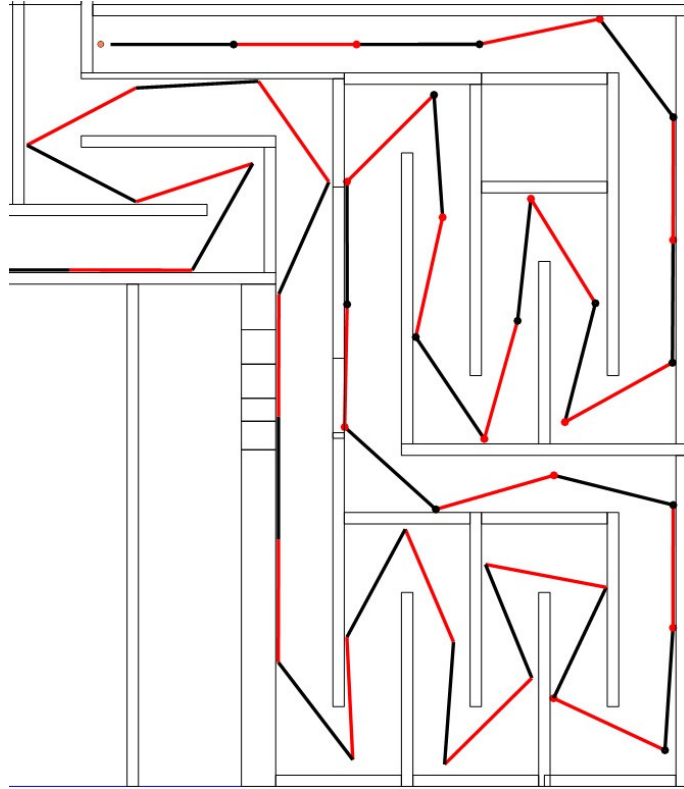
(p)



(r)



(s)



(ş)

Şekil A.1a-ş: Manipulatörün kademeli ilerleyişi

## 6. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:Yalçın BULUT
Doğum Yeri ve Tarihi	:Adana / 05.01.1987
Lisans Üniversite	:Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
Y. Lisans Üniversite	:Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik posta	:ybulut@pau.edu.tr
İletişim Adresi	:Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

### **Yayın Listesi**

:

- Bulut, Y. and Conkur, E. S., "A real-time path-planning algorithm with extremely tight maneuvering capabilities for hyper-redundant manipulators", *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, doi: 10.1016/j.jestch.2020.07.002, (2020).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SCI-Expanded dergide bu tezin ikinci bölümünden yayınlanan makaledir.