

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

**YILAN TİPİ ROBOT TASARIMI, PROTOTİPİ VE YÖRÜNGE  
ANALİZİ**

**Hazırlayan  
Ebubekir YAŞAR**

**Danışman  
Prof. Dr. Şahin YILDIRIM**

**Doktora Tezi**

**Ağustos 2016  
KAYSERİ**



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

**YILAN TİPİ ROBOT TASARIMI, PROTOTİPİ VE YÖRÜNGE  
ANALİZİ  
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan  
Ebubekir YAŞAR**

**Danışman  
Prof. Dr. Şahin YILDIRIM**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından  
FDK-2014-5143 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2016  
KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Ebubekir YAŞAR

İmza :



## YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Yılan Tipi Robot Tasarımı, Prototipi ve Yörünge Analizi” adlı ~~Yüksek Lisans~~ / Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Hubekir YAŞAR

Danışman

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Neçdet ALTUNTOP

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM danışmanlığında Ebubekir YAŞAR tarafından hazırlanan “Yılan Tipi Robot Tasarımı, Prototipi ve Yörünge Analizi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

22/08/2016

(Tez savunma sınav tarihi yazılacaktır.)

### JÜRİ:

Danışman :Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Üye :Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI

Üye :Prof. Dr. İbrahim UZMAY

Üye :Doç. Dr. Mete KALYONCU

Üye :Doç. Dr. İkbâl ESKİ







### ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 05/09/2016 tarih ve 2016/39-17 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



05/09/2016

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bilimsel katkı, teővik ve yönlendirmeleriyle beni aydınlatan, yakın ilgi ve alakasını sabır ve hoőgörülü anlayıőla hiçbir zaman esirgemeyen, benim bu günlere gelmemde büyük katkı sahibi sayın hocam Prof. Dr. şahin YILDIRIM'a teőekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalıőmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK-2014-5143) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalıőmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme de en içten teőekkürlerimi sunarım.

Ebubekir YAŞAR

Kayseri, Ağustos 2016

# YILAN TİPİ ROBOT TASARIMI, PROTOTİPİ VE YÖRÜNGE ANALİZİ

Ebubekir YAŞAR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Lisans Tezi, Ağustos 2016

Danışman: Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

## ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte otonom robotların, günlük hayatta farklı birçok alanda problemlerin çözümünde kullanımı giderek artmaktadır. Mobil robotlar içerisinde yılanı robotlar üstün hareket kabiliyetleri ile ön plana çıkmaktadır. Kara, hava ve su içerisinde birçok zorlu ortamda tekerlekli veya bacaklı robotlara göre daha etkin hareket edebilmektedirler. Yılanı robotlar büyük engellerin üzerinde, dar ve düzgün olmayan menfezlerde, su içinde ve çöl kumunda kolay ilerleyebilmektedir. Yılanı robotlar tüm bu zorlu hareketleri temelde sinüzoidal S hareketi ile yapmaktadır.

Yılanı robotlar kısıtlamasız ve hızlı hareket edebilmeleri için geniş alanlara ihtiyaç duymaktadır. Yılanı robotların en kısa sürede hedefe gitmeleri matematiksel olarak bulunan en kısa yol üzerinde her zaman mümkün olmamaktadır. Çünkü genliği büyük S hareketi yılanı robotları daha hızlı yapmaktadır. Bu yüzden yılanı robotlarda hareket planlama işlemi, ortamda geniş alanların belirlenmesi üzerinden yapılmıştır.

Literatürde yer alan, hareket planlama tekniklerinden hiç birisi ortamdaki geniş alanları hesaba katarak bir yol bulamamaktadır. Bu nedenle problemi çözmek için yılanı robotun hızına katkı sağlayacak geniş alanları bulabilen nesne tabanlı programlama temelli bir algoritma geliştirilmiştir. Nesnelere kendi durumunu değişkenlerinde saklayan ve davranışlarını metotlarla gerçekleştiren program yapılarıdır. Her bir nesne, arka planda program bloğuna sahip olduğundan, bu algoritmaya akıllı nesnelere algoritması denilmiştir.

Algoritmanın bulunduğu yollar üzerinde yılanı robot koşturularak belirlenen yolları en kısa sürede alıp almadığı saptanmaya çalışılmıştır. Deneyler sonunda bulunan yolun sabit genlik hareketine göre daha kısa sürede alındığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yılanı robotlar, hareket planlama, yörünge analizi, akıllı nesnelere algoritması.

**SNAKE-LIKE ROBOT DESIGN, PROTOTYPE AND ANALYSIS OF  
TRAJECTORY**

**Ebubekir YAŞAR**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**M.Sc. Thesis, August 2016**

**Supervisor: Prof. Dr. Şahin YILDIRIM**

**ABSTRACT**

Today, mobile robots fulfill many tasks covering a wide range of applications. Although they have no arms and legs, snake-like robots can make functional movements such as swimming and climbing. Snake-like robots, can pass through obstacles higher than their necks. This movement is difficult for legged and wheeled robots. Snake-like robots can move on narrow and uneven culverts, sand, soil in plowed fields. Snake-like robots are essentially use to perform with all these movements, sinusoidal S movement.

Legged and wheeled robots, they go as soon as possible to the shortest distance away from obstacles. But snake-like robots cannot take the shortest distance at any time soon. Snake-like robots because they need large areas to move quickly. All methods in the literature finds the shortest path from the starting point to the end point, but this is not meant to be taken as soon as for snake-like robots. Snake-like robots must have the largest possible area as soon as possible in order to get the distance. These large areas, allow large amplitude motion for the snake-like robots. An algorithm has been developed using object oriented programming techniques to find large areas. An object stores its state in fields and exposes its behavior through methods. Methods operate on an object's internal state and serve as the primary mechanism for object-to-object communication. Developed algorithm is called “intelligent objects algorithm”.

In this study, in the environment where the obstacles, the fastest path between the start and finish points were studied to determine. It is found a path as it is determined possible large areas by helping improved the intelligent object algorithm. According to the experimental results, it was observed that the robot get longer distance in a shorter time.

**Keywords:** Snake-like robots, motion planning, trajectory analysis, intelligent objects algorithm.

## İÇİNDEKİLER

<b>BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK</b> .....	<b>I</b>
<b>YÖNERGEYE UYGUNLUK</b> .....	<b>II</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>KISALTMALAR VE SİMGELER</b> .....	<b>XIII</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>XVI</b>
<b>ŞEKİLLER TABLOSU</b> .....	<b>XVII</b>
<b>GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>1. BÖLÜM</b> .....	<b>5</b>
<b>YILANSI ROBOTLAR</b> .....	<b>5</b>
<b>2. BÖLÜM</b> .....	<b>13</b>
<b>YILANSI HAREKET ÇEŞİTLERİ</b> .....	<b>13</b>
2.1. Yanal Dalgalanma(Lateral Undulation/Serpentine).....	15
2.2. Doğrusal Hareket(Rectilinear Locomotion).....	16
2.3. Concertina Hareket.....	17
2.4. Yan Yan Hareket(Sidewinding Locomotion) .....	18
2.5. Sinüs Kaldırma(Sinus-Lifting).....	19

2.6. Robot Kontrol Tipleri.....	20
2.6.1. Manuel Yolla Kontrol Tipi .....	20
2.6.2. Model Tabanlı Kontrol Tipi .....	21
2.6.3. Sinüs Tabanlı Kontrol Tipi .....	21
2.6.4. CPG(Merkezi Desen Üretici) Tabanlı Kontrol Tipi.....	23
<b>3. BÖLÜM.....</b>	<b>25</b>
<b>YILANSI ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ .....</b>	<b>25</b>
3.1. Yılsanı Robot Kinematığı .....	25
3.2. Yılsanı Robot Dinamiğı .....	32
3.2.1. Lagrange Metodu .....	34
3.2.2. Düz Dinamik .....	39
3.2.3. Ters Dinamik.....	39
<b>4. BÖLÜM.....</b>	<b>42</b>
<b>HAREKET PLANLAMA.....</b>	<b>42</b>
4.1. Hareket Planlamaya Giriş .....	42
4.1.1. Yapılandırma Alanı.....	43
4.2. Hareket Planlama Teknikleri.....	45
4.2.1. Yol Haritası Metotları .....	45
4.2.2. Potansiyel Alan Metotları .....	48

4.2.3. Tam Hücre Ayırıştırma Yöntemleri .....	49
4.2.4. Tahmini Hücre Ayırıştırma Yöntemi .....	50
4.2.5. Örnekleme Tabanlı Algoritmalar .....	51
4.3. Hareket Planlama Tekniklerinin Genel Olarak Değerlendirilmesi .....	54
<b>5. BÖLÜM.....</b>	<b>55</b>
<b>AKILLI NESNELER ALGORİTMASI .....</b>	<b>55</b>
5.1. Akıllı Nesne Yapısı .....	55
5.1.1. Nesne Özellikleri.....	56
5.1.2. Nesne Olayları.....	57
5.2. Algoritma Adımları .....	57
5.3. Akıllı Nesnelere Algoritmasının Avantajları .....	63
5.4. Yılsansız Robotlar İçin Hareket Planlama .....	66
5.4.1. Hareket Planlama Adımları.....	66
<b>6. BÖLÜM.....</b>	<b>70</b>
<b>YILANSIZ ROBOT PARAMETRELERİ VE EKLEM SAYILARININ BELİRLENMESİ.....</b>	<b>70</b>
6.1. Yılsansız Robotların Kararlılığı .....	70
6.2. Hız – Eklem İlişkisi.....	71
6.3. Genlik - Hız İlişkisi.....	72

6.4. Şekil Almada Boyut Kısıtlaması.....	73
6.5. Yılsanı Robot Eklem Sayısı .....	74
<b>7. BÖLÜM.....</b>	<b>76</b>
<b>YILANSI ROBOT.....</b>	<b>76</b>
7.1. Robot Kasası .....	76
7.2. Servo Motorlar .....	81
7.2.1. Motor-Bilgisayar Bağlantı Arayüzü.....	84
7.2.2. Motor Güç Devresi.....	85
7.2.3. Motor Bağlantı Kabloları .....	85
7.3. Sistem Düzeneği.....	86
7.4. Engeller .....	86
7.5. Bilgisayar .....	86
7.6. Yılsanı Robot .....	87
7.7. Resimlerin Elde Edilmesi.....	87
7.8. Renkli Resimlerin Gri Seviyeye Çevrilmesi .....	88
7.9. Filtreleme İşlemleri .....	89
7.10. Yarı Eşik Değer.....	91
7.11. Çok Bantlı Eşik Değer .....	92
7.12. Ağırlık Merkezlerinin Bulunması .....	94

<b>8. BÖLÜM.....</b>	<b>96</b>
<b>DENEYLER .....</b>	<b>96</b>
8.1. Ortamın Hazırlanması .....	96
8.1.1. Taban ve Yan Sergisi .....	97
8.1.2. Renklendirmeler .....	98
8.1.3. Aydınlatma .....	99
8.2. Gerçek zamanlı engel belirleme .....	100
8.3. Yörünge Belirlenmesi .....	101
8.4. Yılsan Robotun Yörüngeyi İzlemesi .....	103
8.5. Frekans-Konum İlişkisi .....	105
8.6. Frekans-Hız İlişkisi .....	109
8.7. Akıllı Nesnelere Algoritması Uygulaması .....	111
8.7.1. Genlik ve Hız İlişkisi .....	111
8.7.2. Engelli Ortamda Hareket .....	112
8.7.3. Bilgisayar Benzetimi .....	113
<b>9. BÖLÜM.....</b>	<b>116</b>
<b>TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>116</b>
<b>KAYNAKÇALAR.....</b>	<b>119</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>127</b>

EK 1. Servo Motorlara Ait Parametreler.....	127
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>129</b>



## KISALTMALAR VE SİMGELER

$\Theta$	:Bükülme açısı
A	:S sinüzoidal şeklin genliği
$K_n$	:S sinüzoidal dalga sayısı
L	:Toplam yilansı robot uzunluğu
n	:Yilansı robot eklem sayısı
$\alpha$	:Başlangıç dalgalanma açısı
M	:Toplam kütle
$X_c, Z_c$	:Ağırlık merkezi koordinatları
$x_{ci}, z_{ci}$	:i. bağlantıya ait yerçekimi merkezlerinin konum
$\mu$	:Sürtünme katsayısı
$M\ddot{X}_c, M\ddot{Z}_c$	:x ve z eksenleri boyunca atalet kuvvetleri
q	:Genelleştirilmiş koordinatlar
$f_{xi}$	:Sürtünme kuvveti
$N_{zi}$	:Yardımcı kuvvet
K	:Kinetik enerji
V	:Potansiyel enerji
M	:Pozitif simetrik atalet matrisi
H	:Merkezkaç ve Coriolis terimleri matrisi

$F$	:Sürtünme kuvvetleri matrisi
$B$	:Sabit matris
$G$	:Potansiyel enerji matrisi
$S$	:Yardımcı kuvvetler matrisi
$T$	:Giriş torqu matrisi
$q, \dot{q}, \ddot{q}$	:Genelleştirilmiş koordinatlar matrisi ve onların türevleri
$\tau_i$	:Eklem torqları
$\ddot{\theta}_i$	:Baş eklemın açısıl ivmesi
$\ddot{r}_b$	:Baş eklemın ivmesi
$\dot{\theta}_1$	:Baş eklemın açısıl hızı
$R(q)$	:Serbest yapılandırma alanı kümesi
$x_a$	:Ağırlık merkezının x eksenini kestiği nokta
$y_a$	:Ağırlık merkezının y eksenini kestiği nokta
$x_c$	:Pikselin x koordinatı
$y_c$	:Pikselin y koordinatı
$p$	:Piksel sayısı
$x_1, y_1$	:Başlangıç noktası koordinatları
$x_2, y_2$	:Hedefnoktası koordinatları
$m$	:Doğrunun eğimi

$m_m$	:Dik doğru eğimi
$M_u$	:Her bir sinüzoidal S dalga başına düşen eklem sayısı
$R_x, G_x, B_x$	:Pikselin kırmızı, yeşil, mavi değerleri
$a(x)$	:Kaynak resim
$b(x)$	:Eşik değer resim
$m_1$	:Robot gövdesinin doğrultusuna ait eğim
$m_2$	:Yörüngeye ait eğim
$e$	:Hata( $m_2-m_1$ ) değeri
$K_p$	:Oransal kazanç
$K_i$	:İntegral etki kazancı
$K_d$	:Türev etki kazancı

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Yılınsı robotların sınıflandırılmaları ve önemli parametreleri .....	10
Tablo 3.1. Yılınsı robota ait DH parametreleri.....	27
Tablo 8.1. PVC üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi.....	105
Tablo 8.2. Beton karo üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi.....	106
Tablo 8.3. Halı üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi.....	107
Tablo 8.4. Doğal çim üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi.....	108
Tablo 8.5. Simülasyona ait parametreler.....	114

## ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 1.1. Hirose'ye ait yılanı robotlara ait resimler(ACM serisi) .....	7
Şekil 1.2. CMU'ya ait yılanı robot .....	8
Şekil 1.3. Amphibot serisi amfibik yılanı robotlar .....	9
Şekil 1.4. Serpentine tipi yılanı robotlar.....	10
Şekil 1.5. MTRAN III modüler robota ait varyasyonları.....	11
Şekil 1.6. Modüler robotların sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.1. Sinüzoidal S biçiminde gerçek bir yılan( <a href="http://pngimg.com">http://pngimg.com</a> ).....	13
Şekil 2.2. Gerçek yılanı ait iskelet yapısı( <a href="http://paoloviscardi.com">paoloviscardi.com</a> ) .....	14
Şekil 2.3. Yanal dalgalanma hareket biçimi ve bileşenleri .....	16
Şekil 2.4. Doğrusal harekette kas davranışları(Oleg Shmakov) .....	17
Şekil 2.5. Concertina hareket adımlarının yayınıcı.....	18
Şekil 2.6. Çölde yan yan hareket(Jason Jones/ <a href="http://gettyimages.com">gettyimages.com</a> ).....	19
Şekil 2.7. Yan yan hareket adımları(How snakes move).....	19
Şekil 2.8. Sinüs kaldırma hareket biçimi (Oleg Shmakov/BBC WorldWide).....	20
Şekil 2.9. S hareket biçimi parametreleri a) açılar b) dalga biçimi.....	22
Şekil 3.1. N eklemlı iki eksenli bir robotun kinematik parametreleri.....	27
Şekil 3.2. N eklemlı yılanı robot ve kinematik bileşenleri .....	29
Şekil 3.3. Yılanı robota ait dinamik denklemde kullanılan parametreler .....	33

Şekil 4.1. Yapılandırma alanı( $C_{free}$ ) .....	45
Şekil 4.2. Görünürlük grafik metodunda hareket planlama .....	46
Şekil 4.3. Genelleştirilmiş çokgen yapı.....	47
Şekil 4.4. Voronoi diyagram yapısı.....	47
Şekil 4.5. Voronoi hücreleri ile engelden uzak hedef bulma .....	48
Şekil 4.6. Potansiyel alan gösterimi .....	49
Şekil 4.7. Tam hücre ayrıştırma yöntemi yapısı .....	50
Şekil 4.8. Tahmini hücre ayrıştırma yöntemi.....	51
Şekil 4.9. Olasılıklı Yol Haritası metoduna ait hedef bulma adımları .....	52
Şekil 4.10. Hızlı Rastgele Ağaç Tarama metodu ile hedef bulma adımları .....	53
Şekil 5.1. Akıllı nesnelere algoritmasına ait bileşenler.....	56
Şekil 5.2. Engeller ve başlangıç varış noktaları .....	58
Şekil 5.3. Nesnelere ortama yerleştirilmesi .....	58
Şekil 5.4. Nesnelere olası hareket yolları .....	59
Şekil 5.5. Nesnelere engeller üzerindeki hareketlerinin tamamlaması.....	60
Şekil 5.6. Birbirini gören nesnelere belirlenmesi .....	61
Şekil 5.7. Nesnelere birbirini görmesi durumunu belirlemede kullanılan hayali doğrular.	61
Şekil 5.8. Engelden uzak yol için nesnelere belirlenmesi.....	62
Şekil 5.9. Engelden uzak yolun belirlenmesi .....	62

Şekil 5.10. Çoklu boyutlu Akıllı Nesneler Algoritmasına ait akış diyagramı .....	63
Şekil 5.11. Genliğin hıza etkisi .....	64
Şekil 5.12. Yılsansı robot için en hızlı yol (sağda).....	65
Şekil 5.13. Araçların viraj eğrisinin nesnelere ile belirlenmesi .....	65
Şekil 5.14. Farklı sürtünme ortamlarında en güvenli yolun bulunması .....	66
Şekil 5.15. Çoklu boyut uygulamasında seçilen akıllı nesnelere ve boyutları .....	67
Şekil 5.16. Farklı boyutlarda akıllı nesnelere ortama yerleştirilmesi .....	67
Şekil 5.17. Nesnelere boyutlarının S hareket genliğine olan etkisi .....	68
Şekil 5.18. Yılsansı robot için en hızlı yol .....	68
Şekil 5.19. En kısa ve en hızlı yoldaki olası maksimum genlik genişlikleri.....	69
Şekil 6.1. Yılsansı robot için S sayısı ve kararlılık durumunun gösterilmesi.....	71
Şekil 6.2. Hız eklem ilişkisi .....	72
Şekil 6.3. Genlik – hız ilişkisi .....	72
Şekil 6.4. Eklem sayısı – boyut kısıtlaması ilişkisi.....	74
Şekil 7.1. Testlerde kullanılan ilk robot kasası çizimi.....	77
Şekil 7.2. İlk tasarlanan robot kasası montajlı hali ve deneme çalışması .....	77
Şekil 7.3. Motor gövdesi üzerine tasarlanan robot kasası.....	78
Şekil 7.4. Robot kasasına ait 2B bileşen çizimleri .....	79
Şekil 7.5. Yılsansı robot montajlı kasa ve genel görünümü .....	80

Şekil 7.6. Yılanlı robotun montajı bitmiş hali .....	80
Şekil 7.7. Servo motor bileşenleri ve redüktör yapısı .....	81
Şekil 7.8. USB2Dynamixel aparatı ve motor bağlantı şekli .....	82
Şekil 7.9. Hedef pozisyona yaklaşım aralığı ve eğrisi .....	83
Şekil 7.10. Servo motor iletim hattı .....	84
Şekil 7.11. Servomotor konektörünün pin dağılımı .....	84
Şekil 7.12. USB2Dynamixel yapısı ve aparat şekli .....	85
Şekil 7.13. Servomotor enerji besleme arayüzü.....	85
Şekil 7.14. Dynamixel motora ait kablo/konnektör yapısı.....	86
Şekil 7.15. Yılanlı robot hareket yazılım arayüzü .....	87
Şekil 7.16. Uygulamada kullanılan Logitech marka WebCamin görünümü .....	88
Şekil 7.17. Filtre işlemlerinde kullanılan resim ve filtre maskesi.....	90
Şekil 7.18. Düşük geçiren filtre çeşitleri.....	90
Şekil 7.19. Yüksek geçiren filtre çeşitleri .....	91
Şekil 7.20. Solda orijinal resim, sağda eşik değeri uygulanmış resim .....	92
Şekil 7.21. Online yılanlı robot engel tanıma yazılımı arayüzü .....	94
Şekil 7.22. Ağırlık merkezinin bileşenleri .....	95
Şekil 8.1. Yatay hareket için deney platformu .....	97
Şekil 8.2. Düşey hareket için deney platformu .....	97

Şekil 8.3. Yılsansı robot hareket robot platformunun yer sergisi.....	98
Şekil 8.4. Renk tabanlı resim algılamada ortamın iyileştirilmesi çalışması .....	99
Şekil 8.5. Uygulamada kullanılan 50W gücünde tepe aydınlatması.....	100
Şekil 8.6. Yatayda elde edilen resimde segmentasyon işlemi.....	101
Şekil 8.7. Düşeyde elde edilen resimde segmentasyon işlemi .....	101
Şekil 8.8. Akıllı nesnelere algoritması ile çoklu boyutlu hareket planlama uygulaması ve belirlenen yörünge.....	102
Şekil 8.9. Yunuslama eksenine sahip robot için engelden uzak yol belirlenmesi.....	102
Şekil 8.10. Robotun yörünge izleme yapısı .....	104
Şekil 8.11. Halı üzerinde yılsansı robota ait frekans hız ilişkisi.....	110
Şekil 8.12. Parke taş üzerinde yılsansı robota ait frekans hız ilişkisi .....	110
Şekil 8.13. Doğal çim üzerinde yılsansı robota ait frekans hız ilişkisi.....	111
Şekil 8.14. Hız-genlik ilişkisine ait uygulama .....	112
Şekil 8.15. Engelli ortamda robot hareketi( $f=1\text{Hz}$ ).....	112
Şekil 8.16. Doğrusal hıza ait engelden sakınma algoritması zaman diyagramı.....	113
Şekil 8.17. Simülasyon çalışması ve belirlenen yollar.....	114

## GİRİŞ

Günümüzde insan için çok tehlikeli ve çalışmasının mümkün olmadığı ortamlarda (sıcak, dar, kirli, sağlıksız...) özellikle mobil robotların kullanımı bir ihtiyaç olmuştur [1]. Mobil robotlara olan ihtiyaçların artmasıyla birçok alanda yılanı robotların avantajlarına ihtiyaç duyulmuştur. Yılanı robotların insansız kara, su ve hava araçları, başta askeri alanlar olmak üzere kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bacaklı ve tekerlekli robotlara nazaran engebeli karmaşık alanlarda, robot boyutlarından daha yüksek engellerin bulunduğu ortamlarda, ince dikey/dar ortamlarda, suda ve havadaki hareket kabiliyetlerinden dolayı yılanı robotlar diğer mobil robotlara göre daha avantajlıdır.

Yılanlar karada, suda ve havada sinüzoidal "S" şeklinde sinüzoidal kıvrımlar yaparak hareket edebilme kabiliyetine sahip sürüngen canlılardır. Karada kaygan zeminlerde, engebeli arazide, kum üzerinde, taş ortamlarda, kendi yüksekliğinden daha büyük nesnelerin üzerinden geçerek devrilmeden etkin hareket edebilirler. Ayrıca dik yamaçlara ve ağaçlara tırmanması, ağaçların dalları arasında birinden tutunarak diğerine geçebilmesi ile bacaklı hayvanların çoğunun veya tekerlekli mobil robotların yapamayacağı hareketleri yapmaktadırlar. Yılanlar dar alanda farklı yüksekliklerde hareket kabiliyetine sahiptirler [2]. Su içerisinde, sinüzoidal "S" hareketleri ile rahatlıkla istedikleri doğrultuda yüzebilmektedirler. Havada ise yüksek yerden kendisini bırakarak bulunduğu yerden daha uzak noktalara yatay yönde havada yine sinüzoidal "S" hareketleri ile ilerleyebilmesi onu diğer canlılardan çok daha özel yapar. Yılanların doğadaki çöl, orman, kayalıklar, bataklıklar, çalılıklar, dere, deniz gibi farklı ortamlarda

ve sürtünme katsayısı farklı birçok ortamda hareket edebilmeleri, tekerlekli mobil robotlara nazaran yılanı tip robotların üstün olan tarafını gösterirler. Yılanı robotlar iki şekilde; tekerli ve tekerleksi olabilmektedir. Tekerleksiz yılanı robotlar, tekerlekli mobil robotlara göre yavaş, fakat her türlü ortamda daha fazla hareket yeteneğine sahiptirler. Ayrıca yılanlar kendi vücutlarını son işleyici elemanmış gibi tutma, sıkma ve taşıma amaçlıda kullanabilmektedir.

Yılanın fiziksel özellikleri taklit edilerek yapılan yılan benzeri robotlar gereğinden çok serbestlik dereceli robot kolları ailesindedir. Bu tür robotlar pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Yılanı robotlar günlük hayatta birçok alanda kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu robotlar deprem ve sel gibi afetlerde kazazedelerin arama ve kurtarılmasında, belediyeler, Devlet Su İşleri ve Karayolları gibi hizmet alanlarında, su, kanalizasyon arıza tespit ve onarımlarında kullanılabilir. Ayrıca nükleer reaktörlerde hareket kabiliyeti yüksek görevlerin icrasında, tıpta hassas ameliyatların yapılmasında, zorlu şartlarda görev yapabilen amfibik askeri araçların tasarımında, tarımda hassas hasat, ekim ve ilaçlama çalışmalarında ve endüstride kabiliyeti artırılmış son işleyici elemanlar olarak ta kullanmak mümkündür. Ayrıca insan riski taşıyan yüksek sıcaklık, endüstriyel bir yapının dar alanlarında ve kirli ortam çalışmalarında güvenliğe ve onarımlarda ise zaman artırımına neden olur [1].

Yılanı robotlar birçok avantaja sahip olmalarına rağmen her alanda güvenli bir şekilde kullanılamamaktadır. Yılanı robotların tasarımı, inşası ve kontrolü gibi yönleri zor olmasından dolayı, araştırmacılar henüz yılanı robotlara ait birçok problemi çözememiştir [2]. Eklem sayısı fazla yılanı robotlar daha yüksek hareket kabiliyetlerine sahip olmakla birlikte, minimum hareket için tüm eklemlerin istenen pozisyona gelmeleri ve üzerinde bulunulan ortamla faydalı etkileşimde bulunmaları maksimum kazanç için her zaman gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda yılanı robotların değişen ortamlara adaptasyonu ve güç gereksinimlerinin karşılanması çözülmesi gereken büyük problemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında yılanı robotların optimum yörünge kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla yörünge kontrolü adımları irdelenmiştir. Optimum yörünge kontrolüne ait parametreler yörünge planlama çalışmaları açık ve kapalı olmak üzere ikiye ayrılır. Kapalı planlamalar gerçek zamanlı ve lokal alanda yapılır. Açık

planlamalar ise gerçek zamanlı olmayıp global ölçeklidir [3]. Kapalı planlamalarda robotun hedefe varması asıl ölçüttür. Minimum yol ve süre, robotun optimum hareket ve güç performansı kapalı planlamada her zaman mümkün değildir. Bu şartlar yalnızca açık planlamada elde edilir. Çalışmada yörünge kontrolü için gerekli olan yörünge planlama çalışması açık planlama şeklinde yapılmıştır. Açık planlamada yörünge: yol planlama, planlanan yolu düzgünleştirme ve düzgünleştirilmiş yolu izleme olmak üzere üç aşamalı bir hiyerarşiye sahiptir. Açık planlamaları da, açık-ayrık ve açık-sürekli olmak üzere iki kısma ayırmak mümkündür. Açık-ayrık planlamalarda bu üç aşama sırasıyla gerçekleştirilmektedir. Önce ayrıklaştırılmış uzayda (hücelere ayırma, görülebilirlik grafik metodu vb.) yol planlanır, daha sonra çeşitli şekillerde planlanan yol düzgünleştirilir. Son aşamada da bu düzgünleştirilmiş yol izlenir. Bu çalışmalarda genellikle minimum mesafe olarak alınan amaç ölçütü birinci aşamada kullanıldığından dolayı sağlanamayabilmektedir. Diğer bir deyişle global bir amaç ölçütü olmamaktadır. Açık sürekli planlamalarda ise yörünge planlama iki aşamada tamamlanabilmektedir. İlk aşamada çalışma uzayı ayrıklaştırılmadan planlama yapılır ve sonraki aşamada da bu planlanan yörünge bir kontrolör ile izlenir [4]. Yörünge planlamada engelden uzak bir yolun belirlenmesi tüm mobil robotların olduğu gibi yilansı robotlarında hedefe varması için önemlidir.

Çalışmalarda ilk olarak yilansı robotların hareketine ait parametreler üzerinde çeşitli yapay zeka veya optimizasyon teknikleri kullanarak hareket sürelerini kısaltmaya yönelik çalışmalara odaklanılmıştır. Fakat literatürde yilansı robotların hareket biçimlerine uygun, engelden uzak bir yol belirleme tekniği olmadığı saptanmıştır. Var olan yol belirleme algoritmaları yilansı robotlar için her zaman en kısa mesafeyi en hızlı bir şekilde almalarını garanti etmemekteydi. Çünkü yilansı robotlarda sinüzoidal S hareketinin genliği arttıkça hızda artmaktadır. Mevcut algoritmalar en kısa mesafeyi buluyor fakat yilansı sinüzoidal “S” hareketlerinin değişen genliklerdeki hareketlerine dair bir hareket planlama detaylarını sunmuyordu. Bu noktadan hareketle mümkün olduğunca büyük sinüzoidal S hareketlerine kısıtsız imkan verebilecek büyük alanları bulabilen bir yöntem ihtiyacı duyulmuştur. Bu sebeple adına Akıllı Nesnelere Algoritması dediğimiz, özellikle yilansı robotlar için büyük avantajlara sahip bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, nesne tabanlı programlama diline ait tekniklerle geliştirildiğinden bu ismi almıştır. Algoritma, başlangıç noktasından hedefe doğru

engelden uzak, serbest ve olabildiğince büyük S hareketlerine imkan veren bir yol bulmaktadır.

Sonrasında kurulan deney düzeneğinde başlangıç noktasından hedefe, geliştirilen algoritmanın belirlediği yol ile literatürdeki yöntemlerle belirlenen en kısa yolun, robot tarafından alınma süreleri hesaplanarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Başlangıç noktasından hedefe, yılanı robotu, belirlenen yörüngede koşturmak için gerçek zamanlı görüntüler alınmak suretiyle, süreç yürütülmüştür. Ortamdan alınan görüntülerin, resim işleme teknikleri ile analizleri yapılarak yörünge izleme için bir sonraki hareket biçimi belirlenmiştir. Bu karşılaştırmalar aynı zamanda simülasyon üzerinde de yapılarak gerekli çıkarımlar ortaya konmuştur.

Geliştirilen algoritma yılanı robotlarda en kısa mesafeyi uzunluk olarak değil, zaman olarak(alınma süresi) bulmaktadır. Algoritma, sadece en kısa mesafeyi değil, diğer mobil ve mobil olmayan sabit robotların da hareket planlamalarının oluşturulmasında literatürdeki mevcut algoritmalarından beklenmeyecek birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları en güvenli yolun belirlenebilmesi, engelin yanından geçme mesafelerinin ayarlanabilmesi, dönüşlerde engelden uzaklığın belirlenmesi, dönüşlerdeki zaman kayıplarının hesaplamalar dahil edilebilmesi, yapılandırma alanlarının hesaplanmasının gereğinin ortadan kaldırılması... sayılabilir.

## 1. BÖLÜM

### YILANSI ROBOTLAR

Günümüze kadar yılanlı robotlar üzerine birçok çalışma yapılmıştır. 1970'lerin başlarında Hirose ve Umetami ayaksız hareket konusunda ilk araştırmaları yapmışlardır. Hirose Yılanlı robotlar konusunda en önemli çalışmasını, yılan hareket kavislerini formülize etmesi ile yapmıştır. Ayaksız hareket konusunda, bir sinüs hareketine neden olan, iki yay tarafından kontrol edilen karşılıklı iki kas etkisi ile hareket eden bir omurga modelini önermiştir. Sonrasında bu omurgaya ait eğrinin denklemini hesaplamış ve gerçek yılanlarla bunları test ederek karşılaştırmıştır. Hirose yılanlı robot tasarımlarını ACM(Active Cord Mechanisms) olarak isimlendirir [5]. İlk olarak ACM III isimli mobil robotu 1976 yılında tasarlamıştır. Bu robot 2metre uzunluğunda ve sadece sapma eksenine sahipti. Saniyede 40cm hıza sahip robot, her bir eklemde pasif tekerleğe sahipti. Tekerlekler normal sürtünmeye göre sürtünme katsayısı tanjant yönünde olduğundan küçüktür [6].

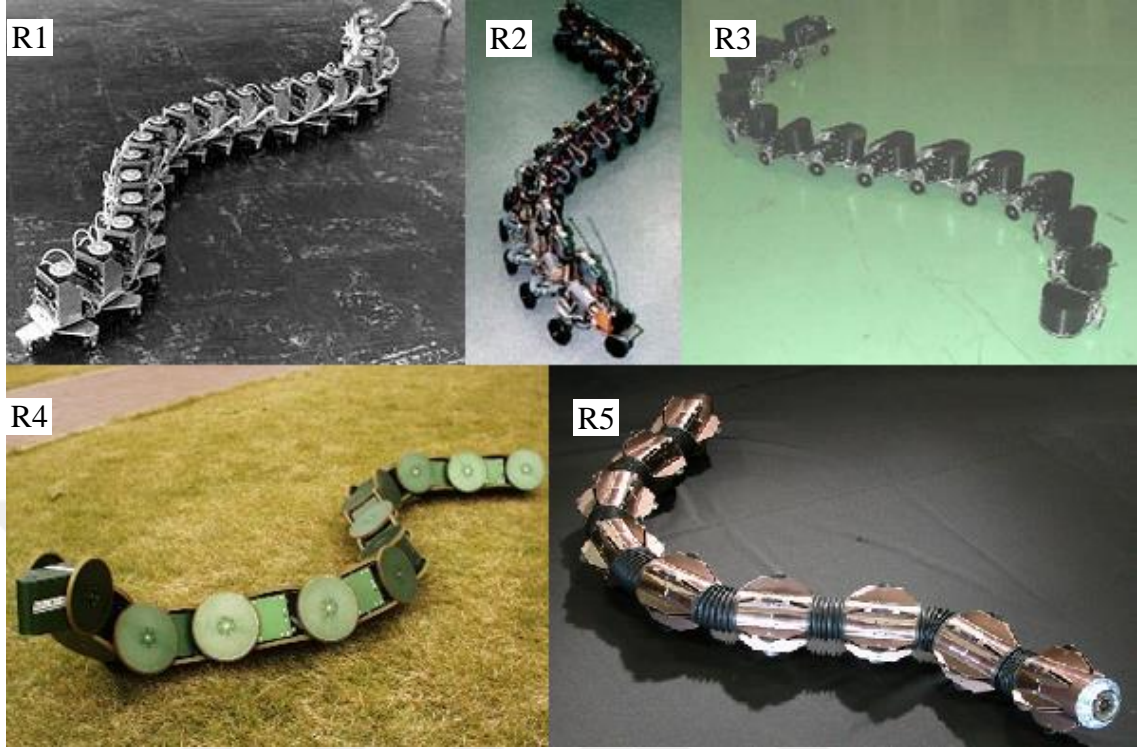
Bu tasarımdan yaklaşık 20 yıl sonra daha yeni teknoloji ile ACM R1 yılanlı robotunu geliştirmiştir. Bu robot kablo ihtiyacını gidermek için kablosuz haberleşme modülüne sahipti. 16 eklemde oluşan robot 50cm/sn hıza sahipti. Modüller daha küçük ve düzgün biçimli idi. Planlanan yeni çalışmalar arasında buz üzerinde paten kullanılarak yılanın bu ortamdaki hareketi denenmiştir [7].

Devamında gelen yılanlı robot prototipi 3 boyutta hareket kabiliyetine sahip yunuslama ve sapma eksenlerinden oluşan ACM R2 olmuştur [8]. Bu robot iki eksenle yılanlı robotların örneği olan çalışmaların temeli sayılmakta ve sonraki ACM R3 bunun daha da geliştirilmiş halidir [9].

ACM R3 ile R2 modeli, R3'ün tasarımının yeniliği dışında fonksiyonellik olarak birbirlerinin aynısıdır. Öncekilerden daha hafif yapılıdır. Her bir modülün yanlarında yüksekliği modülden daha fazla olan iç tekerlek bulunur. Bu robot toplam 1755mm uzunluğunda ve 110 x 110mm genişlik x yüksekliğe sahip olup toplam 20 halkadan(10 yunuslama 10 sapma) oluşmaktadır. Yunuslama ve sapma eksenleri tek bir gövdede olmayıp her birisi ayrı eklemler üzerinde yer almıştır. ACM R3, dönme, sinüs kaldırma hareketi ve eğik hareket gibi yeni hareket biçimlerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır [10].

Toz, su ve zorlu alanlarda gerçekçi fonksiyonları yerine getirebilmek için ACM R4 robotu geliştirilmiştir [11]. Bu robot, tüp içerisinde veya dik yamaçlarda denetleme ve arama görevlerinde çalıştırılması amacıyla endüstriyel bir sürüm olarak kabul edilebilir. Boyutları daha küçük olan R4 aktif tekerleklere sahipti ve sadece 9 eklem vardı.

En sonuncu modeli ACM R5 [12], hem suda hem de karada hareket edebilen yapıya sahiptir. Boyutları her bir eklem 80 x 170 mm ve toplam ağırlığı 800 gr olup 9 eklem ve bunlardan her biri 2 serbestlik derecesine sahiptir. Bu robot yunuslama ve sapma eksenleri tek bir gövdede yer almaktadır. Her bir eklem üzerinde 6 adet pasif küçük teker bulunduran R5 modeli, bunlar üzerinde kayarak hareket edebilmektedir. Aşağıda Hirose'ye ait yılanlı robot resimleri yer almıştır.

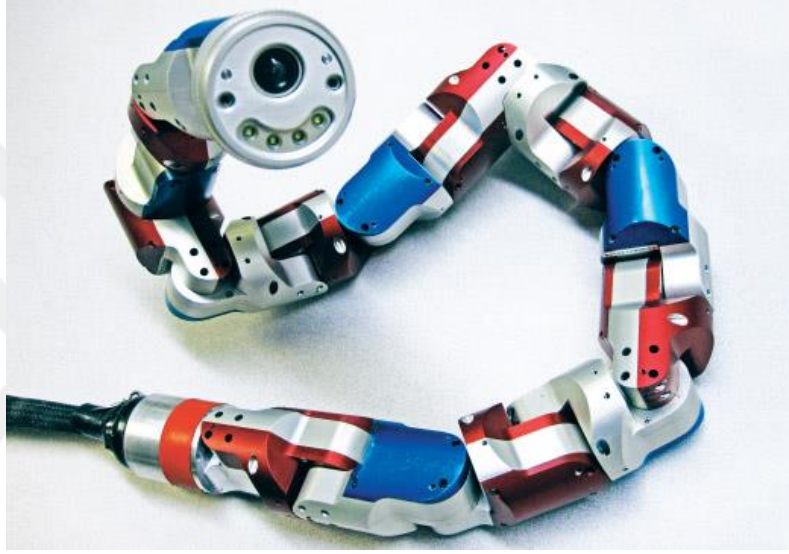


Şekil 1.1. Hirose'ye ait yılanı robotlara ait resimler(ACM serisi)

Hirose'nin çalışmaları başka araştırmacılar tarafından ilgi görmüştür. Shugen Ma, ACM R1 robotunun kontrol olarak daha gelişmişini ve 12 daha az eklem kullanarak yapmıştır [13]. Aynı zamanda farklı yüzeylerde yılan hareketlerini gözlemleyebileceği bir simülasyon da geliştirmiştir. Geliştirilen simülasyon her bir yüzey için kayıpsız optimum yılanı hareket açılarını belirleyebilmektedir [14]. Son olarak, eğimli yüzeyde yılan hareketi çalışılmıştır [15]. Buna paralel olarak Shugen Ma ve arkadaşları, yunuslama ve sapma eksenlere sahip ayaksız robotlar üzerinde çalışmaya başlamışlardır. Bu çalışmalarda çevreye göre farklı hareket şekilleri üzerinde durulmuştur[16].

Doktora tezi NASA tarafından finanse edilen, CMU(Carnegie Mellon University) Robot Enstitüsü'nden Kevin Downing, ayaksız robotlar üzerinde çalışmıştır [17]. Bu çalışmada genetik algoritma tekniği ile yılanı robotlar için otomatik yürüyüş üretici bir yapı geliştirilmiştir. Geliştiricilerin üzerinde durdukları ana konu a'dan z'ye mekanik ve hareket biçimleri olmuştur. Mekanik alanında yılanın hareket organlarının, tırmanmasına imkan verebileceği şekilde yılanın 3D çevreye erişebilmesi için yeni eklemler geliştirilmiştir [18]. Araştırmacılar hareket planlamaya yoğunlaşmış ve bununla ilgili hareket ve yer belirleme algoritmaları geliştirmişlerdir [19, 20]. Süper-

servo diye isimlendirilen servo motorları kullanarak alüminyum kasa üzerine yılan robotu inşa etmişlerdir. Ayrıca kasayı deri benzeri bir kaplama ile örterek robotun zor şartlarda ve su içerisinde sıkıntısız hareket etmesini sağlamışlardır. Son geliştirilen modeli 16 ekleme sahip, yunuslama ve sapma eksenli, çapı 5 cm, ve toplam uzunluğu 97 cm dir. Operatör robotun hareketi sırasında parametrelerini değiştirebilmektedir. Aşağıda bu robota ait bir resim gösterilmiştir.



Şekil 1.2. CMU'ya ait yılanı robot

EFPL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) robot grubu, hem suda hem de karada hareket edebilen Amphibot olarak adlandırılan robot geliştirmişlerdir [21]. 8 eklemeden oluşan robot sapma hareket eksenine sahip olup canlılardan taklit CPG(Central Pattern Generators) hareket biçimini kullanır. İlk geliştirilen Amphibot I isimli robot sadece yüzebilirken, Amphibot II isimli robot hem suda hem de karada hareket edebilmektedir. Amphibot II ye bacaklar eklenmiş ve daha küçük bir yapıya sahiptir. Boyutları 5.5 x 3.7 cm olup, toplam uzunluk 77.2 cm dir. Aşağıda Amphibot I ve II resimleri yer almaktadır.



Şekil 1.3. Amphibot serisi amfibik yılanı robotlar

Farklı bir model olarak Miller tarafından geliştirilen S5 yılanı robot 64 eklemden ve genişlik ve yüksekliği gerçek yılanı en çok benzeyen yılanı robot 5. kuşak yılanı robot olarak isimlendirilmektedir [22]. Bu robotta orta ve baş taraf kuyruğa göre daha kalın yapıdadır.

WormBot isimli başka bir robot ise Conrad ve arkadaşları tarafından Zürih Üniversitesi Neuroinformatics Enstitüsü altında geliştirilmiştir. CPG tabanlı çalışan robotun parametreleri operatör tarafından hareket sırasında değiştirilebilmektedir [23].

Tokyo Teknoloji Enstitüsünden Ute ve arkadaşları tarafından geliştirilen SES1, SES2(Self Excited Snake Robots) robotları 3 parçadan oluşmakta ve yapısında 2 motor bulunmaktadır. Burada hareket kendi kendini uyarma şeklinde elde edilir. Robotun hareket organlarına paralel yay eklenmiştir. Her bir motorun torku komşu motorun açısına bağlıdır. Bu prensiple hızlı ve etkili bir hareket elde edilir. SES yapı olarak analog elektronik elemanlarından oluşmaktadır.

Serpentine Robotlar olarak adlandırılan yılanı benzer aktif hareket organlarına sahip robotlarda, bazı ortamlarda yılanı hareket biçimine ihtiyaç duyabilmektedir. Bu robotlarda kimisinde tekerlek kimisinde ise paletli yapılar bulunmaktadır. Bu tip robotlar tekerleksiz ya da pasif tekerleğe sahip yılanı robotlara göre daha hızlıdır. Bu robotlar canlılardan taklit bir yapıya sahip değildirler. Dolayısı ile bu tip robotlar doğada bulunmazlar. Bu tezin konusu bu tip yılanları kapsamadığından literatüre ait bilgiler verilmeyecektir. OmniTread, SwarmBot, JL1, Koryu II(KR I/II), InchWorm, PolyBot ve SSR gibi isimlerle üretilmiş çeşitli yapılar mevcuttur. Aşağıda serpentine robotlara ait çeşitli resimler verilmiştir.



Şekil 1.4. Serpentine tipi yılanlı robotlar

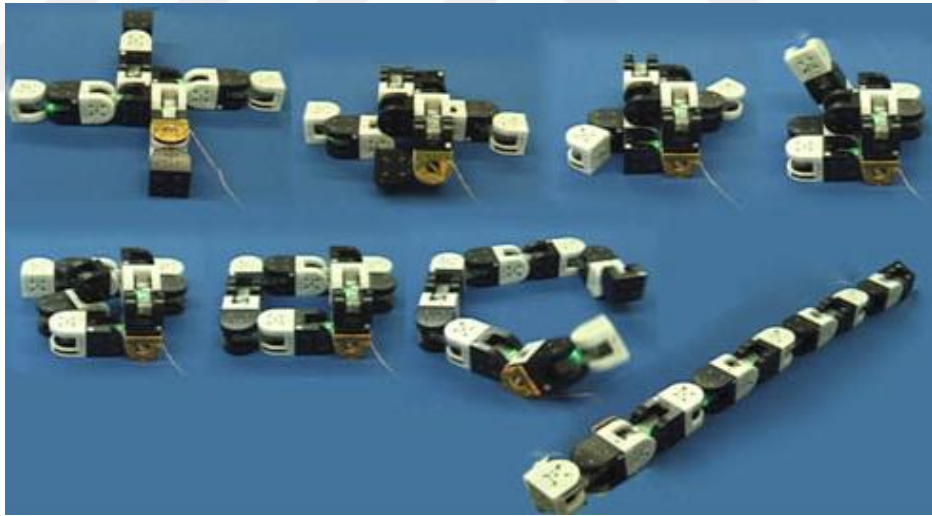
Yılanlı robotların evrimi sürecinde doğal yılanlarda olmayan çeşitli desteklerle hareket kabiliyeti artırılmaya çalışılmıştır. Kimisinde pasif ya da aktif tekerler yer alırken, kimisinde de doğrusal yol izleyen katar şeklinde modeller inşa edilmiştir.

Tablo 1.1. Yılanlı robotların sınıflandırılmaları ve önemli parametreleri

Robot tipi	Sınıf	Uzunluk (mm)	Ağırlık (kg)	Hız (mm/s)
ACM III	I	2000	28	400
AmphiBot I (AB I)	I	490	---	35
AmphiBot II (AB II)	I	770	---	400
KR-II	II	3300	370	500
KR-I	III	1390	27.8	266
OmniTread (OT-8)	III	1270	13.6	100
OmniTread (OT-4)	III	940	3.6	150
JL-I	III	1050	21	180
Kotay's Inchworm I (KIR-1)	IV	250	0.455	4
Kotay's Inchworm II (KIR-2)	IV	330	0.566	13
CMU (M1)	IV	840	1.26	102
Slim Slime Robot (SSR)	V	730	12	60
Planar Inchworm (PI)	V	710	6	1

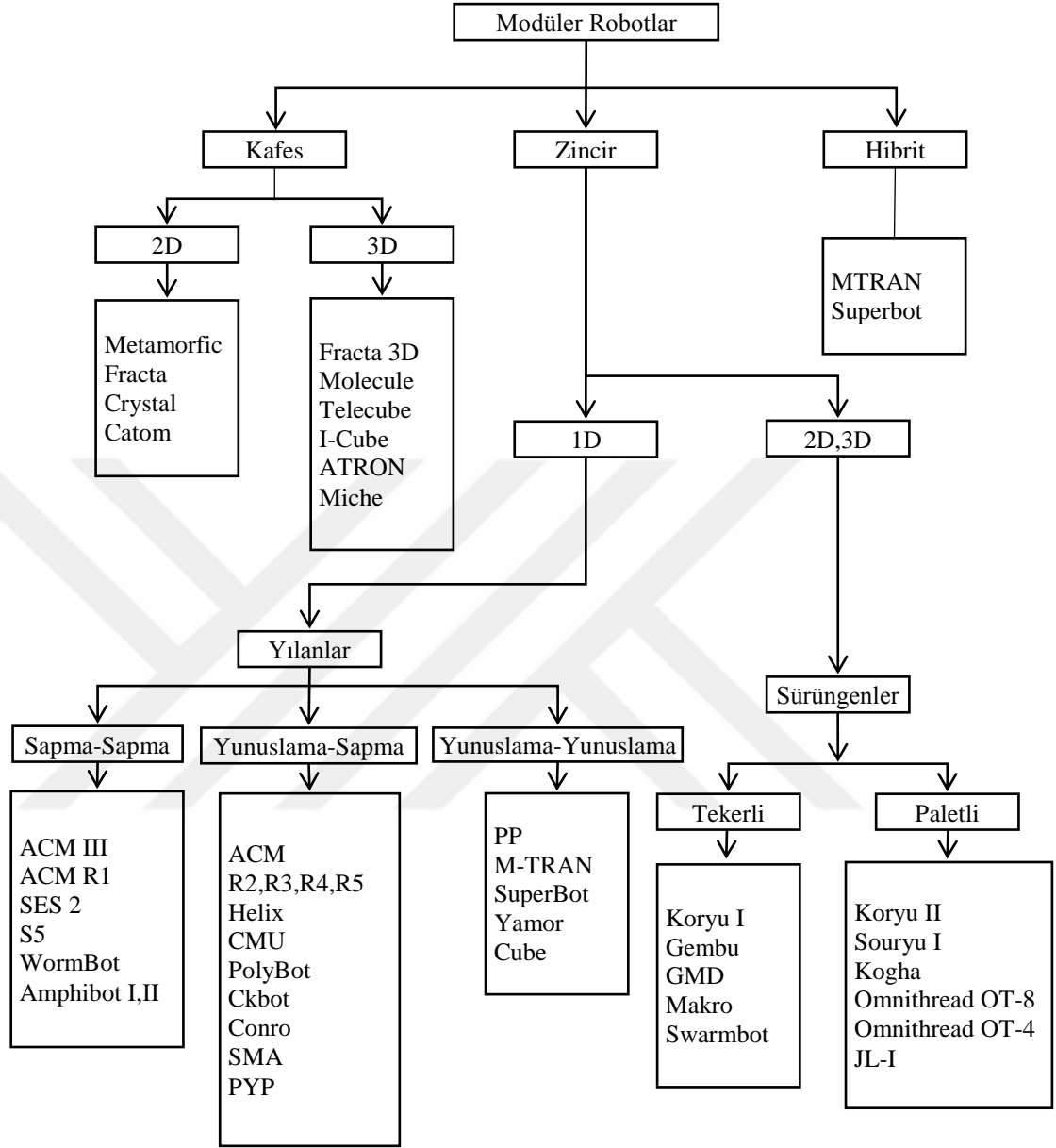
Tabloda popüler yılanlı robotlara ait sınıflandırmada yılanların ağırlık, uzunluk ve hızları yer almaktadır [24]. Tabloya göre sınıflar şu şekilde ifade edilmiştir. I: pasif tekerli, II: aktif tekerli, III: aktif yürüme, IV: düşey dalga yapılı ve V: doğrusal yayılım.

Literatürlerde birbirine bağlanabilen modüler yapıya sahip yılanlı robotlar üzerinde birçok çalışmalar yer almaktadır. Hatta bunlardan bir kısmı, birçok modülün bir araya gelmesi ile oluşup, tek bir model gibi davranıp herhangi bir ortamda tekrar modüllerin dağılıp istenirse başka şekilde birleşerek başka bir yapıya sahip olabilmektedir. Modüler yapılarda yılanlı robotlar da, her bir eklemi ayrı bir modülden kolayca oluşturulabilmektedir. Yılanlı robotların, yunuslama-yunuslama, sapma-sapma ve yunuslama-sapma eksenlerine sahip çeşitleri modüler yapıda aynı şekilde oluşturulabilmektedir. Yılanlı tip robotlar zincir yapı ismi ile adlandırılmaktadır. Aşağıda MTRAN III isimli bir modüler robotun değişik şekillerde varyasyonları gösterilmiştir.



Şekil 1.5. MTRAN III modüler robota ait varyasyonları

Aşağıda ise modüler robotlar üzerine yapılan çalışmalara ait robotların bir sınıflandırması verilmiştir [6]. Yılanlı robotlarda modüler robot ailesine dahil edilerek aşağıdaki ağaç yapıda yer almıştır.



Şekil 1.6. Modüler robotların sınıflandırılması

## 2. BÖLÜM

### YILANSI HAREKET ÇEŞİTLERİ

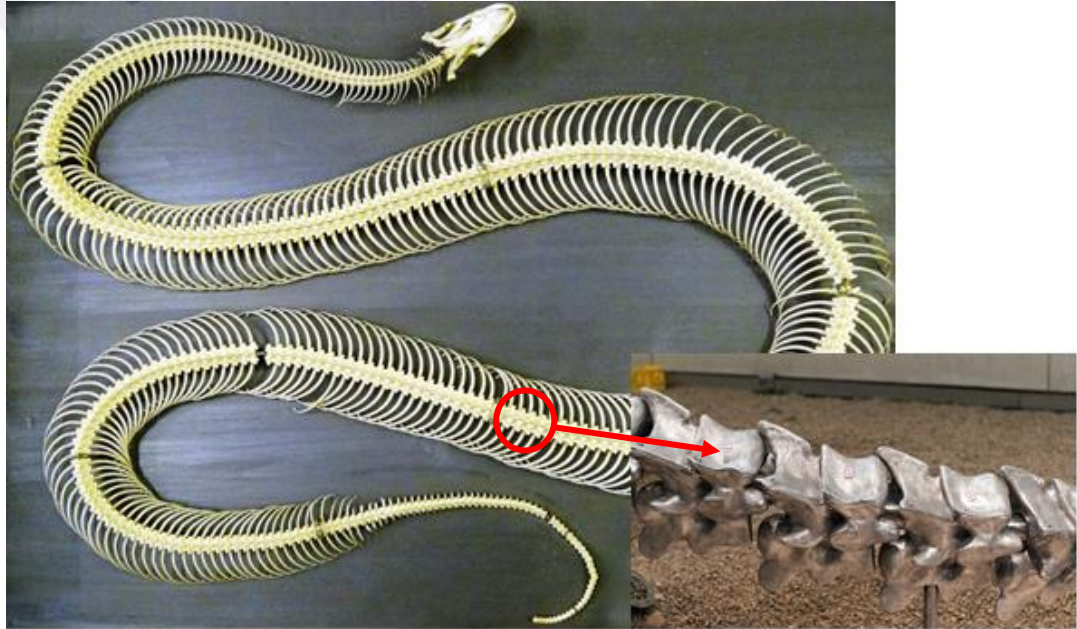
Raymond L. Ditmars, yılanlarla ilgili kitabında [25] “yılan hareketleri hakkında çok varsayımları olmuştur. Birçok türün hızı, gücü ve çevikliği şaşırtıcı görünmektedir. Burada uzuvlarını henüz kaybetmiş küçük hareket kabiliyetleriyle gözle görünür şekilde dikkat çeken bir grup vardır” demiştir. Yılsı hareketler, yılanın eklemlerini, sinüzoidal S benzeri şekli 3 boyutlu olarak yapmasıyla gerçekleştirilir. Yılanlar, karada, havada ve suda aynı benzer sinüzoidal S benzeri hareket ile hareket edebilirler. Bu hareketin genliği, frekansı ve ortamın yüzeysel şekilleri yilsı robotun tüm kinematik parametrelerini belirlemektedir.



Şekil 2.1. Sinüzoidal S biçiminde gerçek bir yılan(<http://pngimg.com>)

Gerçek yılanlar taklit edilerek yapılan robotlara yilsı robotlar denilmektedir. Doğal yılanları aynı şekilde taklit edebilen yilsı robota ise henüz rastlanmamıştır. Biyolojik

çalışmalar teknolojik tasarımlara ilham kaynağı olmuştur. Yılanlar bacaksız hayvanların nihai bir örneğidir. Hareket kaliteleri ve tarzları diğer tüm bacaksız türleri geride bırakmaktadır. Yılan bir omurgalı hayvan olup -türüne göre değişmekle beraber- iskeletinde ortalama 130 ila 400 omurga kemiği bulunmaktadır. Yılan omurgası en karmaşık omurgalardan birisidir [2]. Her bir omurga kendi arasında yatay düzlemde  $10^{\circ}$  ila  $20^{\circ}$  derece dönme hareketine sahipken düşeyde ise  $2^{\circ}$  ila  $3^{\circ}$  derece dönme hareketine sahip olmaktadır [24]. Robotlara bakıldığında ise 5–36 arasında değişen büyüklüklerde eklem sahip olanları vardır. Robotlarda eklem sayısı az olmakla beraber eklemler arası alınan dairesel yol( $30^{\circ}$ - $120^{\circ}$ ), gerçek yılanlardan daha fazladır.



Şekil 2.2. Gerçek yılanın iskelet yapısı(paoloviscardi.com)

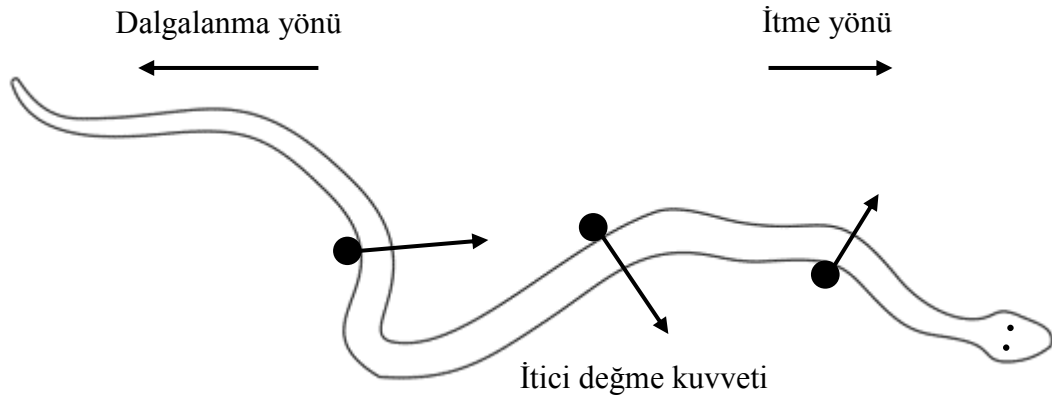
Yılanların dikkate değer özelliklerinden birisi yüksek yaşam alanları arasında ve çeşitli ortamlarda bacaksız olarak nasıl hareket ettiğidir. Yılanlar yüzebilir, dalabilir, çalılar arasından hızla geçebilir, taşlar üzerinden karşıdan karşıya geçebilir, kum üzerinde sürünebilir, düşey ağaca, ağaç üzerindeki bitki örtüsü arasından hızlıca tırmanabilir, bazı türler havadan karaya süzülerek inebilir. Karasal ortamlarda yaygın ve genel hareketlerinde olağanüstü bir görünüşleri olabilmektedir [26]. Doğal yılanlar en temelde dört farklı şekilde hareket etmektedirler. Bunlar lateral undulation(yanal dalgalanma), rectilinear locomotion(doğrusal hareket), concertina(akordeon) ve sidewinding(yanal hareket) hareket şekilleridir [27]. Bu sınıflar aslında ayaklı hayvanların yürüyüşü ile

ilişkilidir [2]. Bunların dışında farklı hareket biçimleri de vardır fakat bunları istisna sayıya yılanlar kullanır veya istisna durumlarda başvurulur. Hatta doğal yılanların kullanmadığı fakat robot çalışmalarında üzerinde mesai yapılan farklı yılan robot hareketleri de vardır [28]. Yanal yuvarlanma(spining) adı verilen [29] hareket doğal bir yılanın yapmasının sakıncalı olabileceği ancak sapma ve yunuslama hareket biçimlerini icra edebilen yılan robotunun yapabileceği harekettir. Bir diğer hareket çeşidi baş ve kuyruk yerde sabit olarak gövdesini tamamen kaldırıp yana koyarak yapılan hareket(flapping) yine doğal yılanların yapamayacağı hareket çeşididir. Başka bir hareket çeşidi ise dalga(travelling wave) hareketidir. Bu harekette yılan robot bir dalga şeklinde sadece düşey eklemlerini hareket ettirerek ilerler.

Yılan robot hareket çalışmaları ilk olarak J.Gray tarafından 1946 da yapılmıştır [30]. Buna karşın ilk yılan robot ise Hirose tarafından yapılmıştır.

### **2.1. Yanal Dalgalanma(Lateral Undulation/Serpentine)**

Biyolojik yılanlar tarafından kullanılan en hızlı ve en yaygın yılan robot hareket biçimi yan dalgalanma hareketidir. Bu hareket aynı zamanda yılan robotları içinde çok kullanılan hareket biçimi olmuştur. Yılanlar bu hareketi icra ederken yer ortamının düzensizliklerinden kuvvet alarak ilerlerler [31]. Kaygan ve düz ortamlarda bu hareket mümkün değildir. Yılan ilerledikçe yılanın ait her nokta yerdeki aynı noktalardan geçer ve yerle yılan vücudu arasında asla statik değme noktası yoktur [32]. Adından da anlaşılacağı üzere bu hareket gövde dalgalanmasını yatay hareketle birleştirir. Yılan ilk önce yeri kavramasını mümkün kılan taşlar, bitkiler ve enkazlar gibi nesnelere değecek şekilde yan hareket eder. Daha sonra gövde kaslarını baş bölgesinden arkaya doğru her bir değme noktasından uyguladığı itme kuvveti ile ileri hareketini gerçekleştirir. Yanal dalgalanma hareketi en verimli hareket biçimidir. Çünkü hareket için diğer hareket biçimleri, ortamın sürtünme kuvvetini kullanırken, bu hareket değme kuvvetlerini kullanır. Değme kuvvetine ait normal bileşenin, teğetsel bileşenden daha büyük olabileceği Hirose tarafından hesaplanmıştır.



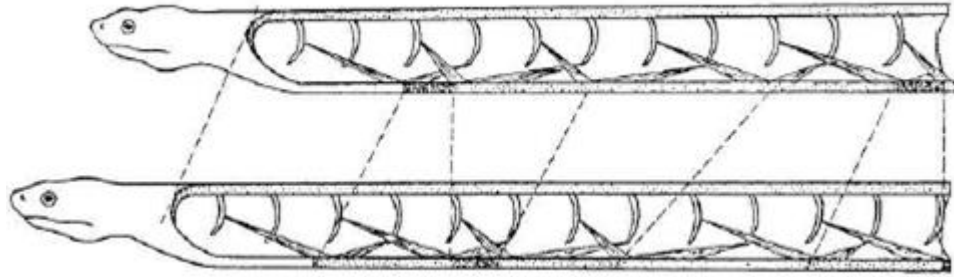
Şekil 2.3. Yanal dalgalanma hareket biçimi ve bileşenleri

Yüzme sırasında aynı dalga hareketi üretilir fakat yılan vücudu su direncine karşı itme uygular. Yanal dalgalanma hareketinde yılanın ağırlık dağılımı düzgün olmayıp daha ziyade vücut dalgalanma eğrisinin tepe noktası topraktan hafifçe kalkmış olarak dağılmıştır [32]. Yanal dalgalanma hareketini ilk olarak Hirose modellemek amaçlı aktif akort mekanizması(ACM) isimli robotu pasif tekerleklerle geliştirmiştir [33]. Bu harekette süreklilik için en az üç değme noktası gereklidir. Bunlardan ikisi itici kuvvet için gerekirken, diğeri ise bu hareketin yönünü düzenlemek için kullanılır [34].

## 2.2. Doğrusal Hareket(Rectilinear Locomotion)

Doğrusal hareket yavaş bir hareket biçimi olup ağır yılanlar tarafından sıklıkla icra edilir. Ayrıca yılanların, kurbanlarını takibin son aşamasında kullandıkları ve kurbanlarının haberlerinin olmaması için uyguladıkları bir hareket çeşididir. Bu hareket sırasında yılan düz ve dar bir çizgi halinde yere değen pul kenar noktalarını kullanarak kendisini ileri doğru çeker. Hareketin icrasında ileriye uzanan vücut, daha sonra bu noktada küçük çıkıntılar yardımıyla pullu kenarlarını çengel gibi kullanarak vücudunu ileri doğru çeker. Yılan vücudu aynı zamanda uzanma ve çekme hareketini değişimli olarak yapacaktır [32].

Bu hareket çok etkili değil fakat büyük sapma genliklerine imkan vermeyen alanlarda kullanışlıdır. Doğrusal hareketi içerisine alan çok fonksiyonel model bulunmamaktadır. Birçok çalışma teorik seviyededir. Hareket değişkenlerinin belirlenmesi için çeşitli matematiksel modeller kullanılmıştır [35].

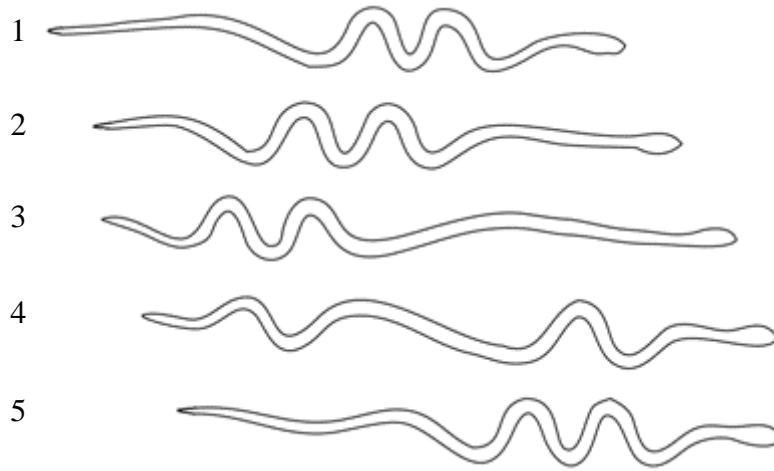


Şekil 2.4. Doğrusal harekette kas davranışları(Oleg Shmakov)

İlk başlarda bu hareket iskelet sisteminin aktif bir hareketi olan, iskelet yürüyüşü olarak zannedilmiştir [2]. Bu hareket bir deri hareketi olup yavaş seyrederek.

### 2.3. Concertina Hareket

Concertina kelimesi müzik aletlerinden küçük yapılı akordeona benzeyen enstrümandan gelmektedir. Körüklü yapısı ile içerisinde hava basıncı oluşturarak kenarlarda bulunan düğmeler yardımıyla müzik notaları icra edilir. Bu kelime, ileri yılanı hareketi sağlamak için vücudunun uzayıp kısalacağını göstermek amaçlı kullanılmıştır. Vücudun bir kısmı sabit kalırken, diğer kısmı itme veya çekme kuvvetini icra eder. Bu hareket, baştan sona bir kere tekrar ederek diğer harekete geçilir. Vücudun bir kısmı hareket ederken diğer kısmı sabit kalmaktadır. Buradaki ana fikir, vücudun farklı bölgelerindeki dinamik sürtünme katsayısının neden olduğu düşük kuvvet ile statik sürtünme katsayısının neden olduğu büyük kuvvet arasındaki farkla yılanın hareket etmesidir. Karın pullarının pasif hareketinden dolayı ileri hareket meydana gelir. Yılan pulları ileri hareket sırasında daha düşük sürtünmeye neden olurken geri doğru bir harekette daha yüksek sürtünme kuvvetine maruz kalır [36]. Jayne, gerçek yılanların kullandığı diğer hareket çeşitleri ile karşılaştırıldığında concertina hareketinin 7 kat daha az etkili olduğunu iddia etmiştir [37]. Ancak yılanlar, concertina hareketini sadece sürtünmenin yüksek olduğu dar alanlar gibi hareket etkisi düşük ortamlarda kullanırlar. İvme değişiklikleri, statik sürtünme ve düşük hızlardan dolayı bu hareket çeşidi nispeten verimsizdir [17]. Ancak bu hareket sıralı ağaç dallarında olduğu gibi kablolar ve teller üzerinde de hareket kabiliyetine diğer hareket biçimlerinden daha fazla elverişlidir [36].



Şekil 2.5. Concertina hareket adımlarının yayınımları

Bu hareket çeşidinin düşük verime sahip olmasının nedeni, hareket için sürtünme kuvvetini kullanıyor olmasıdır. Görüldüğü üzere, bu hareketin avantajlı yönlerinden birisi hareket genliğinin dar bir bölgeye sahip olmasıdır [38].

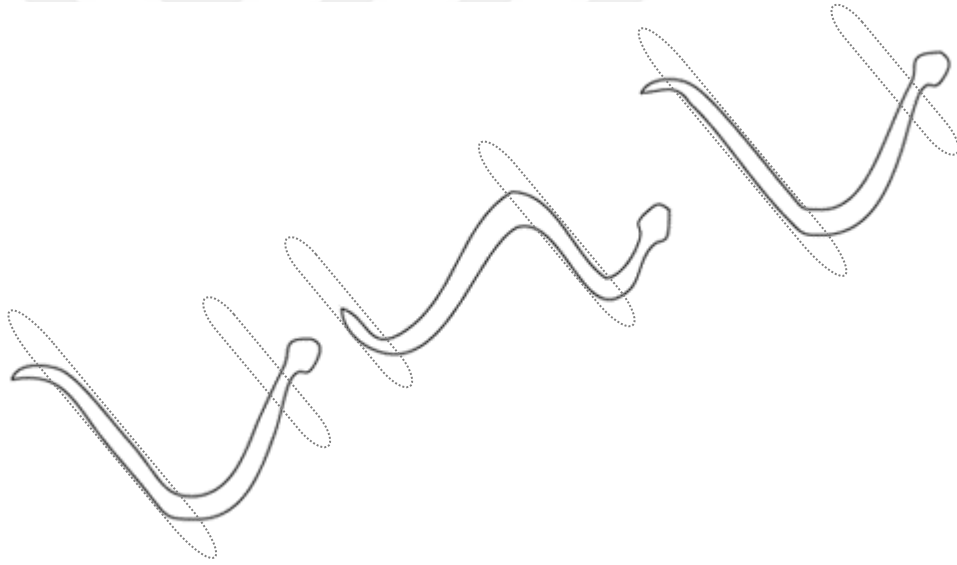
#### 2.4. Yan Yan Hareket(Sidewinding Locomotion)

Bu hareket çeşidinde yılan hızdan ödün vermeyerek sürtünme kuvvetini kullanır. Bu harekette yanal dalgalanma hareketi gibi dalgalanma etkisine sahipken, kuvvet iletim şekli daha çok concertina harekete benzer. Yılanın ilk hareket başlangıcında ön kısmın hareketlenmesi ve hareketli parçaların mevcut hızını koruması yılan vücudunun sürtünmesi ile mümkündür. Bu hareket biçimi genelde kumlu ve kaygan zeminlerde çöl yılanları tarafından kullanılır [38]. Başlangıç pozisyonunda vücudun diğer kısmı sabit kalırken, baş ve boyun yerden kaldırılır ve yana atılır. Sonrasında baş ve boyun yerde sabit kalarak geri kalan kısım diğerinin yanına çekilir. Yılan kendi baş tarafı ile yaklaşık 45 derecelik bir açı ile kumda bir takım karakteristik işaretler bırakarak hareket eder [32]. Şekil 2.6'da hareket şekli ve bıraktığı izler gösterilmiştir. Yılan hareket halindeyken vücudunun iki değme noktası vardır. Bu durum kaymayı önler ve yanal dalgalanma hareketinden daha verimlidir [39].



Şekil 2.6. Çölde yan yan hareket(Jason Jones/gettyimages.com)

Yukarıda doğal ortamlarında gösterilen yılanların hareket biçimleri aşağıda açıkça verilmiştir.



Şekil 2.7. Yan yan hareket adımları(How snakes move)

Bu hareketler dışında yılanların kullandığı doğal hareketlerde vardır. Bunlar itmeli kayma, sıçrama, tünel kazma, tırmanma, sinüs kaldırma gibi hareket çeşitleri olup yılanlar tarafından özel durumlarda gerektiğinde başvurulur.

## 2.5. Sinüs Kaldırma(Sinus-Lifting)

Yılanların özellikle düz ve sürtünmenin düşük olduğu zeminlerde kullandığı bir hareket biçimidir. Yılan yan dalgalanma hareketini yapacak ortamda çıkıntı ve düzensizlikler bulamadığında bu harekete başvurur. Bu harekette, yılan destek noktalarını vücudunun

belirli bölümlerini kaldırarak kendisi oluşturur. Bu sayede, yerdeki doğal çıkıntılara ve destek noktalarına ihtiyaç duymadan hareket edebilir.



Şekil 2.8. Sinüs kaldırma hareket biçimi (Oleg Shmakov/BBC WorldWide)

## 2.6. Robot Kontrol Tipleri

Yılsarı robot kontrol tipleri 4 kategoriye ayrılırlar. Bunlar manuel, model tabanlı, sinüs tabanlı ve CPG(Central Pattern Generator) tabanlı olanlardır.

### 2.6.1. Manuel Yolla Kontrol Tipi

Manuel tip kontrolde genelde pozisyon tabloları kullanılmaktadır. Örneğin moduler robotlara kolayca hareket uygulamak için, Mark Yim, PolyBot isimli robotunda "yürüyüş kontrol tabloları" olarak adlandırdığı tabloları kullanmıştır [40]. Bu tablolarda sütunlar bir vektörü göstermekte olup vektörler robotun her bir anı için pozisyon bilgisi içermekte idi. Kontrolör tabloları gözden geçirerek gerekli pozisyon bilgilerini hareket organlarına göndermektedir. Robot tabloyu sonuna kadar uyguladıktan sonra tablonun başına dönerek devam etmektedir.

Hareketin her bir safhası tek tek tanımlanarak robotun istenen hareketleri yapması sağlanmaktadır. Prieto-Moreno tarafından geliştirilen Puchobot I isimli robotun hareketi içinde pozisyon tabloları kullanılmıştır. Kullanıcılar bilgisayar programındaki grafik ara yüzü kullanarak istenen pozisyon verilerini girebilmekteydi.

Manuel kontrol tipi daha çok robotların prototip aşamasında hızlı bir şekilde denenip test edilmesi ve olası mekanik sorunların tasarımın erken safhalarında tespit edilmesi için kullanışlıdır. Fakat gerçek zamanlı uygulamalarda özellikle eklem sayısı fazla olan

robotlarda tabloların oluşturulması zor ve hesapta olmayan bozucu girişler için hazırlıksız bir kontrol tipidir [6].

### **2.6.2. Model Tabanlı Kontrol Tipi**

Model tabanlı kontrol sistemleri, robotun kinematik veya dinamik modellerini hareket üretmek için kullanır. Yılınsı robota ait kinematik ve dinamik tanımlamalar ayrı bir bölümde ele alınmışlardır. Kinematik model tabanlı çalışmalar 1996 yılında Ostrowski ve Burdick, 2003 yılında Matsuno ve Suenaga tarafından çalışılmıştır. Dinamik tabanlı çalışmalar ise 1999 yılında Prautsch ve Mita, 2001 yılında ise Date ve arkadaşları, 2002 yılında Ute ve Ono, 2003 yılında ise McIsaac Ostrowski tarafından çalışılmıştır. Fakat modele dayalı yaklaşımlar, örneğin, kinematik kısıtlamaları veya hareket denklemlerinin yaklaşımlarını kullanarak belirli bir robot için en hızlı hareketi tanımlamak için bir yol hesaplar. Bu nedenle model tabanlı yaklaşımlara ait kontrolörlerin tasarımı çok önemli fakat iki sınırlaması vardır. İlk olarak oluşturulan kontrolör operatör tarafından etkileşimli kullanıma uygun olmamaktadır. İkinci olarak ise kontrolörün performansı karmaşık bir ortamda istenmeyen kuvvetlerle etkileşim durumunda bozulacaktır [41].

### **2.6.3. Sinüs Tabanlı Kontrol Tipi**

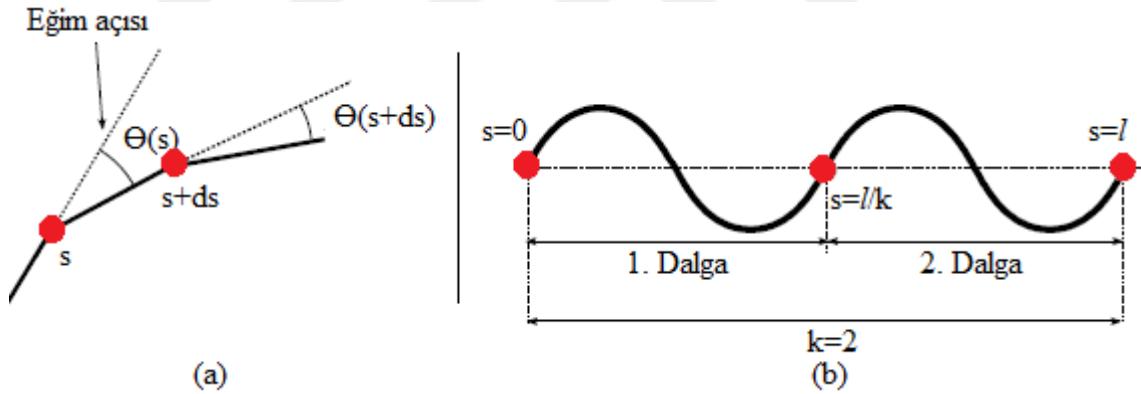
Sinüs tabanlı kontrol sistemi temel sinüs fonksiyonlarını kullanır. Bu konuda 2002 yılında Miller ve 2005 yılında Tsakiris ve arkadaşlarının çalışmaları vardır. Böyle bir yaklaşımın avantajı basitliği olup ve frekans, genlik ve dalga boyu gibi önemli parametrelerinin açıkça tanımlanmış olmasıdır. Motorların bir sonraki adımları basit denklemler yardımıyla kolayca hesaplanarak motorlara hızlıca gönderilebilir. Sinüs tabanlı kontrolün bir dezavantajı, sinüs fonksiyonu parametrelerinin çevrimiçi değişikliklerde (örneğin, genlik ya da frekans) motorlar ve redüktörler sarsıntılı hareketleri üretecek ve böylelikle istenen değerlerden kesintili atlamalar olacaktır. Bu sorun bir ölçüde parametreleri ve çıkışları filtreleme ile aşılabılır. Bu kontrol tipinin başka bir dezavantajı ise dahili sensor geribildirim sinyallerinin entegrasyonunun zorluğudur [41].

### 2.6.3.1. Yılsansı Sinüzoidal “S” Hareketinin Tanımı

Yılsansı kavis eğrisi Hirose tarafından sapma-sapma eksenli yılsansı robot çalışması sırasında geliştirilmiştir. Tanımı gereği vücut uzunluğu boyunca sinüzoidal olarak değişen bir eğridir [6]. Bu ifade aşağıdaki denklem de gösterilmiştir.

$$\theta(s) = A \sin\left(\frac{2\pi k}{l} s\right) \quad (2.1)$$

A parametresi genliği, k dalga sayısını l toplam uzunluğu ve s ise vücut eğrisi boyunca vücut uzunluğunu ifade etmektedir. Bükülme açısı  $\Theta(s)$ , ds uzaklığının ayırdığı iki noktadan geçen eğrinin tanjantı biçiminde tanımlanmıştır. Yılsansı eğri Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Uzaysal periyot l/k olup, l toplam uzunluktur. Eğrinin s=0 ile s=l/k arasında kalan kısmı ise tam bir dalgayı gösterir.



Şekil 2.9. S hareket biçimi parametreleri a) açılar b) dalga biçimi

Yukarıda b şeklinde k=2 olup bu değer sinüzoidal S dalga sayısını göstermektedir.

### 2.6.3.2. Yanal Dalgalanma Hareketi

Hareket tamamen sapma ekseninde gerçekleşir. Bu yüzden robotun yunuslama eksenine ait motorları hareketsiz kalmaktadır. Denklem aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha \left(\frac{K_n \pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n} i\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

### 2.6.3.3. Doğrusal Hareket

Bu hareket biçiminde hareket tamamen yunuslama ekseninde geçer ve sapma eksenindeki motorlar hareketsizdir. Denklem aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\alpha \left( \frac{K_n \pi}{n} \right) \sin\left( \frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n} i \right) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

### 2.6.3.4. Yan Yan Hareket

Bu hareket biçiminde hem yunuslama hem de sapma eksenini beraber çalışırlar. Eksenlerin dalga boyları oranı 1/1 ve faz farkı  $-\pi$  dir. Denklem aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = -2\sin\left(\frac{K_n \pi}{n}\right) \begin{bmatrix} \alpha \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n} i\right) \\ \alpha \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n} i - \pi\right) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

### 2.6.3.5. Sinüs Kaldırma Hareketi

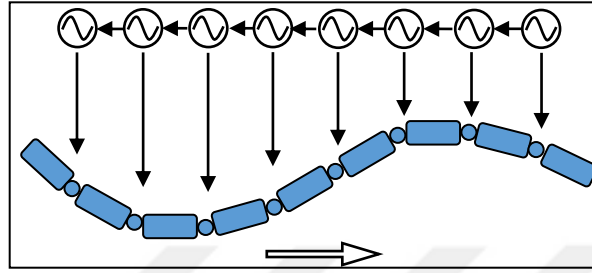
Bu hareket biçiminde hem yunuslama hem de sapma eksenini beraber çalışırlar. Eksenlerin dalga boyları oranı  $\frac{1}{2}$  ve faz farkı  $-\pi/2$  dir. Denklem aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} \alpha \left( \frac{K_n \pi}{n} \right) \sin\left( \frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n} i \right) \\ \alpha \left( \frac{K_n \pi}{n} \right) \sin\left( \frac{4K_n \pi}{L} s + \frac{4K_n \pi}{n} i - \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2.6.4. CPG(Merkezi Desen Üretici) Tabanlı Kontrol Tipi

Son yıllara ait çalışmalarda ise sıkça CPG geri beslemesiz genlik ve frekansı ayarlanabilen özel bir yapay sinir ağları uygulamasıdır. 2002'de Wilbur ve arkadaşları, 2003'te Conradt ve Varshavskaya, 2005'te Lu ve arkadaşları, 2006'da Tsakiris ve arkadaşları hareket için gerekli S dalgalarını CPG yardımıyla oluşturmuşlardır. CPG,

ritmik hareket jeneratörü olarak bilinir. Birçok uygulamada kullanılan yılan hareket yöntemidir. CPG sadece yılanlı robotlar için değil, diğer canlıların hareket sistemlerini robotlar üzerinde üretmek içinde kullanılmaktadır. CPG parametreleri optimize edilerek yılanın hızı artırılmaya çalışılmaktadır [42, 43].



Şekil 2.10. Yılanlı robotlarda CPG hareket biçimi uygulaması

CPG-tabanlı yaklaşım istenen hareket dizisini oluşturma amaçlı ardışık S dalgaları meydana getirmek için birleştirilmiş doğrusal olmayan osilatörler veya tekrarlı ağ dinamik sistemlerini kullanırlar. İlerleme dalgalarının devir davranış sınırı, zamanla entegre olan diferansiyel denklem yoluyla elde edilir. Bu kontrol yaklaşımı ayrıca kolayca diferansiyel denklemlere duyuşal geribildirim sinyalleri ile entegre edilebilir ve mekanik vücut yapısı tarafından sürüklenme gibi ilginç özellikler de gösterirler. Dahası, CPG temelli modeller, çıkış sinyali ile belirgin bir ilişki gösteren genlik ve frekans gibi açık parametrelere sahiptir. CPG tabanlı denetleyici modüller arasında iletişime bağlıdır. Bu ise hareket iletimini yumuşatma için çok yararlıdır. Sadece iletişim koordinasyonu olmadan CPG-sinyali kullanılırsa, o zaman sinüs tabanlı kontrolör ile karşılaştırıldığında modüler robot kontrolünde hiçbir avantajı yoktur. Ancak, CPG tabanlı yaklaşımı kullanmanın bir zorluğu, farklı robot tiplerine uygun belirli desenleri üretmek amaçlı CPG ağının tasarımıdır. Ayrıca model tabanlı olmadığından sürtünmeyi, kütle ve diğer fiziksel özellikleri denkleme alamaz [44].

## 3. BÖLÜM

# YILANSI ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMIĞI

### 3.1. Yılsanı Robot Kinematığı

Robot kinematığı, üç boyutlu uzayda robotun kendi tasarımı ve çevresindeki nesnelerin yerleşimiyle ilgilenir. Yerleşim bilgisi konum vektörü ve yönelim (orientation) matrisi gibi iki nitelikte açıklanır. Matematiksel olarak nesnelerin konumu bir konum vektörüyle, yönelimi ise bir yönelim matrisi yardımıyla belirlenir.

Kinematik bilimi nesnelerin devinimleriyle ilgilenen bir hareket bilimidir. Robot kinematığı ile robotun kuvvet, hız ve ivme analizi yapılır, Özellikle uç işlevci (end-effector) ile eklemler arasında bir ilişki tanımlar. Bir robot yapısal olarak birbirine göre bağımsız hareket eden, öteleme (prismatic-genellikle P) ve dönme (revolute- R harfi ile gösterilir) hareketi gerçekleştiren eklemlerle, bu eklemleri birbirine birleştiren bağlardan oluşur. Her bir robot eklemının konumu ve yönelimi bir öncekine veya bir sonrakine göre ifade edilir. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denir. Bu ilişkiyi oluşturan ifadeler, robotun konum ve yönelim bilgisini içeren 4x4 homojen dönüşüm matrislerinden (transformation matrix) oluşur. Her bir eklem için bir homojen dönüşüm matrisi oluşturulur. Oluşturulan bu matrislerin sayısını, robotun serbestlik derecesi (degree of freedom) belirler. Üç boyutlu uzayda herhangi bir noktaya herhangi bir yönelimle ulaşmak için altı serbestlik derecesi yeterlidir. Buna karşın, serbestlik derecesi altıdan fazla olan robotlarda artıklık (redundancy) durumu oluşur. Bu

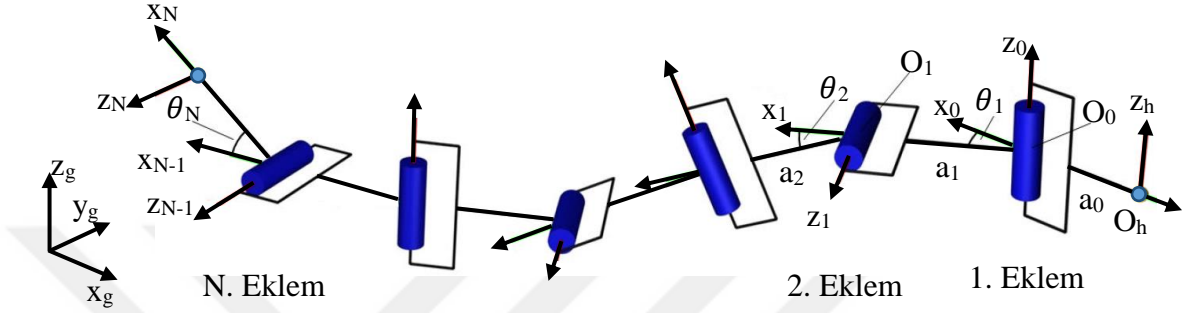
durumda, bir eklemin taradığı alan diğer eklemin taradığı alanla çakışır. Bu olay özel koşullar için tasarlanmış özel maksatlı robotlarda görülür.

Robotun ileri yön kinematiği (forward kinematics), robot bağlarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle ilgilenir. Bir robot, ana çerçevesinden, araç çerçevesine doğru birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle tutturulmuş seri bağlardan oluşur. İki bağ arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Eklem dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, ana çerçeveye araç çerçevesi arasındaki ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre verir. Başka bir ifadeyle, ileri kinematik denklemler, eklem değişkenlerinin (prizmatik veya dönel) verilmesiyle uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre hesaplar.

Robotlar için ters kinematik problem ise, araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu verildiğinde, robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan açı setlerinin hesaplanması şeklinde tanımlanır. Ters kinematikte karşılaşılan denklemlerin doğrusal olmamasından dolayı bu denklemlerin çözümleri son derece karmaşıktır. Elde edilen doğrusal olmayan denklemler, tekil çözüm üretmeyip birden fazla çözüm üretebilir [45].

Şekil 3.1'de gösterilen kinematik parametreler, N tane seri olarak bağlanmış mekanizmaların kinematiğini modellemek için sistematik bir yaklaşıma sahip Denavit-Hartenberg kuralına göre belirlenmiştir [46]. Herhangi bir robot, her bir ekleme ait dört büyüklükle kinematik olarak tanımlanabilir. Bunlardan ikisi eklemi tanımlarken, diğer ikisi ise komşu eklemlerle bağlantısını tanımlar. Yaygın kullanımda dönel mafsallarda  $\theta_i$ , eklem değişkeni olarak adlandırılır. Diğer üç parametre ise sabit bağlantı parametreleridir. Prizmatik eklemlerde ise  $d_i$  eklem değişkeni iken, diğer üç parametre ise sabit bağlantı parametreleridir. Bu değişkenler, iki eksen arasındaki bağ uzunluğu  $a_{i-1}$ , (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı  $\alpha_{i-1}$ , üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı  $d_i$ , ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı  $\theta_i$ 'dir. Bir mekanizmanın bahsedilen büyüklüklerle tanımlanmasını sağlayan gösterime Denavit-Hartenberg gösterimi denmektedir.

Bu değişkenleri belirlemek için, öncelikle Şekil 3.1'de gösterildiği gibi robotun dönme eksenleri belirlenir ve dönme eksenleri bağlardan bir fazla olacak şekilde numaralandırılır. Aşağıda N eklemlili yunuslama ve sapma eksenlerine sahip bir yılanlı robotun eksen ve koordinat yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. N eklemlili iki eksenli bir robotun kinematik parametreleri

Daha sonra bu eksenlerin her birine birer koordinat sistemi yerleştirilir ve bağ dönme eksenini, koordinat sisteminin Z eksenini kabul edilir. Sonrasında  $X_{i-1}$  yönünde uzanan  $Z_{i-1}$  ile  $Z_j$  arasındaki dik uzaklık  $a_{i-1}$  bağ uzunluğu olarak belirlenir. Yılanlı robota ait Denavit–Hartenberg parametre verileri alttaki tabloda verilmiştir. Uzunluk birimleri m ve açı birimleri radyan cinsindedir.

Tablo 3.1. Yılanlı robota ait DH parametreleri

$i$	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$\theta_i$
0	0.065	0	0	$\pi$
1	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_1$
2	0.065	0	$\pi/2$	$\theta_2$
3	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_3$
4	0.065	0	$\pi/2$	$\theta_4$
5	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_5$

6	0.065	0	$\pi/2$	$\theta_6$
7	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_7$
8	0.065	0	$\pi/2$	$\theta_8$
9	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_9$
10	0.065	0	$\pi/2$	$\theta_{10}$
11	0.065	0	$-\pi/2$	$\theta_{11}$
12	0.065	0	0	$\theta_{12}$

Üst paragrafta açıklanan dört parametreye ek olarak  $\theta_i$  eklem açılarını göstermektedir. Robotun kafa ucu genel çerçeve pozisyonu ve oryantasyon homojen dönüşüm matrisi tanımlanır. Eğer her ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki  ${}^{i-1}_i T$  dönüşüm matrisi ile ifade edilir. İlk eklemle ait dönüşüm matrisi, ilk eklemle ana çerçeve arasında bir ilişki tanımlarken, son eklemle ait dönüşüm matrisi ise uç işlevcisi ile son eklem arasında bir ilişki tanımlar. Arka arkaya sıralanan bu eklem dönüşüm matrislerinden yararlanarak ana çerçeveye araç çerçevesi arasında bir ilişki tanımlanır. Bu ilişkiye ileri kinematik denir ve araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre ifade eder ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T \dots \dots \dots {}^{N-1}_N T \quad (3.1)$$

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Her bir çerçeve arasında, yukarıdaki matris formda D-H tablosundaki parametreler konularak aşağıda ilk ve son parametreleri verilen çerçeve matrisleri elde edilir.

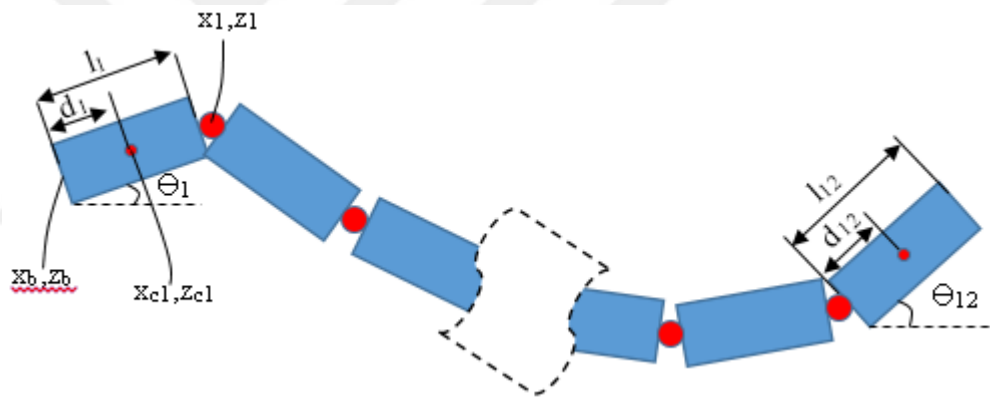
$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\pi & -s\pi & 0 & 0.065 \\ s\pi c0 & c\pi c0 & -s0 & 0 \\ s\pi s0 & c\pi s0 & c0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

...

(3.3)

$${}^{11}_1T = \begin{bmatrix} c\theta_{12} & -s\theta_{12} & 0 & 0.065 \\ s\theta_{12}c\pi/2 & c\theta_{12}c\pi/2 & -s\pi/2 & 0 \\ s\theta_{12}s\pi/2 & c\theta_{12}s\pi/2 & c\pi/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Şimdi robotun kinematiğine ait bileşenler verilecektir. Kinematik modele ait parametreler temsili robot çizimi üzerinde aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. N eklemli yılanlı robot ve kinematik bileşenleri

Yılanlı robotun her bir eklemi  $m_i$  kütesine ve  $l_i$  uzunluğuna sahip olsun.  $\theta_i$  bileşeni eklemlerle x eksenini arasındaki açı,  $d_i$  parametresi, eklemin ağırlık merkezinin yerleşimini gösterebilir. Robot için kinematik bir model tanımlamak için, robotun her eklemine bir koordinat sistemi eklenmesi gerekmektedir.  $i$ . eklemin pozisyon, hız ve ivme denklemleri aşağıda verilmiştir. Yerçekiminin türevi, hızı, hızın türevi ise ivmeyi vermektedir [47].

$$x_i = x_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \cos \theta_j \quad (3.4)$$

$$z_i = z_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \theta_j \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_i = \dot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j \quad (3.6)$$

$$\dot{z}_i = \dot{z}_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j \quad (3.7)$$

$$\ddot{x}_i = \ddot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \ddot{\theta}_j \sin \theta_j - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j^2 \cos \theta_j \quad (3.8)$$

$$\ddot{z}_i = \ddot{z}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \ddot{\theta}_j \cos \theta_j - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j^2 \sin \theta_j \quad (3.9)$$

Benzer şekilde, i. bağlantıya ait yerçekimi merkezlerinin konum, hız ve ivme parametreleri aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir.

$$x_{ci} = x_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \cos \theta_j + d_i \cos \theta_i \quad (3.10)$$

$$z_{ci} = z_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \theta_j + d_i \sin \theta_i \quad (3.11)$$

$$\dot{x}_{ci} = \dot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j - d_i \dot{\theta}_i \sin \theta_i \quad (3.12)$$

$$\dot{z}_{ci} = \dot{z}_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j + d_i \dot{\theta}_i \cos \theta_i \quad (3.13)$$

$$\ddot{x}_{ci} = \ddot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \ddot{\theta}_j \sin \theta_j - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j^2 \cos \theta_j - d_i \ddot{\theta}_i \sin \theta_i - d_i \dot{\theta}_i^2 \cos \theta_i \quad (3.14)$$

$$\ddot{z}_{ci} = \ddot{z}_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j \ddot{\theta}_j \cos \theta_j - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta}_j^2 \sin \theta_j + d_i \ddot{\theta}_i \cos \theta_i + d_i \dot{\theta}_i^2 \sin \theta_i. \quad (3.15)$$

Yılınsı robot, n adet eklemden oluşmuş olup tüm yılınsı robota ait ağırlık merkezi aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunulabilir.

$$MX_C = \sum_i^n mx_{ci}, \quad (3.16)$$

$$MZ_C = \sum_i^n mz_{ci}, \quad (3.17)$$

M ve  $(X_C, Y_C)$ , toplam kütle ve ağırlık merkezinin pozisyonunu vermektedir. Ağırlık merkezinin yer değişimi, hızı, ivmesi aşağıdaki ifadelerle elde edilir [47].

$$X_C = \frac{\sum_{i=1}^n mx_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.18)$$

$$\dot{X}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m\dot{x}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \quad (3.19)$$

$$\ddot{X}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m \ddot{x}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ddot{x}_i \quad (3.20)$$

$$Z_C = \frac{\sum_{i=1}^n m z_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (3.21)$$

$$\dot{Z}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m \dot{z}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{z}_i \quad (3.22)$$

$$\ddot{Z}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m \ddot{z}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ddot{z}_i \quad (3.23)$$

$X_C$ ,  $Y_C$  yer değişimi, bu ifadelerin birinci türevleri, hızı ve ikinci türevleri ise ivmeyi vermektedir.

### 3.2. Yılınsı Robot Dinamiği

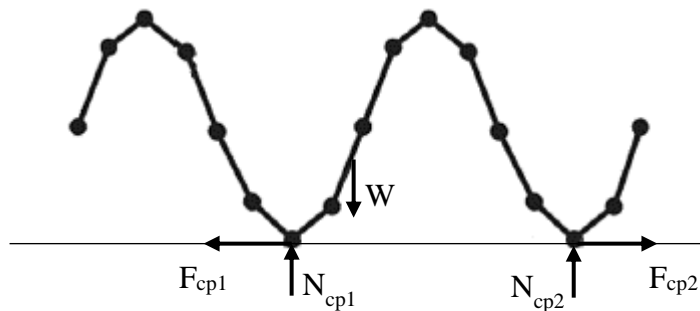
Robot hareket organlarının dinamik analizi, eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot hareket bileşenlerinin, zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Bir robotun, dinamik modelinin çıkarılabilmesi için, robot kolunun dinamik davranışını açıklayan doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin elde edilip çözülmesi gerekir.

İlk olarak bir robot kolunun dinamik modelinin çıkarılması konusunda Lagrange-Euler ve Newton-Euler denklemleri temel alınarak şimdiye kadar birçok çalışma yapılmış ve bu denklemler kullanılarak birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en önemlileri, önce Uicker'in (1965) geliştirip daha sonra Bejczy'nin (1974) uyguladığı Lagrange-Euler, Hollerbach (1980) tarafından geliştirilen dögüsel (rekürsif) Lagrange, Luh, Walker ve Paul'nun (1980) geliştirdiğı Newton-Euler ve Lee, Lee ve Nigam (1983) tarafından geliştirilen genelleştirilmiş d'Alembert yöntemleridir. Bu yöntemlerin tamamı aynı robot düzenleşimi için eşdeğer çözümler üretmektedir. Buna rağmen bu yöntemlerin yapıları birçok nedenden dolayı farklılık göstermektedir. Bu yöntemlerden

bir kısmı bilgisayar simülasyonu için, bir kısmı robot kontrolü için, bir kısmı ise robot eyleyicilerinin daha hızlı sürülmesi için uygundur.

Bejczy (1974), ardışık robot bağları için 4x4 homojen dönüşüm matris gösteriminden faydalanarak altı serbestlik derecesine sahip bir Standford robotunun dinamik modelini, genelleştirilmiş koordinatlardan faydalanıp iş ve enerji ifadelerinden yararlanan Lagrange-Euler denklemlerini kullanarak çıkardı. Matlab simulink benzeşim programı için uygun bir yapıya sahip olan Lagrange-Euler yöntemi yoğun matematiksel ifadeler içermesine karşın, geçmiştekinin aksine günümüz bilgisayarlarında gerçek zamanlı ileri ve ters dinamik problem çözümünde oldukça hızlı işlediğinden, çok sık tercih edilen bir yöntem olmuştur [48].

Bu bölümde doğrusal hareket yapan yılanı bir robotun dinamik fonksiyonları ele alınmıştır. Yılanı robotun dinamik denklemlerinin bulunması robotu hareket ettirmek için gerekli tork hesabı için gereklidir. Bundan başka, bir dinamik model en iyi performans optimizasyonu sağlama amaçlı simülasyonda, kullanılabilir. Yılanı robot zorluklarından birisi de dinamik denklemlerini türetmek ve bunu n eklemlili bir robota genellemektir. Burada Lagrange yöntemi ile dinamik model elde edilmiştir [47].



Şekil 3.3. Yılanı robota ait dinamik denklemden kullanılan parametreler

Doğrusal harekette ilerleme vücut eğrisi boyunca olduğundan her bir eklem yere sırayla değecektir.  $K_n$  değeri 2 olarak seçildiğinde en az iki değme noktası olacaktır. Bu değme noktaları yılanı hareket ettirmek için gerekli iki sürtünme kuvvetine maruz kalmaktadır. Hareket yüzeyindeki sürtünme kuvveti, vücut şekline göre değişen basınç miktarına bağlıdır. Sürtünme kuvveti olarak Coulomb sürtünme modeli aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F_i = -\mu \cdot \text{sign}(v) \cdot N_i, \quad (3.24)$$

Denklemden  $\mu$ , yüzeye değme noktası arasındaki sürtünme katsayısıdır. Signum fonksiyonunun anlamı eğer  $V > 0$  ise 1, değilse -1 olarak işlem göreceğini belirler. Burada dikkat edilmesi gereken nokta değme noktalarının asla sabit olmadığıdır. Bununla birlikte bir değme noktası diğerine göre durağan diğeri ise yüzeyde kaymaktadır. İki sürtünme kuvvetinin farkından oluşan bileşke kuvvet robotu hareket ettirecek kadar büyük olmalıdır. Newton'un ikinci kanunu robotun serbest vücut diyagramına uygulandığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$N_{cp2} = \frac{1}{d}[(W + M\ddot{Z}_C)(x_c - x_{cp1}) - M\ddot{X}_{CZc}] \quad (3.25)$$

$$N_{cp2} - W + N_{cp1} = M\ddot{Z}_C, \quad (3.26)$$

Denklemlerde  $d$ , destek noktaları arası uzaklık,  $W$  yılanı robotun ağırlığı,  $N$  destek kuvveti  $M\ddot{X}_C$  ve  $M\ddot{Z}_C$  ise  $x$  ve  $z$  eksenleri boyunca atalet kuvvetlerini ifade eder. Yukarıdaki eşitlikler iki destek kuvveti olan  $N_{c1}$  ve  $N_{c2}$  yi bulmak için kullanılabilir. Bu kuvvetler farkı hareket kuvveti olarak hangi kuvvetin uygulanacağını belirlemede kullanılabilir.

### 3.2.1. Lagrange Metodu

Schilling'e göre karmaşık dinamik sistemler, kinetik ve potansiyel enerji farkından yararlanan Lagrange denklemini kullanmak suretiyle basit bir şekilde modellenilebilir.  $K$  ve  $P$  sırasıyla bir robot kolunun kinetik ve potansiyel enerjisini temsil etsin. Bu robot kolunun kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı temsil eden Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (3.27)$$

Anlık sistem konfigürasyonu  $(x_b, z_b)$  ve  $\Theta_i$  ile takip edilecektir. Bu nedenle önce genelleştirilmiş koordinatlar bulunur.

$$q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n, x_b, z_b]. \quad (3.28)$$

Hareket denklemi ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i^{nc} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n + 2) \quad (3.29)$$

Denklemden K kinetik, V ise potansiyel enerjidir. Korunumsuz kuvvetler  $Q_i^{nc}$  genelleştirilmiş koordinatlar sanallaştırılmış yer değişimleri olarak verildiğinde işleme dahil olurlar. Böylece genelleştirilmiş kuvvetler aşağıdaki gibi bulunur.

$$Q_{\theta_j} = -l_j \left[ \sin \theta_j \sum_{i=j+1}^n f_{xi} \right] + l_j \left[ \cos \theta_j \sum_{i=j+1}^n N_{zi} \right] + \tau_{j-1} - \tau_j \quad (3.30)$$

$$Q_{x_b} = \sum_{i=j+1}^n f_{xi} \quad (3.31)$$

$$Q_{z_b} = \sum_{i=j+1}^n N_{zi}, \quad (3.32)$$

$f_{xi}$  sürtünme kuvveti,  $N_{zi}$  yardımcı kuvvet ve  $Q_{\Theta_i}$  genelleştirilmiş koordinat  $\Theta_i$  ile ilişkili genelleştirilmiş kuvvettir.  $Q_{x_b}$  ve  $Q_{z_b}$  ise  $x_b$  ve  $z_b$  ile ilişkili genelleştirilmiş kuvvetlerdir. n eklemlili yılanlı robotun kinetik enerjisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$K = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} l_i \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{z}_i^2) \right] \quad (3.33)$$

Yukarıdaki denklemde  $\dot{x}_i$ ,  $\dot{z}_i$  yerlerine konulduğunda aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned}
K = & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} (l_i + m_i d_i^2) \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{z}_i^2) \right] \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^n m_i d_i \dot{\theta}_i \sum_{j=1}^{i-1} [l_j \dot{\theta}_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \right\} \\
& + \sum_{i=1}^n [m_i d_i \dot{\theta}_i (\dot{z}_b \cos \theta_i - \dot{x}_b \sin \theta_i)] \\
& + \sum_{i=1}^n \left\{ m_i \sum_{j=1}^{i-1} [l_j \dot{\theta}_j (\dot{z}_b \cos \theta_j - \dot{x}_b \sin \theta_j)] \right\} \\
& + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} m_i \left( \sum_{j=1}^{i-1} [l_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j] \right)^2 + \frac{1}{2} m_i \left( \sum_{j=1}^{i-1} [l_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j] \right)^2 \right\}
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Potansiyel enerji denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g z_{ci}. \tag{3.35}$$

$z_{ci}$  denklemi yukarıdaki denklemde yerlerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g z_{ci} = \sum_{i=1}^n \left\{ m_i g \left[ z_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \theta_j + d_i \sin \theta_i \right] \right\} \tag{3.36}$$

$Q_{\theta_i}$  ve  $V$  denklemleri Lagrange formülünde yerlerine yazılırsa  $n$  eklemlili robot için dinamik denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$BT = M(\theta)\ddot{q} + H(\theta, \dot{\theta}) + F(\theta) + G(\theta) + S(\theta) \quad (3.37)$$

$M_{(n+2) \times (n+2)}$  pozitif simetrik atalet matrisi,  $H_{(n+2) \times 1}$  merkezkaç ve Coriolis terimleri,  $F_{(n+2) \times 1}$  sürtünme kuvvetleri,  $B_{(n+2) \times (n-1)}$  sabit matris,  $G_{(n+2) \times 1}$  matrisi potansiyel enerji,  $S_{(n+2) \times 1}$  matrisi yardımcı kuvvetleri,  $T_{(n-1) \times 1}$  giriş torkunu ve  $q, \dot{q}, \ddot{q}$   $(n+2) \times 1$  genelleştirilmiş koordinatlar matrisi ve onların türevlerini göstermektedir. Denklemdaki matrisler aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} {}^p M_{n \times n} & {}^p N_{n \times 2} \\ {}^q M_{2 \times n} & {}^q N_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$${}^q N = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n m_i \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$${}^p N = {}^p M^T \quad (3.40)$$

$${}^p M_{ij} = \begin{cases} \left[ m_j d_j l_j + \left( \sum_{k=j+1}^n m_k \right) l_i l_j \right] \cos(\theta_i - \theta_j) \\ \quad i < j, 1 \leq j \leq n \\ I_i + m_i d_i^2 + l_i^2 \left( \sum_{j=i+1}^n m_j \right) \\ \quad i = j, 1 \leq j \leq n \\ {}^p M_{ji} \\ \quad i > j, 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.41)$$

$${}^q M_{2,j} = \cos \theta_j \left[ m_j d_j + \left( \sum_{k=j+1}^n m_k \right) l_j \right] \quad (3.42)$$

$$\text{Her bir } (j=1,2,\dots,n) \text{ için} \quad (3.43)$$

$$q_{M_{1,j}} = -\sin \theta_j \left[ m_j d_j + \left( \sum_{k=j+1}^n m_k \right) l_j \right]$$

Her bir (j=1,2,...,n) için

$$H = \begin{bmatrix} p_{H_{nx1}} \\ q_{H_{2x1}} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$p_{H_i} = l_i \sum_{j=i+1}^n \left\{ \left[ m_j d_j + l_i \left( \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \right] \sin(\theta_i - \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \right\} \quad (3.45)$$

$$\sum_{j=1}^{i-1} \left\{ \left[ m_i d_i + l_i \left( \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \right] l_j \sin(\theta_i - \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \right\} \quad (3.46)$$

(i = 1, 2, ..., n)

$$q_H = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n \cos \theta_i [m_i d_i + (\sum_{k=i+1}^n m_k) l_i] \dot{\theta}_i^2 \\ -\sum_{i=1}^n \sin \theta_i [m_i d_i + (\sum_{k=i+1}^n m_k) l_i] \dot{\theta}_i^2 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$F = \begin{bmatrix} p_{f_{nx1}} \\ q_{f_{2x1}} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} p_{G_{nx1}} \\ q_{G_{2x1}} \end{bmatrix} \quad s = \begin{bmatrix} p_{S_{nx1}} \\ q_{S_{2x1}} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$p_{f_j=l_j} \left[ \sin \theta_j \sum_{i=j+1}^n (f_{xi}) \right] q_G = \left[ \sum_{i=1}^n m_i g \right] \quad (3.49)$$

$$q_f = \left[ -\sum_{i=1}^n (f_{xi}) \right] p_G = \cos \theta_j \left[ m_j d_j + \sin \theta_j \left( \sum_{k=j+1}^n m_k \right) l_j \right] g \quad (3.50)$$

$$p_{S_j} = l_j \left[ \cos \theta_j \sum_{i=j+1}^n (N_{zi}) \right] \quad (3.51)$$

$$q_s = \left[ - \sum_{i=1}^n (N_{zi}) \right] \quad (3.52)$$

$$B = \begin{bmatrix} D_{n \times n} \\ 0 \end{bmatrix} D_{ij} = \begin{cases} -1 & i = j \\ 1 & i = j + 1 \\ 0 & \text{diğerleri} \end{cases} \quad (3.53)$$

Dinamik problemler düz dinamik (forward dynamics) ve ters dinamik (inverse dynamics) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [47].

### 3.2.2. Düz Dinamik

Düz dinamik problemler, herhangi bir t anında istenen kuvvet ve momentler verildiğinde robot eklemlerinin alacağı konum ve yönelme için gerekli olan genelleştirilmiş koordinatlar, eklem, hız ve ivmeleri bulma işlemlerini kapsamaktadır. Bunun için eklemlere ait tork girdileri verilerek yılanı robotun hareketi hesaplanır. Bunu hesaplamak için Denklem 3.37 Euler yöntemi kullanılarak çözülür. Denklem 3.37, (n+2) boyutlu, (n+2) bilinmeyen değişkene sahip doğrusal bir denklemdir ( $\ddot{q} \in R^{n+2}$ ). Bu denklemin çözümü ile eklemlere ait açısal ivmeler ve baş eklemdaki bir noktanın ivmelenmesi elde edilebilir. Sonrasında ise açısal yer değişimi, açısal hızlar, doğrusal hız ve pozisyonlarda hesaplanabilir. Bu şekilde yılanı robot hareketine ait parametreler, eklemler için tüm giriş tork değerleri verildiğinde elde edilebilir.

### 3.2.3. Ters Dinamik

Ters dinamik problemler ise, robot kolunun istenen bir konuma ve yönelmeye gelmesi için gerekli olan kuvvet ve momentlerin hesaplanması işlemidir. Denklem 3.37 gerekli tork değerlerini ve robotun baş ekleminin koordinatlarını bulmak için kullanılabilir. Mutlak ve bağıl eklem açıları arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde bulunur. Mutlak ve ilişkiyel eklem açıları arasındaki ifade aşağıda gösterilmiştir.

$$\varphi_i = \theta_{i+1} - \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.54)$$

Yukarıdaki ifade matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta = E_\varphi + e\theta_1 \quad (3.55)$$

Denklemden  $\varphi$ , n boyutlu vektör,  $\theta_1$  baş eklemin mutlak açısıdır.  $E_{ij}$  ve  $e$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$e = [1, 1, \dots, 1]^T \text{ ve } E_{ij} = \begin{cases} 1 & i > j \\ 0 & \text{diğerleri} \end{cases} \quad (3.56)$$

Denklemler 3.37, iki kısma ayrılmış olup bunlar,

$${}^pM(\theta)\ddot{\theta} + {}^pN(\theta)\dot{r}_b + {}^pH(\theta, \dot{\theta}) + {}^pf(\theta) + {}^pG(\theta) + {}^pS(\theta) = D\tau \quad (3.57)$$

$${}^qM(\theta)\ddot{\theta} + {}^qN(\theta)\dot{r}_b + {}^qH(\theta, \dot{\theta}) + {}^qf(\theta) + {}^qG(\theta) + {}^qS(\theta) = 0 \quad (3.58)$$

Denklemleridir. Burada;

$$M = \begin{bmatrix} {}^pM_{n \times n} & {}^pN_{n \times 2} \\ {}^qM_{2 \times n} & {}^qN_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} {}^pH_{n \times 1} \\ {}^qH_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad r_b = \begin{bmatrix} x_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Denklemler 3.54'ün ikinci türevi, Denklem 3.55'te yerine konulursa aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\begin{aligned} \dot{r}_b &= -{}^qN^{-1}({}^qM\ddot{\theta} + {}^qH + {}^qf + {}^qG + {}^qS) \\ &= -{}^qN^{-1}({}^qM(E\ddot{\varphi} + e\dot{\theta}_1) + {}^qH + {}^qf + {}^qG + {}^qS) \end{aligned} \quad (3.60)$$

Denklemler 3.60, Denklem 3.58'de yerine konulursa aşağıdaki denklemi elde etmiş oluruz.

$$\begin{aligned}
& D\tau + ({}^pN {}^qN^{-1q}M - {}^pM)e\ddot{\theta}_1 \\
& = ({}^pM - {}^pN {}^qN^{-1q}M)E\dot{\varphi} - {}^pN {}^qN^{-1}({}^qH + {}^qf + {}^qG + {}^qS) \\
& \quad + ({}^pH + {}^pf + {}^pG + {}^pS)
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Elde edilen denklem n boyutlu doğrusal n bilinmeyenli bir denklemdir. Bu denklem çözülerek eklem torkları( $\tau_i$ ) ve baş eklemin açısal ivmesi( $\ddot{\theta}_i$ ) belirlenebilir. Bu değerler bir üstteki denklemde yerlerine konulursa baş eklemin ivmesi( $\ddot{r}_b$ ) elde edilebilir. Daha sonra ise baş eklemin açısal hızı( $\dot{\theta}_1$ )ve pozisyonu( $\theta_1$ ) elde edilebildiği gibi doğrusal hız( $\dot{r}_b$ ) ve pozisyon( $r_b$ ) da elde edilebilir. Robotun hareketini tanımlayan tüm parametreler, robotun vücut şekli değişse dahi bilinebilir [47].

## 4. BÖLÜM

### HAREKET PLANLAMA

#### 4.1. Hareket Planlamaya Giriş

Robotikte nihai hedeflerden birisi otonom robotlar yapmaktır. Böyle robotlar üst düzey görevleri kabul edecekler ve görevlerini insan müdahalesi olmadan yerine getireceklerdir [49]. Günlük hayatta, yapılması gereken görevlerde insan faktörünün dezavantajlarını azaltmak, işlem süresini kısaltmak, zor, karmaşık işlemlerin üstesinden gelmek veya iş güvenliğini sağlamak için insan müdahalesi olmadan hareket eden akıllı robot çalışmaları kaçınılmaz olmuştur. Yılları robotlarında içerisinde bulunduğu tüm mobil robotlar, görevlerini etkin şekilde yerine getirmek için birçok yol planlama tekniğini kullanırlar [50]. Yol planlama çalışması robotun engellere çarpmadan hareket edebileceği ve başlangıç pozisyonundan bitiş noktasına doğru en kısa bir biçimde seyahatini sağlayacak bir yolu arama gayretidir. Robot hareket planlaması ise dinamik yapıyı ve sınırlandırmaları göz ardı ederek yalnızca robot nakline ve gerekli dönüşlere odaklanır [51].

Hareket planlama teknikleri holonomik, holonomik olmayan ve kinodinamik gibi alt gruplara ayrılabilir. Holonomik planlamalar örneğin; piyano masası probleminde olduğu gibi taşınması sırasında holonomik özellikler gösterebilen cisimlerin başlangıç noktasından bitiş noktasına ulaşması için gerekli planlamayı yapar. Holonomik olmayan planlamalar ise araba sürme problemlerinde olduğu gibi holonomik olmayan hareket biçimlerine sahip robotlar için hareket planlama biçimidir. Kinodynamic planlama

eşzamanlı kinematik ve dinamik kısıtlamaları bir robot hareket sorunu konusunu çözmek için çalışır. Kinodinamik planlama ise planlama probleminde, hız ve ivme sınırlarının tatminkâr olması gereken planlamayı gösterir [51]. Başka bir deyişle kinodinamik planlama problemi robot hareket planlamayı kinematik ve dinamik sınırlandırmalarla birleştirmektir [52].

Yılsansız robotlar dışında birçok robot, istenen noktaya en hızlı şekilde en kısa mesafeden gitmektedirler. Yılsansız robotlar ise geniş alanlarda daha hızlı hareket ettiklerinden küçük genlikli sinüzoidal S hareketine imkân verebilen dar alanlarda daha yavaş ilerlemektedirler. Dolayısıyla ile yılsansız robotlarda en kısa mesafe her zaman bu mesafe en kısa sürede alınmayabilmektedir.

Robotlarda hareket planlama çalışmaları 1960'ların sonunda bilgisayar kontrollü robotların geliştirilmesiyle görülmeye başlanmıştır. Bununla birlikte bu alandaki çalışmalar daha çok 1980'lerde yoğunlaşmıştır. Sonraki yıllarda teorik ve uygulamalı yapay zekâ, teorik bilgisayar bilimleri, matematik ve makine mühendisliği dallarının ortak çalışmalarıyla daha da artmıştır [49].

Robotun hareket planlarını oluşturmak için, önce konumunu belirlemek gerekir. Böylece robotun herhangi bir engelle çakışık olmadığından emin olunması gerekmektedir. Bu durum bazı temel soruları ortaya çıkartmaktadır. Robotun her bir noktasının pozisyonunu tamamen belirlemek için ne kadar bilgiye ihtiyaç vardır? Bu bilgiler nasıl temsil edilmeli? Bu temsil edilecek bilgilerin matematiksel özellikleri nelerdir? Bir robot yolu planlaması yaparken robot ortamındaki engellerin nasıl dikkate alınacağı? gibi sorular bunlardan birkaçıdır [53]. Bu sorulara cevap ararken yapılandırma alanı dediğimiz kavram üzerinde durulması gerekmektedir.

#### **4.1.1. Yapılandırma Alanı**

1977 yılında Udupa, engelden sakınma algoritmaları için robotun nokta boyuta küçülmesi fikrini ortaya atmıştır. Lozano Perez ve Wesley bu fikirden yararlanarak çokyüzlü/çokgen engellere değmeden çokyüzlü/çokgen robotların yol planlaması için daha genel ve sistematik bir fikir önermişlerdir [54]. Bu çalışma, yapılandırma alanı kavramına yol açmıştır [55]. Yapılandırma kavramı robotun serbestlik derecelerini

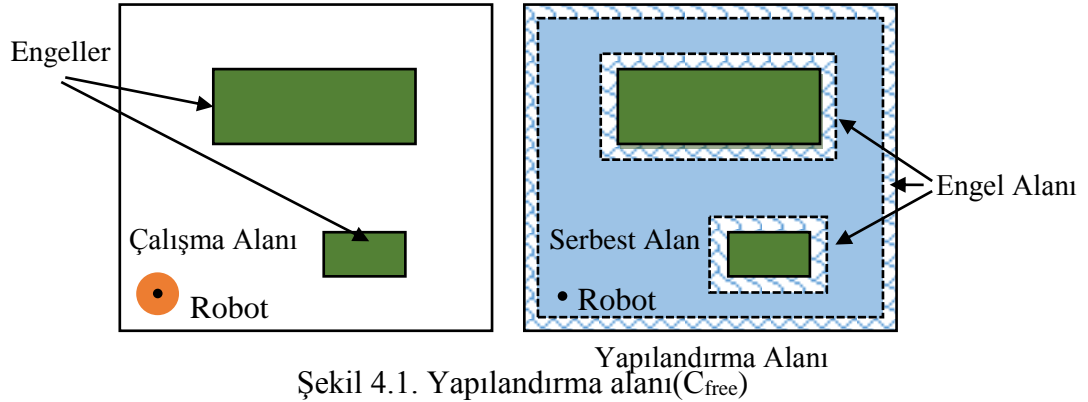
tanımlayan parametre uzayında tek bir nokta olarak temsil edilmesini ifade eder [55]. Engeller yapılandırma alanında yasaklı bölgeleri temsil ederken bu alanın tersi serbest uzayı temsil eder [55]. Robota ait olası hareket alanları da bu alanlardır [56].

Bir robot sistemi yapılandırılması, bu sistemin tüm noktalarına ait pozisyonlarının tamamen belirlenmesinden ibarettir. Diğer deyişle, yapılandırma alanı(Configuration Space=C-space), sisteme ait olası tüm yapılandırma uzayıdır. Bir robotun serbestlik derecesi sayısı yapılandırma alanının boyutu veya yapılandırma alanının belirlenmesi için gerekli olan en az parametre sayısıdır. Bu tanımlamaları gösterim için düzlemde yuvarlanmaksızın hareket eden dairesel yapıya sahip bir mobil robotu ele alalım. Robotun yapılandırmasını hesaplamak için öncelikle merkezinin (x,y) bulunması gerekmektedir. Eğer robotun yarıçapı(r) biliniyorsa robotun işgal ettiği alanlar kümesi  $q=(x,y)$  dir. Bu kümeyi göstermek için  $R(q)$  gösterimi kullanılmıştır. Robota ait yapılandırmayı tanımladığımızda aşağıdaki ifade oluşmaktadır.

$$R(x, y) = \{(x', y') \mid (x - x')^2 + (y - y')^2 \leq r^2\} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki ifadeden (x,y) parametrelerinin dairesel robota ait yapılandırmayı hesaplamak için yeterli olduğu görülmektedir [53]. Yapılandırma alanı robotun çalışma alanında engellerin ve çalışma alanını çevreleyen kenarlara sıfır mesafede kaydırılarak elde edilir. Robot kaydırılırken referans noktası baz alınarak kaydırma yapılır. Yuvarlak geometriye sahip örnek robotun referans noktası merkezi seçilmiştir. Yapılandırma alanı iki bileşenden; engel alanı ve serbest alandan oluşur. Bu cümle matematiksel olarak yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$C_{Space} = C_{Free} + C_{Obstacles} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Yapılandırma alanı ( $C_{free}$ )

Şekil 4.1’de gösterilen serbest alan robot için olası hareket alanıdır. Robot noktasal cisim kabul edildiği takdirde, serbest alanda her  $(x,y)$  noktası, robotun hareket planlamaya dahil edilebilecek olası gidebileceği koordinatlardır.

Hareket planlamadan hemen önce yapılması gereken işlem, serbest yapılandırma alanının belirlenmesidir. Bu alan, robot ve engellerin geometrik yapısına ve robotun referans noktasına göre değişiklik arz etmektedir. Basit geometrik yapıya sahip engel ve robotların olduğu sistemlerde hesaplama zamanı daha kısa olmaktadır. İleride bölüm olarak ele alınacak yeni geliştirilen akıllı nesnelere algoritmasında, serbest yapılandırma alanını hesaplamadan doğrudan hareket planlamaya geçilebilecektir.

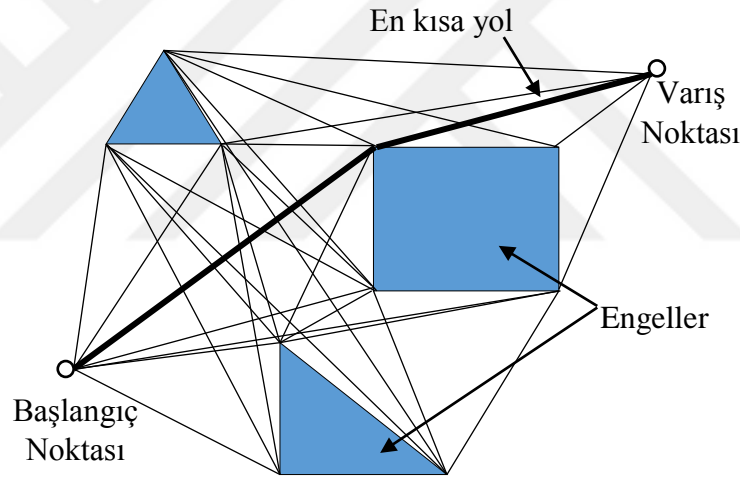
## 4.2. Hareket Planlama Teknikleri

### 4.2.1. Yol Haritası Metotları

Yol haritası metodu ilk hareket planlama çalışmalarını kapsamaktadır. Bu hareket planlama çeşitleri serbest alanda tek boyutlu eğrilerden oluşan bağlantı ağının yakalanması prensibine dayanır. Oluşturulan yol haritası (R), yol kümesi olarak kullanılır. Yol planlama, R kümesi içerisinde başlangıçtan hedefe doğru yolu birleştiren bir yapılandırma ve R içerisinde bir yol aramaktır. Bu yaklaşımın en önemli konusu yolların oluşturulmasıdır. Farklı temel ilkelere dayanan yaklaşımlar yol haritası metotlarında (görünürlük grafikleri, Voronoi diyagramları, serbest yol ağları, silüetler) yer almaktadır [49].

#### 4.2.1.1. Görünürlük Grafik Metodu

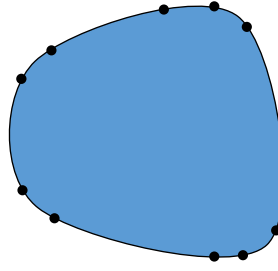
1979 yılında Tomas Lozano-Perez ve Michael A. Wesley çalışmalarında görünürlük diyagramı (visibility diagram) olarak isimlendirilen yöntemde, tüm engellere ait birbirini gören köşelerin, karşılıklı birleştirilmesi ile oluşan ağ yapı sayesinde, problem çizge kuramına(graph theory) dönüştürülerek en kısa yol aranır. İki boyutlu bir  $W=R^2$  çalışma alanında sabit yönelimli çokgen engellere çevrilebilen çokgen bir nesne(A) düşünelim. Böylece A'nın yapılandırma alanı  $C= R^2$  ve engel yapılandırma alanı CB(tüm engelleri temsilen),  $R^2$ 'nin çokgen bir alanı olmaktadır. Görünürlük grafik metodunun temel prensibi; CB' nin köşeleri arasında başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru birbirine bağlı çokgen yapıda yarı serbest bir yol inşa etmektir [49].



Şekil 4.2. Görünürlük grafik metodunda hareket planlama

Bağlı olmayan üç farklı engelin bulunduğu yapılandırma alanında görünürlük grafiği(G) elde edilerek başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru bir yollar aranır. Eğer bir yol bulunursa geri bildirim yapılır, bulunamaz ise hata ile gösterilir. Ağ engel köşelerinden birbirini görenler ile oluşturulmaktadır. Bu ağda en kısa yol aranır. Engellerin geometrik şekli algoritmanın hızını etkilemektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere engellerin tam kenarından geçen yollar, robot için yarı serbest yollardır.

Görünürlük grafik metodu, düz kısımlara veya dairesel yaylara sahip engellerin bulunduğu alanlarda genelleştirilmiş çokgenlere genişletilebilir.

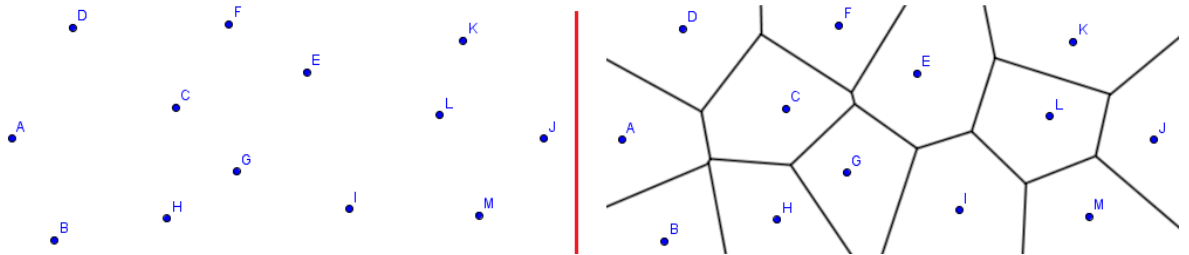


Şekil 4.3. Genelleştirilmiş çokgen yapı

Geometrik şekli yaylardan oluşan dışbükey bir engelin her alt yay parçasının başlangıcı ve bitişi belirlenerek genelleştirilmiş çokgen yapılar oluşturulur. Bu tip engeller algoritma için ek hesaplama işlemlerini gerektirir.

#### 4.2.1.2 Voronoi Diyagramı

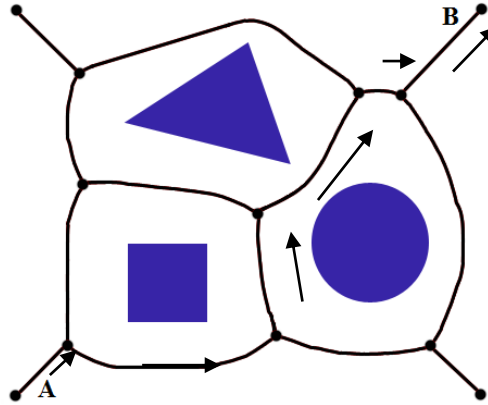
Voronoi diyagramı, ismini üzerinde bilimsel çalışmalar yapan Rus matematikçi Georgy Voronoi'den alır [56]. Temel prensibi, verilen nokta kümesindeki noktaların, birbirine olan uzaklıklarını göz önünde bulundurarak bu noktalar için bölgeler oluşturmasıdır. Başka bir deyişle bu noktaların oluşturduğu üçgenlerin, çevrel çember merkezlerinin bir araya getirilerek oluşturulduğu diyagramdır. Bu bölgelere Voronoi hücresi de denir. Voronoi diyagramları, bilimsel çalışmalarda farklı disiplinlerde birçok çalışmada kullanılmıştır. Voronoi hücrelerini çıkartmak için çeşitli algoritmalarda kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. Voronoi diyagram yapısı

1991 yılında F. Aurenhammer'in, Voronoi diyagram metodunu kullanarak, düzlemi en yakın komşu kuralına göre ayırmıştır [57]. Genelleştirilmiş Voronoi diyagramı ismi verilen yöntemle diyagram, iki komşu engele uzaklıkları eşit olan noktalar kümesinden oluşur. Şekil 4.5'te Genelleştirilmiş Voronoi Diyagramı(GVD) gösterilmiştir. Engellerin bulunduğu yapılandırma alanında, her bir noktanın kendisine

en yakın düzlem alanı ile ilişkili olduğundan hareketle, komşu engellerin ikisine eşit uzaklıkta bulunan noktaların birleşmesi ile olası yollar elde edilerek diyagram oluşturulur. Bu diyagram üzerinde en kısa yol aranır.



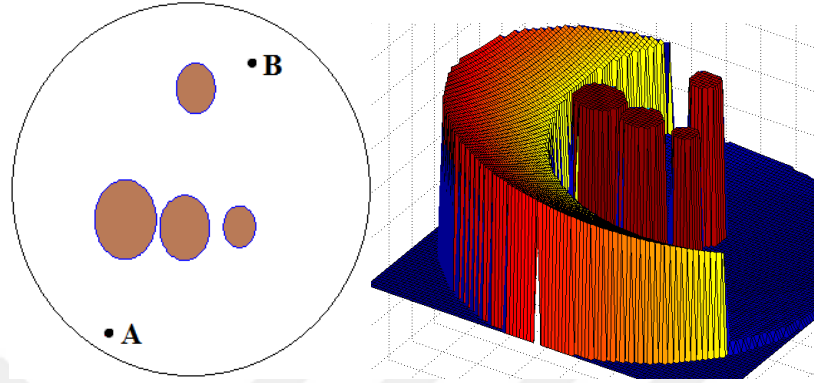
Şekil 4.5. Voronoi hücreleri ile engelden uzak hedef bulma

GVD, mesafe parametresi ile tanımlandığından, aralık sensörüne sahip bir robot adım adım GVD'yi bilinmeyen alanlarda inşa edebilir. Bir kez GVD inşa edildikten sonra robot, GVD ile serbest alanda yol planlama yaparak gerekli araştırmaları yapabilir [53].

#### 4.2.2. Potansiyel Alan Metotları

Potansiyel alan çalışmaları için literatürde farklı yaklaşımlar olmakla beraber burada temel ilkedden bahsedilecektir. 1983 yılında Andrews ve Hogan ve 1985 yılında Khatib [58], robotun çalıştığı ortamın hayali potansiyel alan(potential field) içerisinde olduğundan hareketle potansiyel alan metodunu geliştirmişlerdir. Robotun içerisinde bulunduğu potansiyel alanda hedef nokta çekici, engeller ise itici bir potansiyel alan oluşturmaktadır. Potansiyel alan içerisindeki robot hedefe doğru engellerden kaçınarak ortamda sanki bir meyil varmış gibi itme ve çekme kuvvetleri etkisinde ilerler. Potansiyel alan metodunun en büyük problemi yerel minimumlara sahip olmasıdır. Bu durumda robot hedefe varmadan, hedefe varmış sonucunu doğurmaktadır. Bu noktaya yerel minimum denmektedir. Bundan dolayı bu metot sıklıkla lokal metot olarak isimlendirilmektedir. Yerel minimum probleminin sebebi; oluşturulan potansiyel alandan gelen itici kuvvetin, robot engelin yakınında iken hedefin ürettiği çekici kuvvetten daha fazla olmasıdır, bu sebeple robot belirtilen hedefe ulaşamamaktadır. Bu

problemin üstesinden gelebilmemiz için, toplam potansiyel alan kuvvetinin, hedef noktasında bütünsel bir minimumunun bulunması sağlanmalıdır [59].

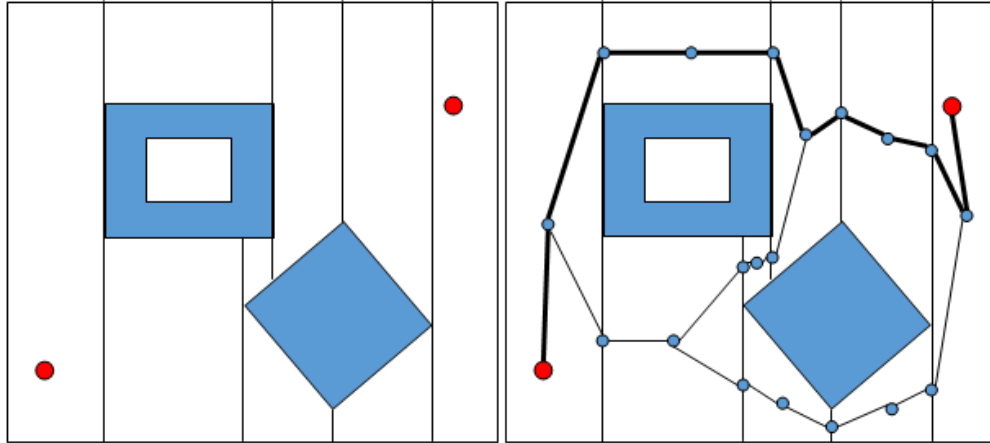


Şekil 4.6. Potansiyel alan gösterimi

Şekil 4.6'da görüleceği üzere sanki ortamda eğim varmış gibi hedef noktaya doğru sanal bir çekim noktası oluşturularak A ve B noktaları arasında engelden uzak bir yol belirlenmektedir.

#### 4.2.3. Tam Hücre Ayrıştırma Yöntemleri

Bu yöntemde yapılandırma alanındaki serbest alanlar hücre denilen ve birbirini örtmeyen bölgelere ayrılırlar. Sonra, hücreler arasındaki komşuluk ilişkisini temsil eden bağlantı grafiği oluşturulur ve hedefe bir yol aranır. Eğer başarılı olunursa hedefe varan hücreler dizisi hedefle başlangıç noktalarını birleştirir [49]. Engellere değen hücreler hedefe ulaşmıyorsa hücrelerin boyutları küçültülerek tekrar bölme işlemi yapılır [51]. En yaygın kullanılan hücre ayrıştırma yöntemi trapez hücre ayrıştırma yöntemidir [53]. Bu yüzden bu metot açıklanacaktır.

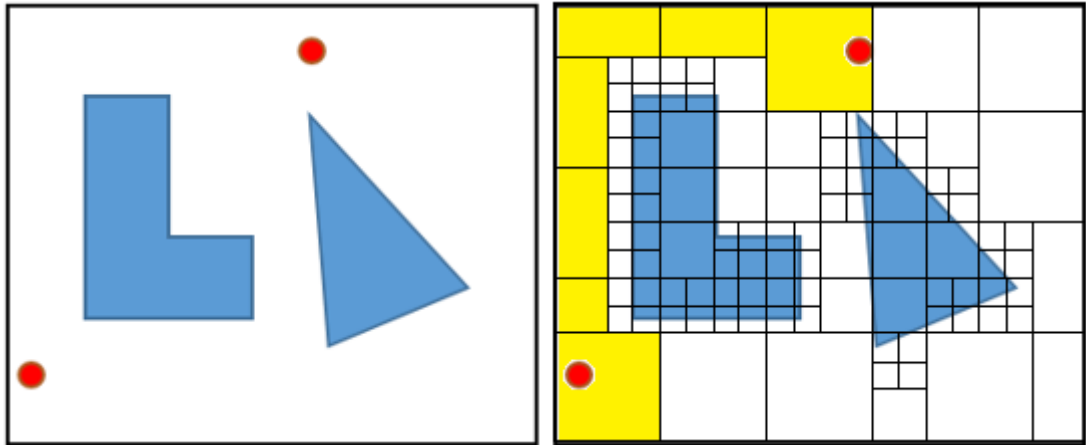


Şekil 4.7. Tam hücre ayrıştırma yöntemi yapısı

Engellerin bulunduğu yapılandırma alanında dikey çizgiler engele kadar değmiyorsa yapılandırma alanının sonuna kadar çizilir. Bir sonraki çizgi sıradaki engelin en yakın kenarı baz alınarak çizilir. Engele değen çizgi orada bırakılır. Çizgiler çizildikten sonra oluşan hücrelerin merkezleri ve çizgilerin orta noktaları birleştirilerek hedefe doğru bir yol aranır.

#### 4.2.4. Tahmini Hücre Ayrıştırma Yöntemi

B. Chazelle 1987 yılında geliştirdiği teknikle engellerinde bulunduğu çalışma ortamının serbest bölgelerine önceden tanımlı belirli boyutlarda şekiller yerleştirerek hücelere bölmüştür [60]. Bu hücreler arasından, engellere değmeyen hücreler üzerinden hedefe giden yolu aramıştır. Yerleştirilen hücreler serbest alanı tam olarak temsil etmesine izin vermezler [49]. Engellere değen hücreler hedefe ulaşmıyorsa hücrelerin boyutları küçültülerek tekrar bölme işlemi yapılır. Tahmini hücre ayrıştırma yönteminin, bir önceki konuda bahsedilen yöntemden farkı önceden tanımlı şekillerde hücrelerin serbest alana yerleştirilmesidir [49].



Şekil 4.8. Tahmini hücre ayrıştırma yöntemi

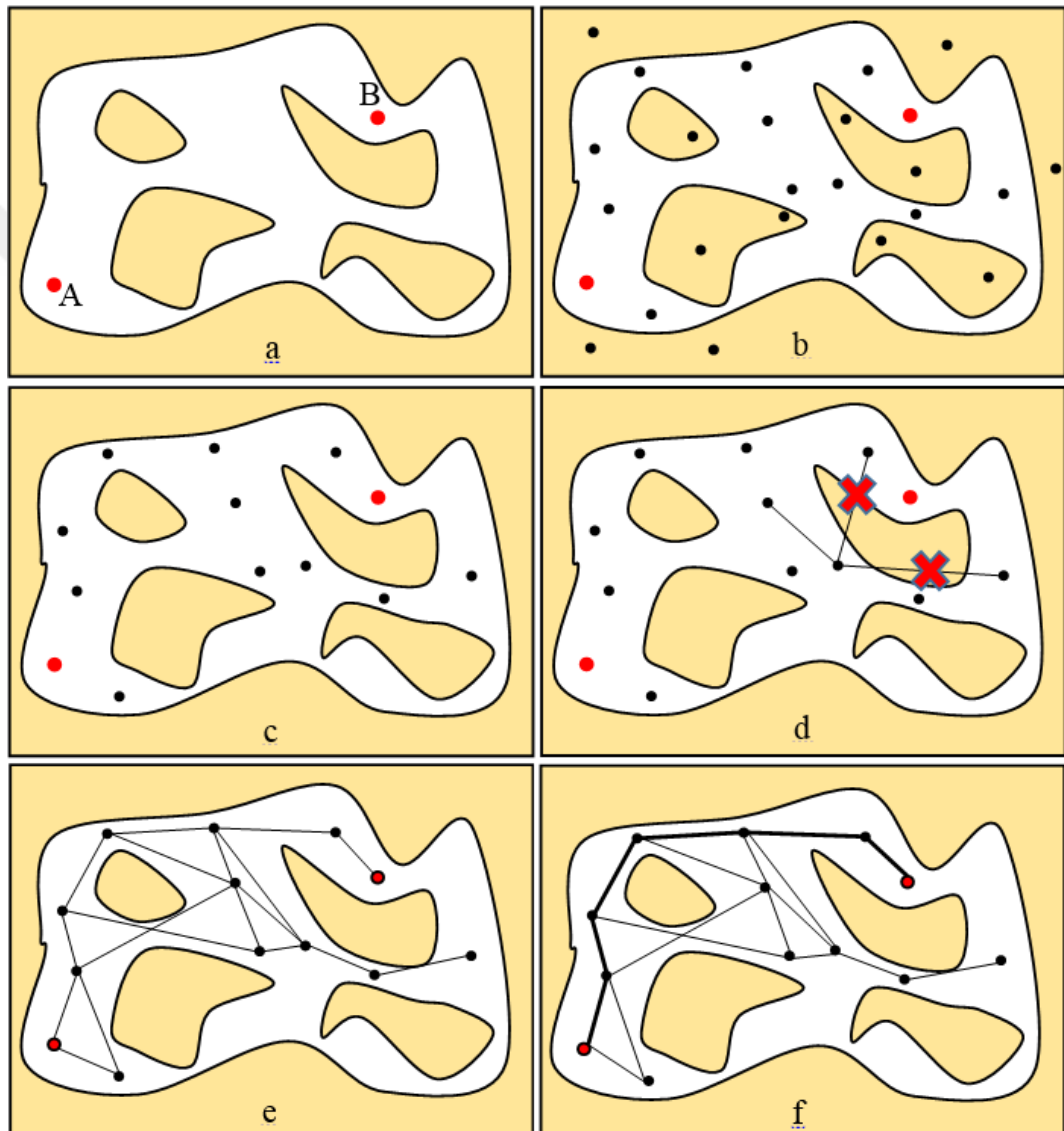
#### 4.2.5. Örneklemeye Tabanlı Algoritmalar

Yol haritası metotları ve örneklemeye tabanlı metotların her birisi tamamen serbest alan geometrisine dayanmaktadır. Bu yüzden yapılandırma alanı büyüdükçe bu gruptaki yol planlama metotları giderek elverişsiz olmaktadır. Örneklemeye tabanlı planlayıcılar, birçok yol planlama problem sonuçlarının karmaşıklığına karşın geliştirilmiştir [53]. Burada temel fikir, yapılandırma alanındaki engellerden sakınmak yerine, yapılandırma alanını örneklemeye şeması ile araştırmaktır. Bu araştırma işlemi, hareket planlama algoritmasının kara kutu olarak kabul ettiği bir çarpışma algılama modülüne sahiptir. Bu durum, özel geometrik modellere sahip bağımsız bir yol planlama algoritmasının geliştirilmesini sağlar. Çarpışma algılama modülü, modellerin yarı cebirsel kümeler, 3B üçgenler, dışbükey olmayan çok yüzlü vb. engeller olup olmadığı endişelerini çözümler. Bu tip problemleri, tamamen engel alanları temsil eden teknikleri kullanarak çözmek, uygulamayı imkânsızlaştırabilirdi [51].

##### 4.2.5.1. PRM(Probabilistic RoadMap = Olasılıklı Yol Haritası)

1994 yılında ise Kavraki ve arkadaşları [61] olasılık temelli yol(PRM) bulma çalışmasında yapılandırma alanından alınan rastgele bir nokta eğer serbest uzaya ait ise onu bir köşe noktası olarak kabul edip yakın köşeleri yerel planlayıcı yardımıyla bir hatla birleştirme yoluna gitmişlerdir. Yerel planlayıcı oluşan hatların engel üzerinde olup olmadığını kontrol eder. Geçerli birleştirmeler graph yapıya eklenirler. Burada planlama iki aşamaya ayrılır. Birincisi öğrenme aşaması olup bu aşamada, serbest

yapılandırmadan alınan rastgele örnekler elde edilir ve sonrasında yerel bir planlayıcı ile yakın köşe çiftlerinin bağlanması denir. Geçerli bir plan bulunursa grafiğe eklenir. Diğer faz ise sorgulama fazıdır. Bu fazda başlangıç noktasından hedef noktaya doğru grafikteki yerel bağlantılar bulunur. Yol haritası araştırılarak en kısa yol arama algoritmaları ile bir yol aranır.



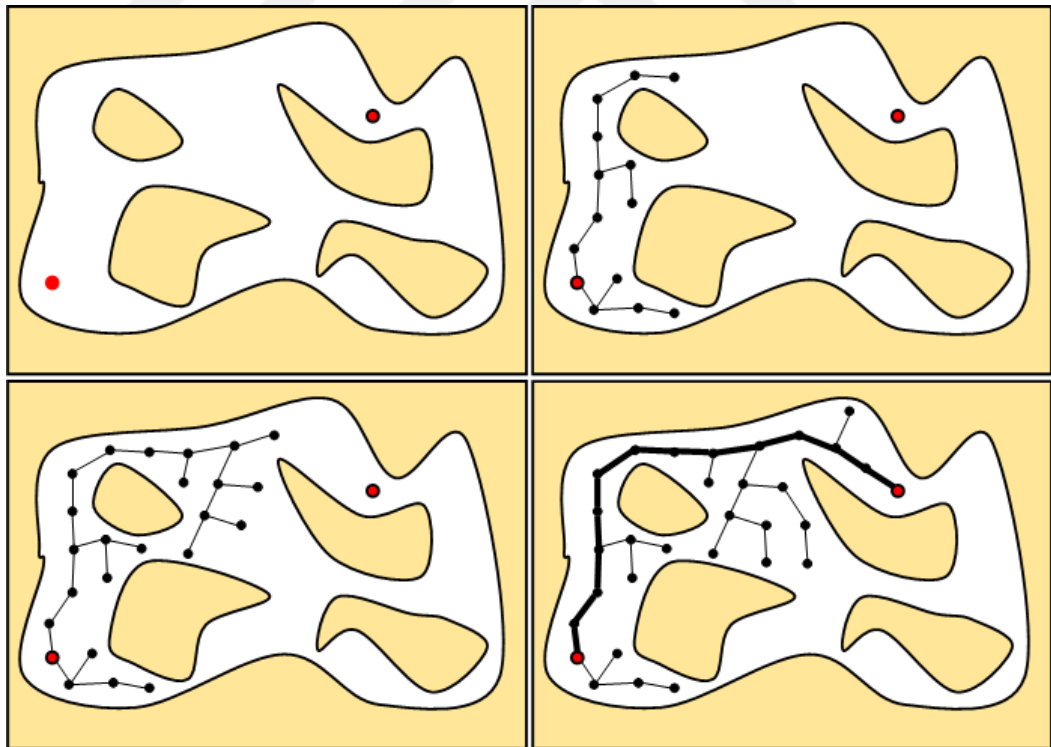
Şekil 4.9. Olasılıklı Yol Haritası metoduna ait hedef bulma adımları

Şekil 4.9'da görüleceği üzere A noktasından B noktasına engelden uzak bir yol belirlenmesi yapılacaktır. Yapılandırma alanına rastgele serpilmiş noktalardan(b) serbest alana denk gelen noktalar dışındaki noktalar silinir(c). Sonra bunlar arasında birbirini

gören nesnelere birbirine bağlanırlar(d,e).Serbest alanda elde edilen bu yolların arama algoritmasına(A\*, Dijkstra...) girdisi yapılarak, en kısa yol bulunur.

#### 4.2.5.2. RRT(Rapidly exploring Random Trees=Hızlı Rastgele Ağaç Tarama)

1998 yılında LaValle ve Kuffner [62] rastgele ağaç yapıda hızlı arama (RRT) çalışmalarında geliştirdikleri algorithmada, yapılandırma alanından alınan ilk örneği kademeli genişleterek komşu en yakın noktaları bulmak suretiyle uç uca bağlayarak ağaç yapı oluşturulur. Burada yeni noktalar rasgele biçimde bulunur. Alan bu şekilde belirlenen tekrar sayısı kadar bağlantı koluna sahip ağaç yapıdan oluşur. Burada asıl amaç değerini önceden belirlemeye gerek olmadan çözünürlük değerini aşamalı artırarak adım adım arama ağacı inşa etmektir. Başlangıç noktası ağacın kökü olup arama bu noktadan başlar. Sonrasında yapılandırma alanından rasgele bir nokta seçilir. Ağaçta en yakın düğüm bulunur ve eğer mümkünse yapı, bu noktaya doğru genişletilir.



Şekil 4.10. Hızlı Rastgele Ağaç Tarama metodu ile hedef bulma adımları

Şekil 4.10'da görüleceği üzere, ağaç yapı adım adım oluşturularak seçilen rasgele noktalarla genişletilir. Noktalar arası uzaklık(çözünürlük) parametre olarak değiştirilebilmektedir.

### **4.3. Hareket Planlama Tekniklerinin Genel Olarak Değerlendirilmesi**

Hareket planlama tekniklerine bakıldığında yapılandırma alanının belirlenmesi, serbest alan içerisinde olası hareket noktalarının belirlenmesi, bu noktalardan en kısa olanının belirlenmesi ve hareket planlamanın oluşturulması gibi işlemleri içermektedir. Bahsedildiği üzere yılanlar diğer ayaklı ve tekerlekli robotlar gibi, en kısa yolu her zaman en kısa zamanda alamamaktadır. Yılsans hareket biçiminin temeli olan S hareketinin büyük genlikli hareketine imkan veren geniş alanların serbest alanda bulunması ve işaretlenmesi yılsans robotların hızlı hareketi için gerekmektedir. Literatürdeki tekniklerin hiç birisi bu problemi çözmek için yeterli değildir. Yılsans robotun yapılandırma alanında hareket planlaması yapılırken mutlaka olabildiğince geniş alanları ortaya çıkarabilen yeni bir yaklaşım ihtiyacı ortadadır. Bu amaçla akıllı nesnelere algoritması diye adlandırdığımız yeni bir yaklaşım yılsans robotlar için hareket planlama problemine çözüm olarak geliştirilmiştir.

## 5. BÖLÜM

### AKILLI NESNELER ALGORİTMASI

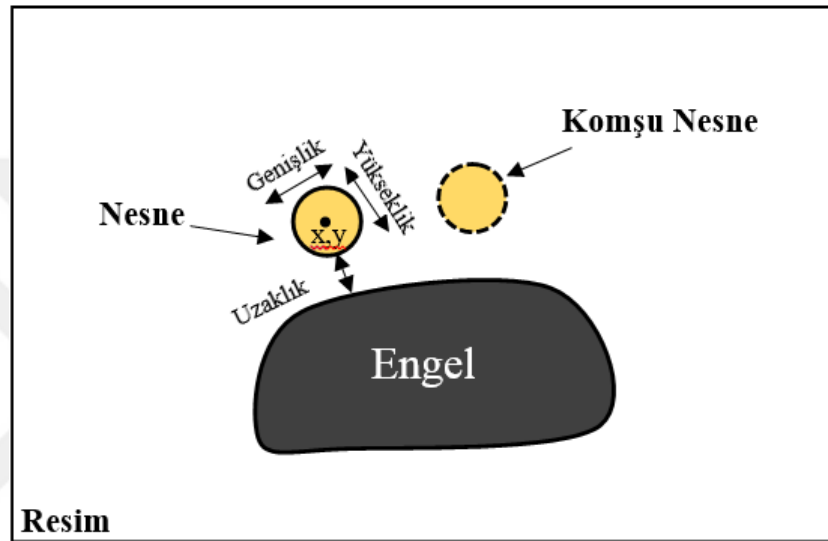
Bu algoritma engelden uzak bir yol belirleme problemine, Nesne Tabanlı Programlama(Object Oriented Programming=OOP) tekniğine dayalı bir çözüm yoludur. Geliştirilen yazılım Delphi programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritma, robot için yapılandırma alanını bulmaya gerek kalmadan, herhangi bir şekle sahip istenen sayıda engel ve istenen boyut ve şekillerde robotlar için engelden uzak bir yol belirlemektedir. Literatürdeki tekniklerle akıllı nesnelere algoritmasının, uygulama potansiyellerine bakıldığında akıllı nesnelere algoritmasının birçok üstün tarafı görünmekle beraber henüz karşılaştırmalı bir çalışma yapılmamıştır. Bu algoritmanın girdisi başlangıç, bitiş noktaları ve engellerin olduğu bitmap tabanlı resimdir. Algoritmanın çıktısı ise tüm robotlar için engelden uzak en kısa yol, en hızlı yol ve en güvenli yoldur [56]. Tüm robotlar için en hızlı yol ise robotun hareket biçimine göre algoritmaya uyarlanarak yapılabilir.

#### 5.1. Akıllı Nesne Yapısı

Engelden sakınma algoritmasında OOP temelli nesnelere kullanılmıştır. Bir nesne özelliklere, olay ve metotlara sahip program parçasıdır. Nesnelere kendi durumunu değişkenlerinde saklayan ve davranışlarını metotlarla gerçekleştiren yapıdır [63]. Genelde sınıfların örnekleri olan nesnelere, uygulama ve bilgisayar programları tasarlamak için birbiriyle etkileşim için kullanılır [64, 65].

### 5.1.1. Nesne Özellikleri

Nesnelerin özelliklerini belirleyen veri alanlarıdır. Alanlar ve özellikler nesneye ait bilgileri tutarlar. Alanlar doğrudan değiştirilip okunabildiğinden, değişkenler gibi düşünülebilir. Özellikler hangi değerlerin öğrenilip hangilerini değiştirileceğini kontrol etmeyi sağlayan değer okuma ve değer atama alt programlarına sahiptir [66].



Şekil 5.1. Akıllı nesnelere ait bileşenler

*Genişlik, Yükseklik:* Nesnelerin boyutları.

*Renk:* Nesnenin rengi.

*x,y:* Nesnelerin koordinatları.

*Resim:* Engellerin yer aldığı resim.

*Bas\_Son:* Başlangıç ve bitiş noktalarındaki ilk ve son nesnelere.

*Komsu:* Komşu nesne.

*Uzaklık:* Nesne ve engel arasında olması gereken yaklaşık mesafe.

*Sekil:* Nesnelerin sahip olacağı geometrik şekil.

*Parametre:* En hızlı ve en güvenli yolu bulmak için arama algoritmalarına girdi olarak kullanılan veri.

### 5.1.2. Nesne Olayları

Nesne tabanlı programlamada olaylar bir sınıf veya nesneyi, ilgili bir durum karşısında haberdar etmek için kullanılan alt programlardır [66]. Olaylar uygulamayı durumu değiştiğinde uyarın ve gereken işlemleri yaptıran yapılardır. Algoritmada kullanılan nesnelerin sahip oldukları olaylar aşağıda yer almıştır.

*OnCreate*: Standart Windows create olayının üzerine bindirilmiş ilk başlangıç konfigürasyonlarının yer aldığı alt program.

*OnContact*: Nesne bir engel üzerinde iken meydana gelir.

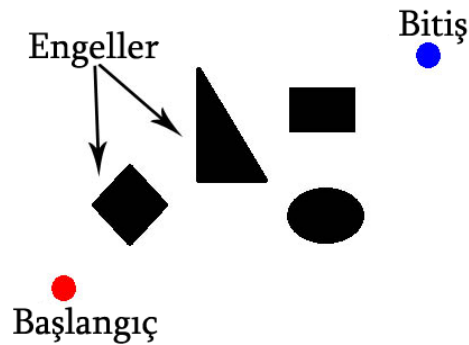
*OnMoving*: Nesne konum değiştirirken meydana gelir.

*OnPaint*: Standart Windows Paint olayı üzerine bindirilmiş nesnenin görsel durumu ile ilgili kodların yer aldığı olaydır.

### 5.2. Algoritma Adımları

1- Engellerin, başlangıç ve bitiş pozisyonlarının bulunduğu resim, engel ve başlangıç/bitiş noktalarının tanınacağı şekilde resim işleme tekniklerinden eşik değer metoduna göre 3 renge indirgenir. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere indirgenmiş resimde engeller, başlangıç ve bitiş noktaları farklı renk tonlarında kalır. Başlangıç ve bitiş noktalarının ağırlık merkezleri  $x$  ve  $y$  iki değere dönüştürmek için Denklem 7.11’e göre bulunarak tam olarak merkezleri saptanır.

Burada eşik değer uygulamasında eğer farklı sürtünme ve güvenlik risk katsayısına sahip düzgün homojen olmayan bir alan varsa bu farklılıklarda eşik değer yöntemiyle belirlenir. Çünkü her bir nesne altındaki alanın gerek sürtünme katsayısı veya güven katsayısı bilinmelidir. Bu sayede istenirse en hızlı, en güvenli veya en rahat yol gibi farklı varyasyonlarda arama isteklerine cevap verilebilecektir.

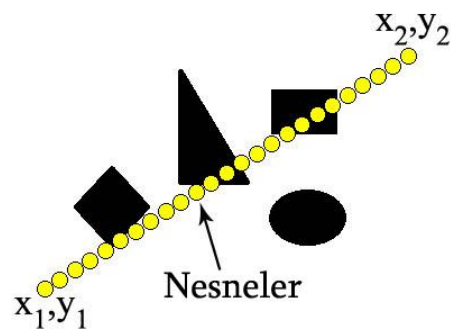


Şekil 5.2. Engeller ve başlangıç varış noktaları

2- Algoritmada kullanılacak nesnelerin şekli ve boyutları belirlenir. Bu parametreler harekete ve robotun boyutlarına göre belirlenir. Örneğimizde nesnenin geometrik şekli daire ve büyüklüğü ise 15x15 piksel olarak alınmıştır.

3- Nesnelerin engellerin bulunduğu ortama serpiştirilmesi rastgele değil, matematiksel olarak hesaplanabilen belirli bir sayı ve koordinatlara göre olacaktır. Bunun için, başlangıç noktasını, bitiş noktasına bileştiren hayali doğru Denklem 5.1'ye göre oluşturulur. İstenen sayıda başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru nesne bu hayali doğru üzerine yerleştirilir. Bu durum Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (5.1)$$



Şekil 5.3. Nesnelerin ortama yerleştirilmesi

Denklem 5.2, ise eğrinin bu doğrunun eğimini göstermektedir.

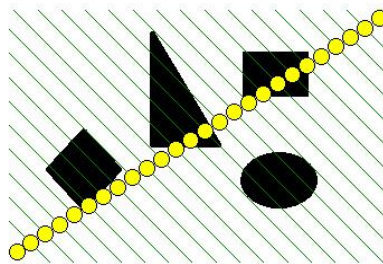
$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve 5.2'deki  $(x_1, y_1)$  noktaları başlangıç noktasını temsil ederken  $(x_2, y_2)$  noktaları ise bitiş noktalarını göstermektedir. Denklem 5.2 teki  $m$  ise doğrunun eğimini vermektedir. Buradaki  $m$  değeri diğer adımlarda nesnelerin yerleşim doğrultusunu belirleyecek denklemde kullanılacaktır.

4- Bu adımda nesnelere engellerin üzerinden hayali aşağı ve yukarı yönde kayarak hareket ederler. Her bir yönde engel geçildiğinde hemen yeni bir nesne oluşturulur. İlk oluşturulan nesnelere eğer engel üzerinde kalmışsa bu nesnelere silinerek yol hesaplamalarına dahil edilmezler. Nesnelerin hareket edeceği yön, Denklem 5.3'e göre hesaplanan  $m_n$  eğiminin, Denklem 5.4'te yerine konulması ile belirlenir. Bunun anlamı nesnelerin, başlangıç ve bitiş noktalarının oluşturduğu eğriye dik yönde hareket edeceğidir. Bu doğrultu Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

$$m \cdot m_n = -1 \quad (5.3)$$

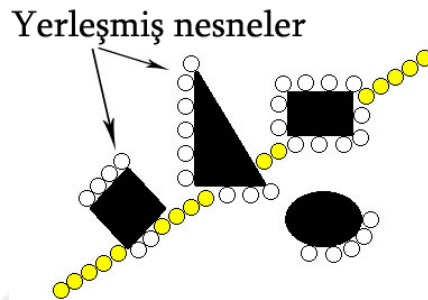
$$y - y_1 = m_n \cdot (x - x_1) \quad (5.4)$$



Şekil 5.4. Nesnelerin olası hareket yolları

Belirlenen doğrultuda kayan nesnelere engeli geçtiğinde engelden hemen sonra ilk uygun yere yerleşir. Fakat arama aynı doğrultuda resmin sınırlarına ulaşılan kadar devam ederek yeni bir engel olup olmadığı araştırılır.

Eğer engel bittiği halde nesne engelin bittiği yere sığmıyor veya diğer bir engele değiyorsa o alana nesne bırakılmaz ve aynı doğrultuda diğer engel aşılmaya çalışılır. Şekil 5.5'te yerleşimi bitmiş nesnelerin dağıtımını her iki yönde bittiğinde ortama bırakılan akıllı nesnelerin koordinatları ve özellikleri hafızada olacaktır. Daha sonra bu koordinatlar yol belirlemede kullanılacaktır.



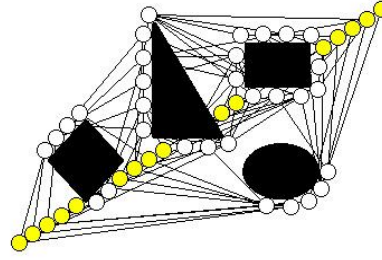
Şekil 5.5. Nesnelerin engeller üzerindeki hareketlerinin tamamlanması

Nesneler engellerin üzerinden kaydıktan sonra kayma doğrultusunda engele yakın fakat değmeksizin yerleşmektedir. Nesnenin engele yakınlığının maksimum değeri algoritmaya girdi olarak uygulanabilmektedir. Yuvarlak nesneler kullanıldığından bir nesne, altındaki engeli Denklem 5.5 yardımıyla algılamaktadır.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (5.5)$$

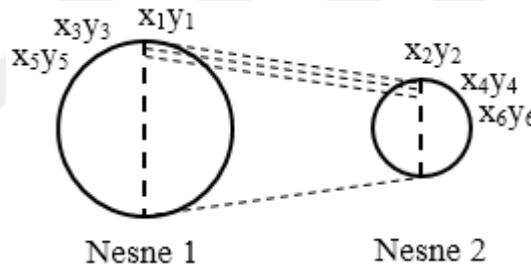
Yukarıdaki denklemde a ve b parametreleri çemberin merkez koordinatları, x ve y parametreleri ise çemberin merkezden r(yarıçap) uzaklıktaki çember sınırlarında bir noktayı ifade eder. Yarıçap değeri ( $0 < r < \text{nesne yarıçapı}$ ) aralığında tüm hayali iç içe çember koordinatlarında engele ait koordinat olup olmadığı araştırılarak eğer engele ait noktaya rastlanırsa nesnenin engelin üzerinde olduğuna karar verilir.

5- Ortama bırakılan nesneler arasında yol planlaması yapmak için birbirini gören nesnelerin belirlenmesi gerekmektedir. Birbirini gören nesneler, arama algoritmasına düğüm(node) olarak girilecektir.



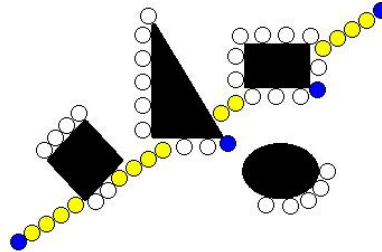
Şekil 5.6. Birbirini gören nesnelerin belirlenmesi

Nesnelerin en kısa yolu bulmada birbirinin devamı olması için gerek şart birbirini görmesidir. Her iki nesnenin birbirini görecek doğrultuda hayali çaplarından birbirlerine karşı olası minimum aralıkta hayali çizgi doğruları Denklem 5.1 yardımıyla bulunur. Bu doğruya ait noktaların engele ait olup olmadığı belirlenerek iki nesnenin boydan boya birbirini görüp görmediği belirlenebilir..



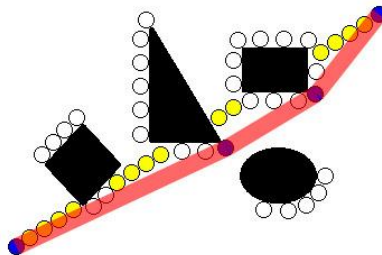
Şekil 5.7. Nesnelerin birbirini görmesi durumu belirlemede kullanılan hayali doğrular. Sonrasında birbirini gören nesneler, arama algoritmalarına girdi olarak uygulanır. Arama algoritmalarına mesafe verildiği takdirde en kısa mesafe bulunurken, hız verildiği takdirde en hızlı yol bulunmaktadır. Arama algoritmalarından(A\*,B\*, DFS, BFS...)Dijkstra algoritması kullanılarak en kısa yol bulunmuştur. Dijkstra Algoritması, graflar içinde birbirine bağlı düğümler arasında gidilebilen en kısa yolu bulmayı amaçlar. Dijkstra algoritması en kısa yolu belirlerken, Greedy yaklaşımını kullanır. Yani bir düğümden, diğer bir düğüme geçerken olası en iyi yerel çözümü göz önüne alır. Her seferinde, bir sonraki düğüme ilerleme Greedy yaklaşımına göre yapılır. Algoritmaya göre öncelikle kaynak bir düğüm belirlenir. Kaynak düğümden gidilebilen, diğer düğümler seçilir. Bu düğümlerden en kısa yola sahip olanlar işaretlenir, diğerleri aynı bilgiyle devam eder. Seçilmemiş düğümler için mesafe sonsuz olarak işaretlenir. İkinci adımda ise seçilen mesafesi en az olan düğümden gidilebilen düğümler arasında aynı işlem uygulanır. Algoritmada sonsuz işaretlenen düğümler bitinceye kadar devam

edilir. Bulunan yol için Şekil 5.8'de birbirini takip eden nesnelere koyu renkte gösterilmiştir.



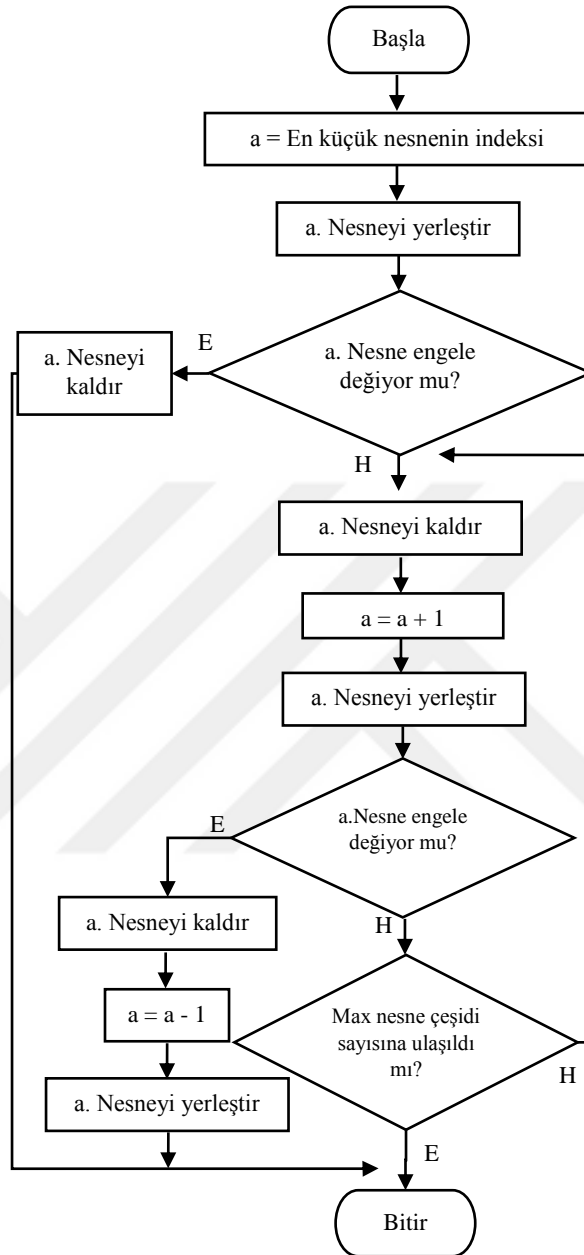
Şekil 5.8. Engelden uzak yol için nesnelere koyu renkte gösterilmiştir

6- Arama algoritmasının çıktısı olan en kısa yolun, ardışık nesnelere birleştirilerek kesintisiz yol elde edilir. Bu yol kısmi optimize edilmiş en kısa yoldur. Diğer birçok algorithmada olduğu gibi ayrıca yol düzleştirme işlemine gerek yok fakat yol iyileştirme yapılabilir.



Şekil 5.9. Engelden uzak yolun belirlenmesi

Yukarıda adımları verilen tez kapsamında geliştirilen algoritmanın iki farklı uygulaması vardır. Bunlardan birisi yukarıda anlatıldığı gibi tek nesne boyutuna sahip yol belirleme metodudur. Bu metotta, belirlenen yolun genişliği sabit olup nesnenin genişliği kadardır. Geniş yol aranılacaksa nesnenin boyutları büyük seçilir. Diğer metotta ise daha çok yılanlı robotlar için daha geniş alanları belirlemek zorunda kalındığında yol planlama çalışmalarında kullanılacaktır. Bu konu yılanlı robotlar için hareket planlama başlığı altında ayrıntılı verilecektir.

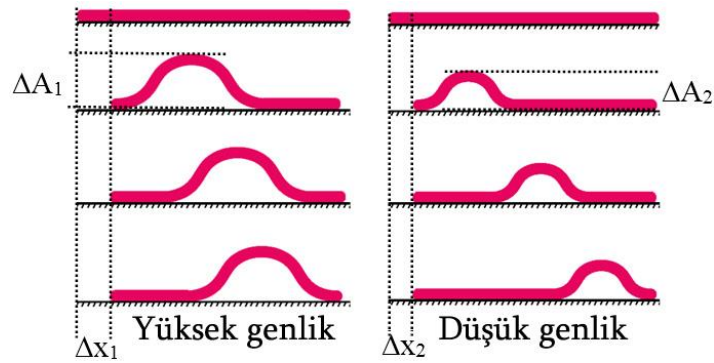


Şekil 5.10. Çoklu boyutlu Akıllı Nesnelere Algoritmasına ait akış diyagramı

### 5.3. Akıllı Nesnelere Algoritmasının Avantajları

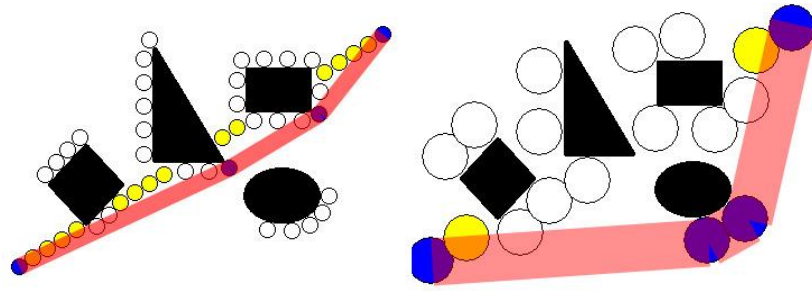
1- Yapılandırma alanının hesaplanması, robotu uzayda nokta boyutlarına indirgediğinden hareket planlamada planlamadan önce serbest alanların çıkartılması için bir basamak olmuştur. Akıllı nesnelere algoritmasında yapılandırma alanının hesaplanmasına gerek olmayıp doğrudan yol planlamaya geçilebilir.

- 2- Yol planlama yapıldıktan sonra yolun iyileştirilmesi ayrı ve bağımsız bir çalışma olarak değil nesnelerin konumunda iyileştirme yaparak doğrudan yapılabilir.
- 3- Akıllı nesnelere algoritmasında nesnelerin ortama dağıtılması rastgele olmadığından, algoritma daha sistematik ilerlemektedir.
- 4- Akıllı nesnelere algoritmasında engellerin şekli ve boyutu önemli değil ve bilinmesine de gerek yoktur.
- 5- Yol planlanırken alanda çeşitli kısıtlamalar tanımlanarak yolun istenen koordinatlardan geçmesi sağlanabilir. Örneğin planlanan yolun herhangi bir engelin yanından geçmesi engellenebilir veya geçmesi gerekiyorsa ona göre planlama yapılabilir.
- 6- Özellikle yılanlı robotların hareket planlamasında kullanılan geniş alanların çıkartılması bu algoritma ile kolay ve mümkündür. Çünkü yılanlı robotlar genliği büyük sinüzoidal S hareketlerinde daha hızlı hareket etmektedirler [6]. Büyük genlikte bir S hareketine, dar alanlardan ziyade geniş alanların imkan vereceği açıktır. Böylelikle yılanlı robotlar, geniş alanlarda daha hızlı hareket etmektedirler.



Şekil 5.11. Genliğin hıza etkisi

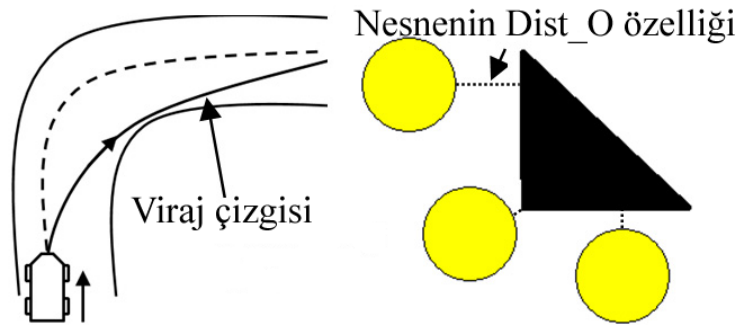
Şekil 5.11'e dikkat edilirse  $\Delta x_1 > \Delta x_2$  olduğu görülmektedir. Büyük boyutlu nesnelere belirlenen yolların imkan verdiği S genlik sınırları Şekil 5.12'de rahatlıkla görülmektedir.



Şekil 5.12. Yılsanı robot için en hızlı yol (sağda)

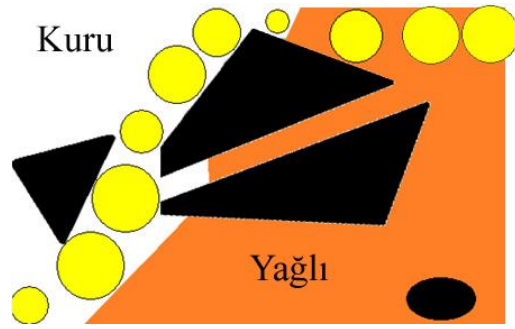
Şekilde en kısa yol soldaki olmakla beraber bu yol yılsanı robotlar için en hızlı yol değildir. Sağdaki yol ise daha uzun fakat yılsanı robot, bu yolda daha hızlı hareket edecektir.

7- Tekerlekli, yürüyen veya uçan robotlar yön değiştirirken keskin kenarlardan değil de keskin olmayan yumuşak kenarlardan daha hızlı ve güvenli dönmektedirler. Bu dönme çizgisine viraj çizgisi denmektedir. Hatta daha hızlı ve güvenli yol için viraja geniş girip dardan almak ya da tersi bir hareket planlama yapılması gerekir. Geliştirilen algoritmada nesnelerin Dist\_O özelliğini kullanarak, nesnelere ne kadar uzaktan yolun geçmesi gerektiği bulunabilir.



Şekil 5.13. Araçların viraj eğrisinin nesnelere göre belirlenmesi

8- Eğer bir ortamda yüzey farklı sürtünme katsayılarına sahipse o alanda hızın düzgün ve sabit olması beklenemez. Kaygan yüzeyler hızı düşürürken kuru yüzeyler böyle bir etki göstermezler. Hareket planlamada istenirse kuru yüzeyler tercih edilerek güvenli ve hızlı hareket için bir ortam belirlenmiş olur.



Şekil 5.14. Farklı sürtünme ortamlarında en güvenli yolun bulunması

9- Algoritmanın çoklu nesne boyutu ile yol planlama yapması ile bahsedildiği üzere özellikle yılanlı robotlar için daha geniş alanlar bulunarak optimum yol planlaması yapılmış olur. Şekil 5.18’de bu durum gösterilmiştir.

10- Trafik sıkışıklığı, sınırlı yollar ve artan trafik yükünün neden olduğu günlük bir olgudur [67]. Akıllı nesnelere gerçek zamanlı resimler kullanılarak trafikteki yoğunluğu hesaplayacak uygulamalarda kullanılabilir.

#### 5.4. Yılanlı Robotlar İçin Hareket Planlama

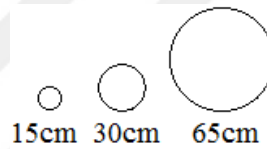
Başlangıç noktasını bitiş noktasına birleştiren en kısa/hızlı mesafeyi Yıldırım Ş. ve Yaşar E. geliştirdikleri akıllı nesnelere algoritması ile bulmuşlardır [68, 69, 70]. Bu yol, sabit genişliğe sahip herhangi bir robot için en kısa mesafedir. Bu algoritmada, sabit tek bir büyüklükte nesnelere kullandığından belirlenen yol yılanlı robot için en hızlı yol değildir. Çünkü sabit bir büyüklükte ve büyüklüğü en küçük yılanın boyutu kadar seçilebilen bir yol belirlemede yılanlı robot için hareket alanı dar kalabilmektedir. Yılanlar dar alanlarda daha yavaş hareket etmektedirler. Yapılan çalışmada önceden belirlenen çeşitli büyüklüğe sahip nesnelere engelli ortam üzerine yerleştirilerek, olabildiğince daha geniş alanlar bulunmaya çalışılmıştır [56]. Daha geniş alanlar yılanlı robotun sinüzoidal yapıda S hareketleri için daha hızlı hareket alanları olarak kullanılacaktır.

##### 5.4.1. Hareket Planlama Adımları

Akıllı nesnelere algoritması kısmında bahsedilen ana temaya ek olarak, algoritmada yapılan düzenlemeler aşağıda verilmiştir.

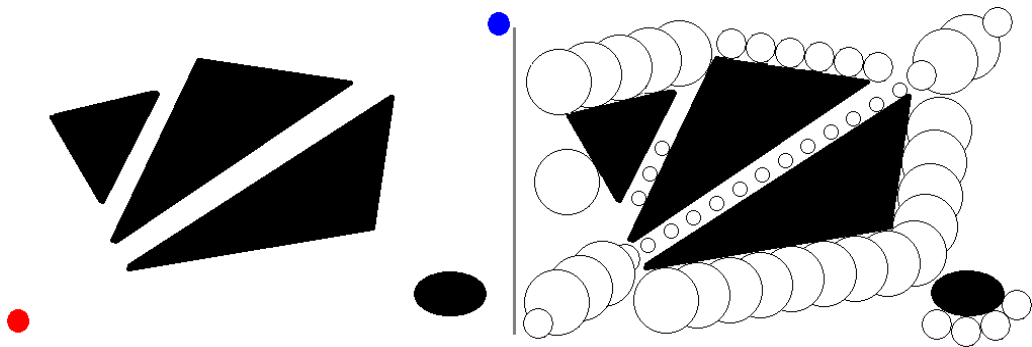
1- Uygulamada nesnelerin şekli yuvarlak olarak belirlendi. Yuvarlak nesnelere keskin kenarlara sahip olmadığından sinüzoidal yapıda S hareketi için çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

2- Engellerin bulunduğu ortama göre farklı büyüklükte önceden istenilen kadar farklı çapta nesnelere tanımlanır. Bunlar küçük çap birden başlayarak sıra ile numaralandırılır. Birbirine yakın ölçülerde gereksiz fazladan nesne boyutu tanımlamak algoritmanın hızını negatif yönde etkilediğinden bu konuda dikkatli davranılmıştır. Uygulamada üç farklı boyutta(çap) nesne belirlendi. Bu nesnelere Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Bu nesnelerin büyüklüğü yılanlı robotun hareketi esnasında üreteceği S sinüzoidal hareket biçiminin genliğini belirlemektedir.



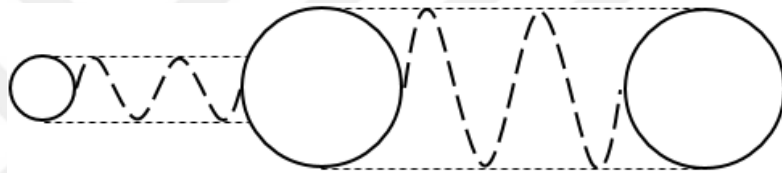
Şekil 5.15. Çoklu boyut uygulamasında seçilen akıllı nesnelere ve boyutları

3- Belirlenen nesnelere engeller arasında yerleştirilmiştir. Bulunan boşluklara olabildiğince büyük nesnelere yerleştirilmiştir. Şekil 5.10'da akış diyagramı ile ifade edilen algoritmaya göre o alana sığabilecek maksimum büyüklükteki nesnelere engelli ortama engellere değmeden Şekil 5.16'da görüldüğü üzere yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında, en küçük nesneden başlanılmış olup, eğer en küçük nesne engelden sonra yerleşebiliyorsa, bu alana diğer nesnelere(daha büyük olanların) sığıp sığmadığı kontrol edilmektedir. Eğer herhangi bir nesne sığmıyorsa son sığan nesne o alana yerleştirilir.



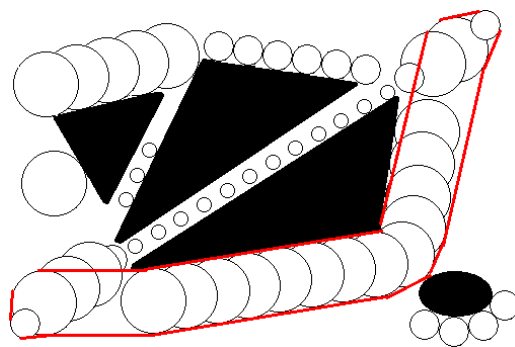
Şekil 5.16. Farklı boyutlarda akıllı nesnelere ortamına yerleştirilmesi

4- Yerleştirilen nesnelere arasında boydan boya birbirini görenler belirlenirler. Birbirini görenler arasındaki mesafe bulunur. Mesafeden sonra iki nesnenin boyutu küçük olanın genliğinde hareket edeceği için küçük genlikte yılanlı robotun hızı bulunur. Mesafe de bilindiği için o mesafeyi alma süresi hesaplanır. Arama algoritmasına süreler girilerek minimum süre bulunur. Yapılan uygulamada, Dijkstra en kısa yol arama algoritması kullanılarak yılanlı robot için en kısa süre ile alınacak yol bulunmuştur. En kısa yol için Dijkstra algoritmasına iki nesne arasındaki mesafeler girilir. En güvenli yol için ise yine Dijkstra algoritmasına iki nesne arasındaki yola uygun güven risk katsayısı belirlenerek girilir. Sonuçta Dijkstra algoritması kendisine girdi olarak uygulanan düğüm değerlerine bakarak başlangıçtan bitişe doğru en küçük değerlere sahip yolu bulmaktadır.



Şekil 5.17. Nesnelerin boyutlarının S hareket genliğine olan etkisi

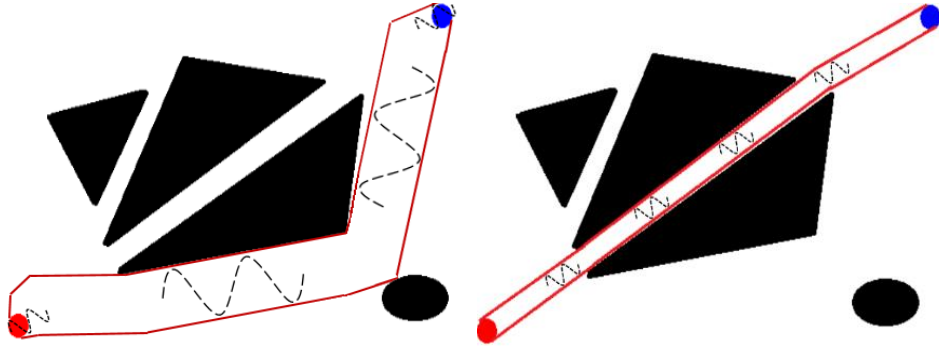
5- Dijkstra en kısa yol bulma algoritmasının belirlediği yol düz çizgi ile birleştirilerek Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Bu yolu yılanlı robot olası diğer yollardan daha kısa sürede kat edecektir. Başlangıç ve bitiş noktasındaki nesnelerin aynı boyutta daha küçük yapıda olmaları o iki nesnenin hesaplamalarda dahil edilmediğinden kaynaklanmaktadır. Algoritma istenen nesnelere hesaba katılmamasına imkan vermektedir.



Şekil 5.18. Yılanlı robot için en hızlı yol

6- Belirlenen yolda yılanlı robota ait S hareketinin genliği değişken olup ilk başta orta nesne boyutunda sonrasında büyük nesne boyutu ve bitişte tekrar orta nesne boyutunda bir hareket ortaya çıkmıştır. Akıllı nesnelere algoritmasının aynı engelli ortam için tekli

ve çoklu büyüklüğe ait çözümlemede ortaya çıkan S hareketi genliği aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.19. En kısa ve en hızlı yoldaki olası maksimum genlik genişlikleri

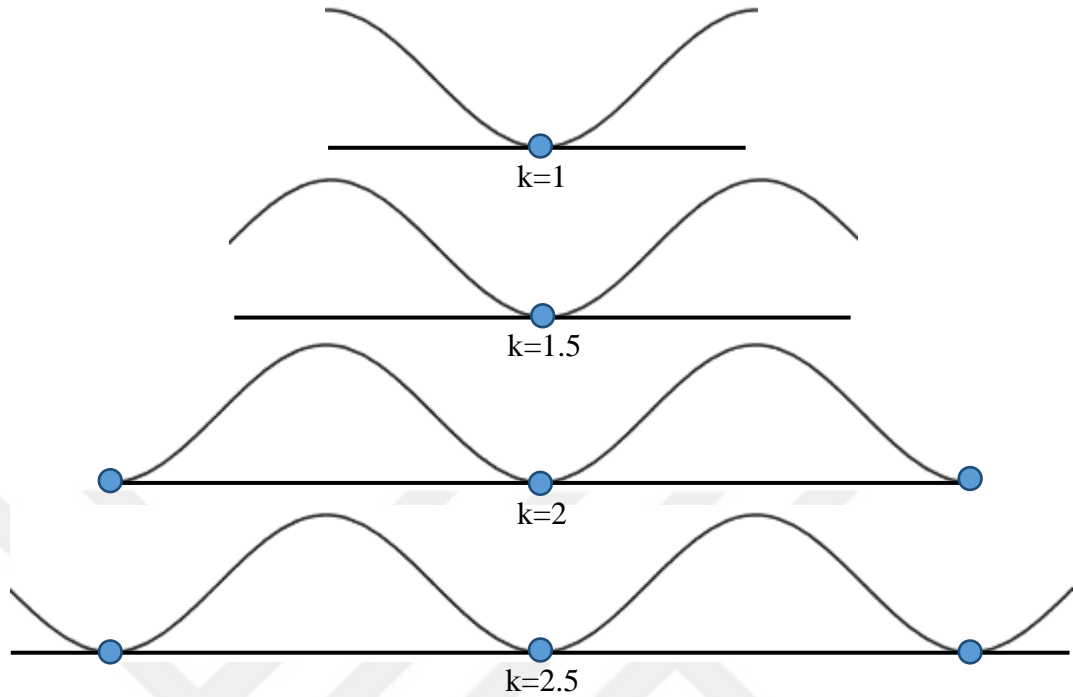
## 6. BÖLÜM

### YILANSI ROBOT PARAMETRELERİ VE EKLEM SAYILARININ BELİRLENMESİ

Eklem sayıları yılanlı robot için hayati öneme sahiptir. Hareket kabiliyetinden enerji tüketimine kadar birçok parametre doğrudan eklem sayısına bağlıdır. Yılanlı bir robotun hareket kabiliyeti arttıkça bu durum robotun enerji tüketimini de artırmaktadır. Yılanlı robotlarda eklem sayılarının belirlenmesi için göz önüne alınabilecek kriterler bu bölümde ele alınacaktır.

#### 6.1. Yılanlı Robotların Kararlılığı

Yılanlı robotların devrilmeden kararlı bir şekilde hareket etmeleri verilen görevi yapmaları açısından önemlidir. Yılanların kararlılığı özellikle doğrusal hareket biçimi başta olmak üzere diğer iki eksendeki (yunuslama, sapma) tüm tiplerinde de önemlidir. Bu durumda yılanın yunuslama eksenine sahip uzuvlarından en az iki eklemi herhangi bir anda üzerinde bulunan ortama değmesi gerekmektedir.

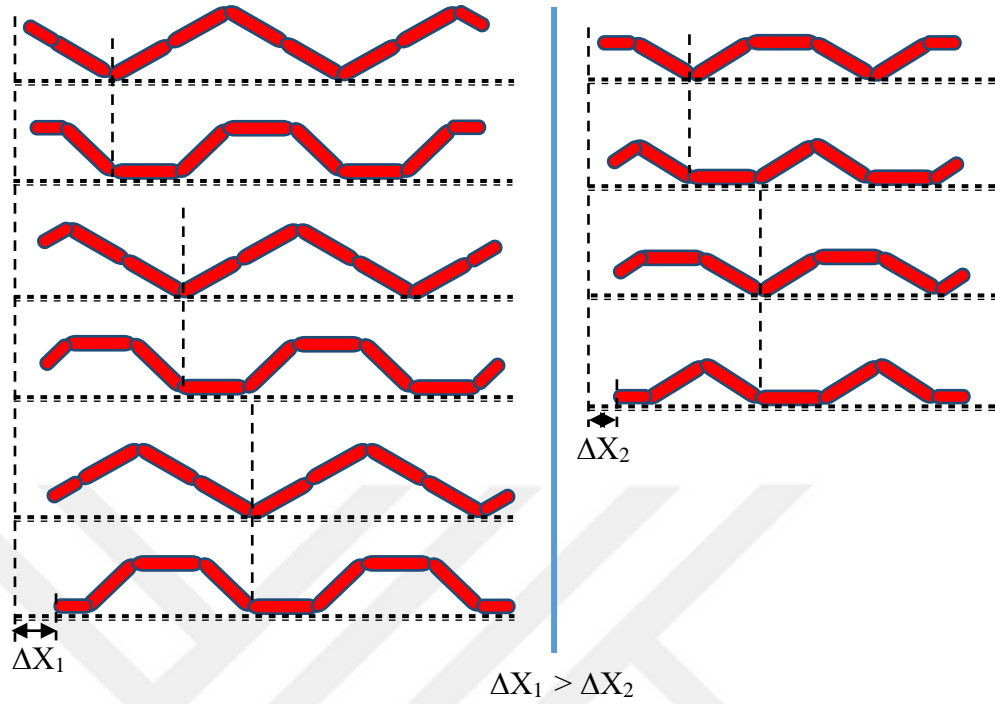


Şekil 6.1. Yılsız robot için S sayısı ve kararlılık durumunun gösterilmesi

Şekildeki  $k$  parametresi, üretilen toplam  $S$  kıvrım sayısını göstermektedir. Yılan tasarımında ve hareket adımları belirleme sürecinde bu durumun göz önüne alınması gerekmektedir.  $k > 2$  değeri için ise yılsız robotun olası genlik değeri düşeceğinden, bu durumun hıza katkısı negatif yönde olacaktır.

## 6.2. Hız – Eklem İlişkisi

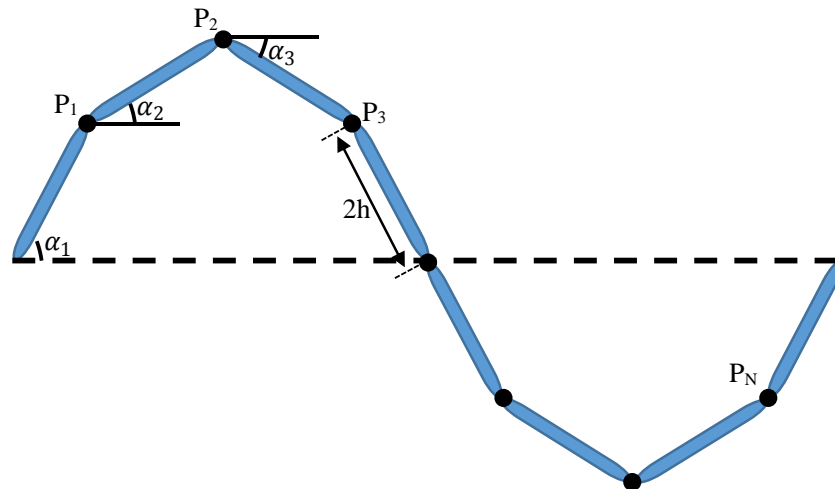
Eklem sayısı arttıkça robot bu eklemleri hareket denkleminde dahil edecektir. Robot ne kadar eklemden oluşuyorsa tüm hareket çeşitleri için Denklemler 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5'e göre her bir eklem hıza katkısı olacaktır. Dolayısı ile kararlılık sağlandıktan sonra ( $k=2$ ),  $S$  dalga biçimleri ne kadar geniş bir dalga uzunluğuna sahipse birim zamanda atılan adımda o kadar büyük olacaktır. Eklem sayısının sonsuza gitmesi halinde, yılsız robotun zor koşullarda (dar ve küçük alanlar) hareket ettiği düşünülürse, bu durum istenen harekete direnç oluşturacak ve enerji tüketimi gereksiz olarak artacaktır. Aşağıda soldaki yılsız robot her bir  $S$  hareketine 4 eklem sunarken diğeri 3 eklem sunmaktadır. Görüldüğü üzere kararlılık sağlandıktan sonra, eklem sayısı fazla olan robotun aynı zaman diliminde aldığı yol, dalga adımı daha büyük olduğundan daha fazladır. Bu durum aşağıda görülmektedir.



Şekil 6.2. Hız eklem ilişkisi

### 6.3. Genlik - Hız İlişkisi

Yılsarı robotlar geniş alanlarda daha hızlı hareket etmektedirler. Diğer bir deyişle genlikleri arttıkça hızları da - frekans sabit kalmak koşulu ile - artmaktadır. Harekete ait dalgalanma açısı arttıkça genliğide artmaktadır.



Şekil 6.3. Genlik - hız ilişkisi

Herbir P noktasındaki dalgalanma açılarına( $\alpha_i$ ) ait kosinüs değerleri alınamayan yolları vermektedir. Bu değerlerin eklem uzunluğu ile farkı bir eklem aldıkları yolu vermektedir. robotun hareket eksenindeki Akıllı nesnelere algoritmasının aradığı geniş alanlarda robotun hızını belirlemek için aşağıdaki denklemler[71] kullanılmaktadır. Bir periyot süresinde alınan yol Denklem 6.1 yardımıyla bulunmaktadır.

$$\Delta_x = 2h(N - \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i) \quad (6.1)$$

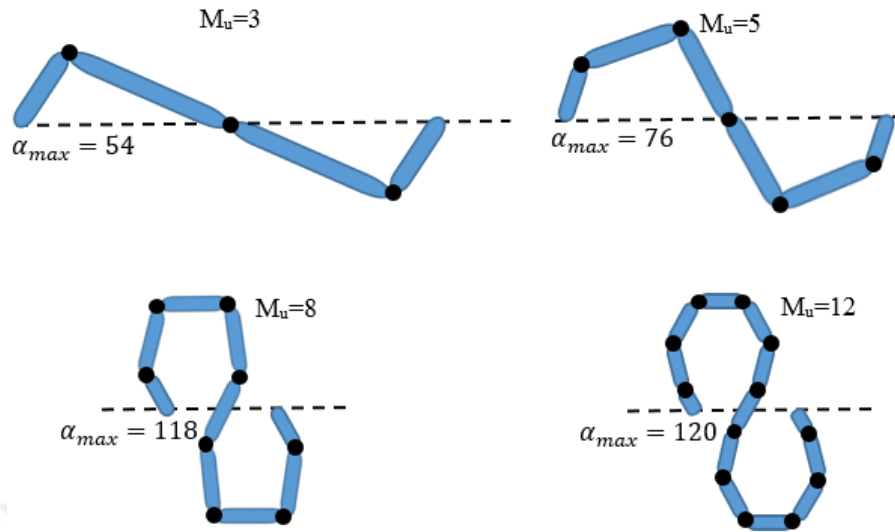
Denklem 6.1’de N eklemlilik ve her eklem uzunluğu 2h olan bir yılan robotunun bir S hareketi sonrasında aldığı yol( $\Delta_x$ ) bulunmaktadır.  $\alpha_i$  açısı i. eklem yatayla yaptığı açı değeridir.

$$V = 2h(N - \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i)/T \quad (6.2)$$

Denklem 6.2’de ise yine N eklemlilik ve her eklem uzunluğu 2h olan bir yılan robotunun bir S hareketi sırasındaki ortalama hızı hesaplanmaktadır. T periyot süresi azaldıkça birim zamanda alınan yol miktarı ve hız artacaktır. Denklem 6.2 periyot yerine çarpan olarak frekans( $T \cdot f = 1$ ) değeri yazıldığında ise birim zamanda alınan yol, frekans arttıkça artacaktır.

#### 6.4. Şekil Almada Boyut Kısıtlaması

Yılan robotunun kesiksiz S hareketi yapması için sonsuz eklemden oluşması gerekmektedir. Pratikte bu durum mümkün değildir. Yılan robotunun basit bir S hareketini yapabilmesi için en az üç eklemden oluşması gerekmektedir. Bu eklem sayısı çok kısıtlı kavis açısı ve sınırlı sayıda hareket kabiliyetine imkân verir. Aşağıda şekillerden de görüleceği üzere eklem sayılarının hareket kabiliyetine olan etkileri açıkça gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Eklem sayısı – boyut kısıtlaması ilişkisi

$M_u$  parametresi her bir S dalga başına düşen eklem sayısını göstermektedir. Üç eklemden oluşan bir robotun kavis açısı maksimum 54 derece olmaktadır. Eklem sayısı arttıkça kavis açılarının arttığı gözlenmiştir. Bir robotun eklemleri üst üste binmeden olabilecek maksimum kavis açısı 120 derece olup bu açı da  $M_u = 12$  olduğunda sağlanmaktadır[6]. 120 dereceden büyük kavis açıları yılanı robotun eklemlerinin üst üste binmesine neden olmaktadır.

## 6.5. Yılanı Robot Eklem Sayısı

Yılanı robotun eklem sayısı belirlenirken robotun kararlı, hızlı, yüksek hareket kabiliyetine sahip ve minimum enerji tüketimine sahip olması gerekmektedir. Yukarıda boyut kısıtlaması bölümünün de  $M_u$  dalga başı eklem sayısını göstermek üzere kavis açılarının( $\alpha_{Max}$ ) alabileceği maksimum değerler gösterilmiştir. Eklem sayısı arttıkça maksimum değer olan 120 derece açısı yakalanmaktadır. Bu durumda S başına 12 eklemden 120 derece ancak yakalanmaktadır.

$$M_u = 8 \text{ için } \alpha_{Max} = 118^\circ$$

$$M_u = 12 \text{ için } \alpha_{Max} = 120^\circ$$

$$\text{Aradaki fark } 120^\circ - 118^\circ = 2^\circ$$

Bir S hareketindeki eklem sayısı 8 olan ile 12 olan yılanlı robotun  $\alpha_{Max}$  farkı  $2^\circ$  olduğundan bu küçük fark kabul edildiği takdirde tasarımda  $4 + 4 = 8$  eksik eklem ile enerji tüketimi daha iyi olan ve eklem sayısı azlığından dolayı yapısı daha basit olan bir seçim olacaktır. Kararlılık açısından bakıldığında ise robotun kararlı hareket edebilmesi için en az 2 S hareketine sahip olması gerekmektedir. Bununla beraber olabildiğince büyük adım atabilmesi ve S hareketini olabildiğince kısıtlamasız yapabilmesi için S başına düşen eklem sayısı 12, ve bu iki şartı sağlayan minimum enerji tüketimine sahip olması için  $2^\circ$  kısıtlama kabul edildiğinde optimum eklem sayısı S başına 8 seçilebilir. Bu durumda olması gereken toplam robot eklem sayısı  $M = M_u \times k = 8 \times 2 = 16$  olacaktır. 16 eklemlili yılanlı robot tek bir eksene yunuslama ya da sapma eksenlerine sahip olabilir. Eğer robotun her iki eksendeki hareketleri de yapması isteniyorsa o zaman her bir eksen hareketi için 16 eklem gerektiğinden toplam gerekli eklem sayısı  $16 \times 2 = 32$  olması gerekmektedir.

## 7. BÖLÜM

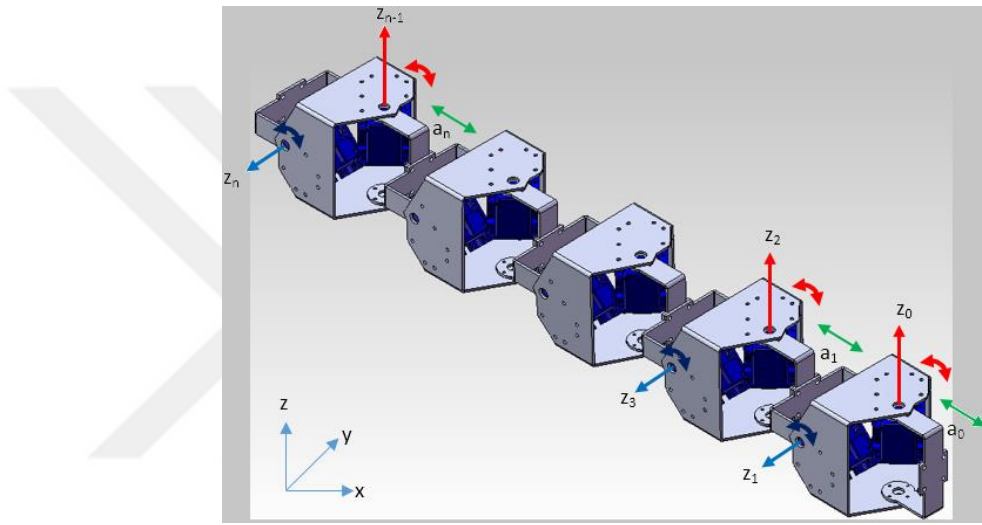
### YILANSI ROBOT

Yılansı robot tam bir mekatronik sistem olup mekanik, elektrik, elektronik ve yazılımdan oluşmaktadır. Mekanik kısmını, kasa yapısı ve redüktör oluştururken, elektrik kısmını ise servo motor içerisindeki 12V gerilime sahip DC motor oluşturmaktadır. Elektronik motor kontrol birimi ise servo motor yapıya dahil olup yazılıma göre çalışmaktadır. Bir diğer mekanik yapı ise servo motor üzerinde dişli redüktör yapı olarak yer almaktadır. Şimdi robota ait tüm bileşenleri sıra ile inceleyelim.

#### 7.1. Robot Kasası

Yılansı robot çalışmalarında kasa tasarımı birkaç denemeden sonra kararlaştırılarak son hali verilmiştir. Yılansı robot kasası tasarlanırken hafif malzemeler (alüminyum, pleksi akrilik levha) kullanılarak, küçük yapılı olması amaçlanmıştır. Bu sayede robot daha hafif ve dar aralıklardan geçebilecek büyüklükte olmuş olacaktır. Ayrıca eklem kolu küçük olacağından, daha az torka ve dolayısı ile enerjiye ihtiyaç olacaktır. Robot tasarımında bunlarla birlikte robotun yılan hareketlerinin literatürde geçen tüm çeşitlerini yapacak şekilde olması da amaçlanmıştır. Buna ek olarak gerçek yılanların kullanmadığı fakat çalışmalarda yer alan (flapping, yuvarlanma... gibi) hareketlerde göz önüne alınmıştır. Yılansı robotun birçok yılansı hareketi yapabileceği en uygun geometrinin kare kesitli olduğu saptanmıştır.

İlk tasarımda malzeme olarak alüminyum kasa tercih edilmiş fakat sac levha bükümlerinde sıkıntı yaşandığı için bu kasa eksen kaçıklıklarına sahip ve 2mm sac kalınlığı ile ağır olmuştur. Testlerde motorlar sık sık aşırı yük ve ısınma hataları ile istenen görevleri icrada zorlandıklarını geri bildirimle programa iletmişlerdir. Eksen kaçıklığı dolayısı ile daha ince alüminyum sac levha kullanılması yoluna gidilmemiştir. Ayrıca ince alüminyum sac levhalar robot hareketi sırasında daha esnek davranarak farklı konumlanmalara sebebiyet vereceği anlaşılmıştır.



Şekil 7.1. Testlerde kullanılan ilk robot kasası çizimi.



Şekil 7.2. İlk tasarlanan robot kasası montajlı hali ve deneme çalışması

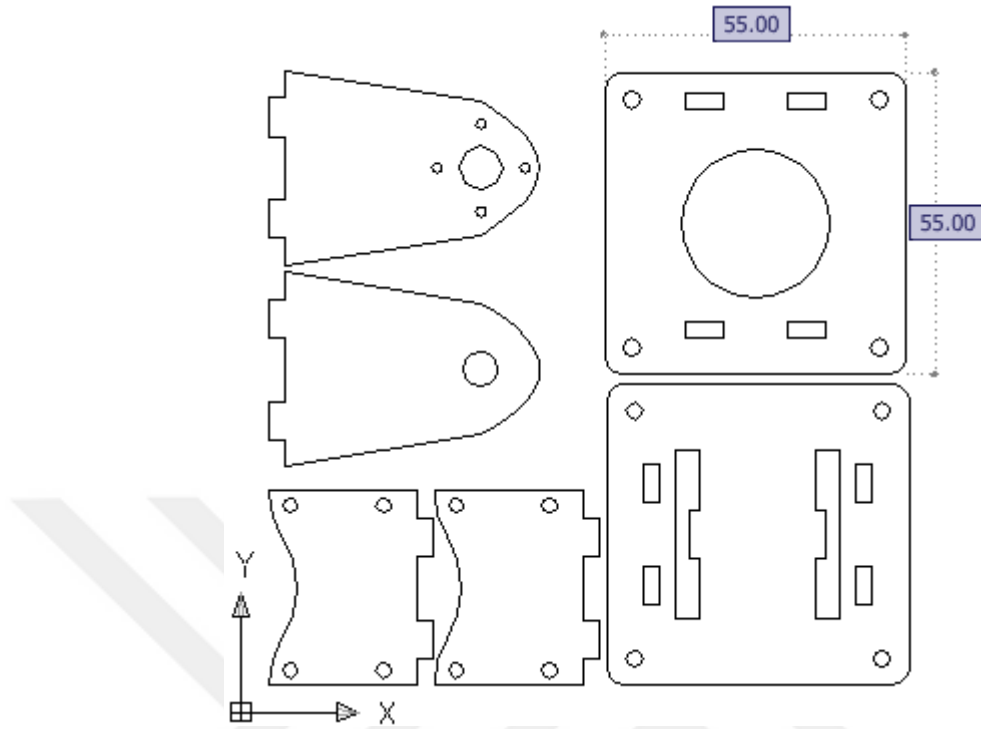
İkinci kasa tasarımı motor şasisi kullanılarak yapılmıştır. Motorlar birbirine küçük alüminyum parçalarla bağlanarak kasa tamamlanmıştır. Bu tasarımda eklem adeti daha fazla ve eklem boyutları çok kısa olmuştur. Tasarımda kullanılan cıvatalar yere keskin kenarları üzerine değerek yüksek basınç etkisi ile istenmeyen batmalara sebebiyet

vermiştir. Ayrıca robot özellikle doğrusal hareketi yaparken devrildiği gözlenmiştir. Bu tasarımın diğer bir dezavantajı, kabloların en korumasız olduğu kasa yapısı olmasıdır.



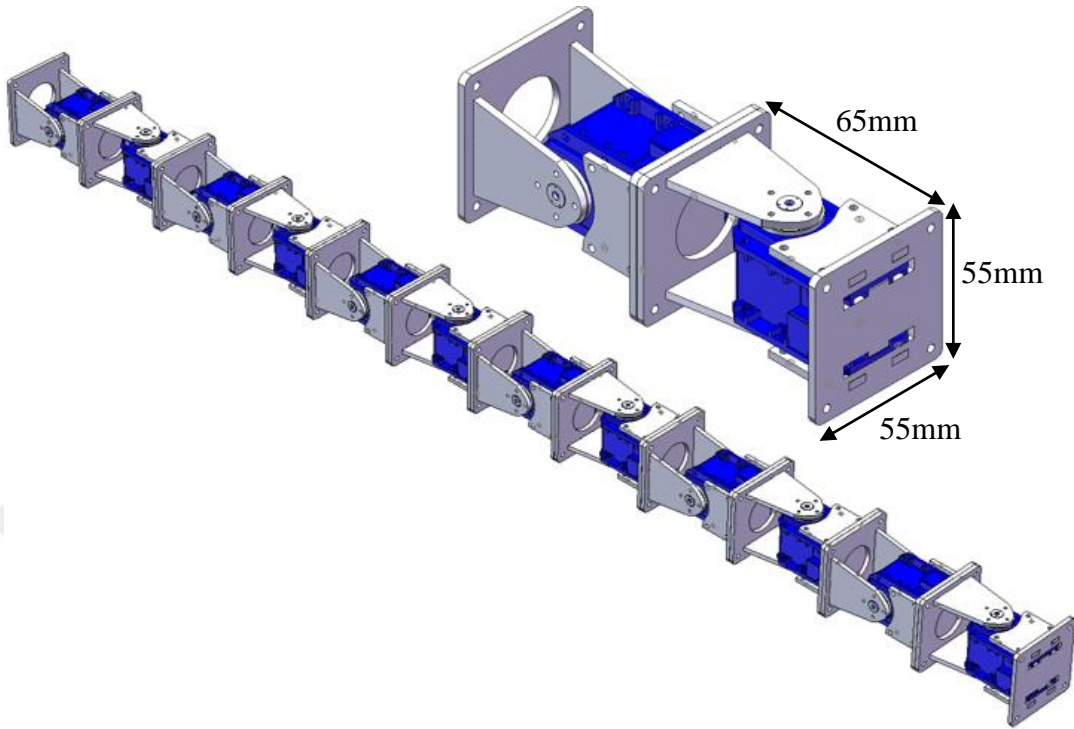
Şekil 7.3. Motor gövdesi üzerine tasarlanan robot kasası

Son kasa tasarımında ise kasa kare kesitli pleksi levhadan oluşmaktadır. Çizimler SolidWorks programında çizilerek montaj işlemi de bu yazılım üzerinden yapılmıştır. Lazer kesim yöntemi ile pleksi levha kestirilmiştir. Malzeme olarak 3mm pleksi levhadan üretilmiştir. Pleksi levha, şeffaf ve renkli bütün formlarında parlak bir görünüme sahiptir. Atmosfer şartlarında dayanıklılığı diğer bütün plastiklerden daha yüksektir. Bu sebeple çok değişik iklim şartlarında dahili ve harici geniş uygulama alanlarında kullanılabilir.



Şekil 7.4. Robot kasasına ait 2B bileşen çizimleri

Yılanlı robotumuz 12 eklemden oluşmakta ve toplam boyutu 780mm dir. Yılanlı robotun eklem boyu 77.32mm, eni ve genişliği ise 55mm dir. Eklemler birbirine 3mm somunlu civata yardımıyla bağlanmaktadır. Kestirilen pleksi parçalar komponentli yapıştırıcının hızlandırıcı bileşeni kullanılmadan yapıştırılmıştır. Bu yöntem yapışmanın daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Hareketli pleksi parça, motorun flanşına vida ile sabitlenerek montajı yapılmıştır. Motor tarafındaki sabit pleksi bileşen, motorun kenarlarında bulunan vida delikleri yardımıyla montajlanmıştır.



Şekil 7.5. Yılsansı robot montajlı kasa ve genel görünümü

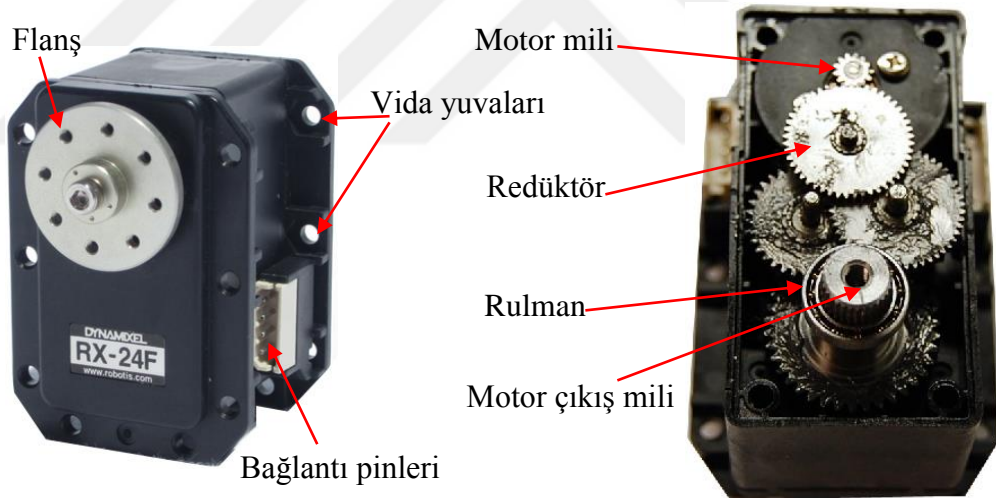


Şekil 7.6. Yılsansı robotun montajı bitmiş hali

Yılsansı robota ait motor güç ve kontrol kabloları kasanın hareketini engellemeyecek şekilde kasaya zil teli ile sabitlenmiştir.

## 7.2. Servo Motorlar

Servo motorlar hız ve konum kontrolünün yapılabildiği DC veya AC çeşitlerin olduğu genelde redüktörle gücü artırılmış ve hızı düşürülmüş özel motorlardır. Servo motorlar da çıkış; mekaniksel konum, hız veya ivme gibi parametrelerin kontrol edildiği, özette hareket kontrolü yapılan bir düzendir. Servo motorlar ayrıca sürücü ve kontrol devresini de içerisinde barındırmaktadır. Kullanılan motorlar iletişim biçimi olarak daisy chain(papatya zinciri) yapıya sahiptirler. Yani dış birimler ve ağ bağlantı noktalarının birbiri ardına seri olarak bağlanmasıdır. Bir bakıma seri bağlı elektrik devrelerinin bilgisayar sistemindeki karşılığı da denilebilir. Papatya zincirinin en önemli avantajı basit olmasıdır. Bir diğer avantajı ise ölçeklenebilir olmasıdır. Kullanıcı, belirlenmiş bir üst sınır kısıtı doğrultusunda, istediği kadar noktayı zincir boyunca ekleyebilir [72].



Şekil 7.7. Servo motor bileşenleri ve redüktör yapısı

Servo motorlar RS-485 iletim protokolüne sahiptirler. USB portu sinyalini RS-485 yapıya çevirmek için USB2Dynamixel denen bir aparat kullanılmaktadır. İşletim sistemi bu aparatı seri port olarak görmekte ve bu şekilde kullanılmaktadır. Bu aparat C# üzerinden seri port olarak kullanılmakta olup yazılımla sanki bir COM port olarak C# üzerinden iletişim sağlanmaktadır. Aslında USB sinyali, RS-232 sinyaline bu sinyalde RS-485 yapıya dönüştürülmektedir. Aşağıda servo motorların USB2Dynamixel aparata bağlanma şekli aşağıda verilmiştir. Bu şekilde 254 adet servo motor paralel olarak birbirine bağlanarak motor ağı kurulur. Motorlara ait ID numarası yardımıyla istenen

motorun istenen parametresi öğrenilebilir ya da değiştirilir. ID numarası bir nevi adres numarası gibidir.



Şekil 7.8. USB2Dynamixel aparatı ve motor bağlantı şekli

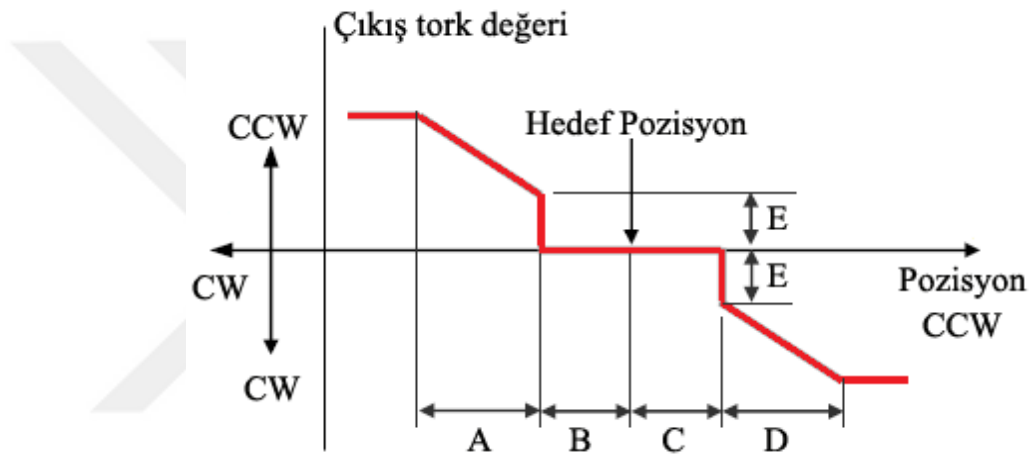
Servo motorun hızı, pozisyonu, maksimum tork değeri ve sınır açıları belirlenebilmekte ve öğrenilebilmektedir. Mevcut pozisyonu, sıcaklığı, gerilim değeri ise sadece öğrenilebilmektedir. Ayrıca motorun ürettiği aşırı yük, pozisyon hatası, aşırı sıcaklık gibi geribildirimleri program yardımıyla kullanılabilir. Ek 1, Tablo 1'de motora ait kontrol edilebilen büyüklükler listelenmiştir.

Bu tabloda R ve W harfleri erişim hakkını göstermektedir. R(Read) harfi o parametrenin okunabilir, W(Write) harfi ise yazılabilir olduğunu göstermektedir. Yirmi dördüncü hafızadan sonrası RAM hafıza, öncesi ise EEPROM hafızadır. Bilindiği üzere EEPROM hafızada kalıcı bilgiler, RAM hafızada ise geçici bilgiler yer almaktadır. Motora her enerji verilip tekrar kesildiğinde RAM hafızadaki verilerin tekrar güncellenmesi gerekmektedir.

Servo motor pozisyon kontrolünü yapısında yer alan potansiyometre yardımıyla direnç değişimini algılayarak hissetmektedir. Servo motora ait kontrol ve geribildirimlere bilgisayar üzerinden erişilmesi için servo motor üreticisi tarafından dynamixel.dll dosyasında bulunan alt programlar kullanılır. Bu alt programlar güncel birçok programlama dili ile kullanılarak istenen kodlar icra edilir. Ayrıca firma servo motorların bahsedilen ayarlarının yapılması için bir programı da motorların yanında kullanıcıya sunmaktadır. Denemelere başlamadan önce servo motorların maksimum dönmesi gereken açılar manuel belirlenerek, sınır parametreleri değiştirilmiştir. Bu

parametreler robot için 0–1023 arasında olup derece olarak çevrildiğinde ise 0–300 derece arasında değişmektedir. Belirlenen alt ve üst sınır açıları motor konfigürasyon hafızasına yazılmıştır. Bu hafıza bir nevi BIOS parametreleri gibi olup kalıcı hafızada tutulmaktadır. Sınır değerler motora ait birimle 270–760 değerleri ve açısız olarak ta 80 – 222 derecedir. Robota ait eklemler yaklaşık 142 derece serbestlik açısına sahiptir.

Servo motorlarda hedef pozisyona yaklaşıldığında hareketin biçimini ayarlamak için 4 farklı parametre bulunmaktadır. Bunlar aşağıda gösterilmiştir.

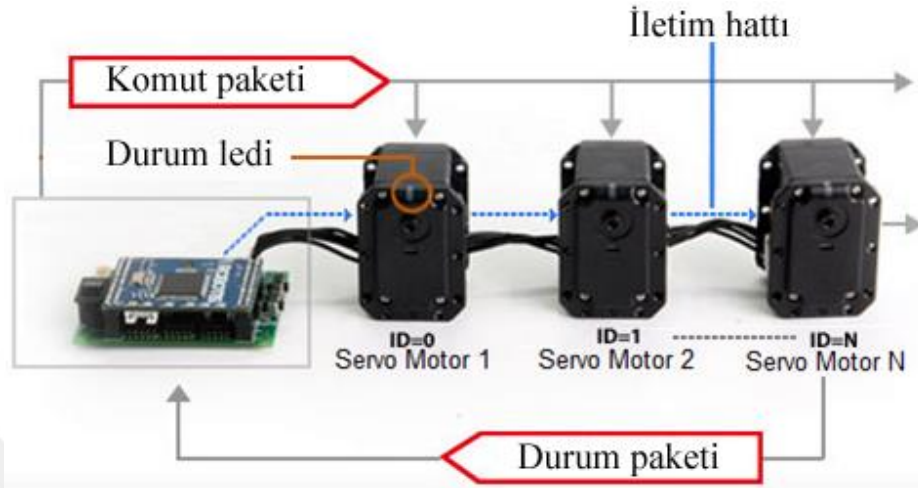


Şekil 7.9. Hedef pozisyona yaklaşım aralığı ve eğrisi

Grafikteki “A” aralığı motor saat yönünde dönerken hedef pozisyona gelmeden önce torkun maksimum değerden minimum değere ne kadar sürede düşeceğini belirler. “B” aralığı motor saat yönünde dönerken hedef pozisyona gelmeden önce torkun kaldırılacağı aralığı belirler. “C” aralığı motor saatin tersi yönünde dönerken hedef pozisyona gelmeden önce torkun kaldırılacağı aralığı belirler. “D” aralığı motor, saatin tersi yönünde dönerken hedef pozisyona gelmeden önce torkun maksimum, değerden minimum değere ne kadar sürede düşeceğini belirler. “E” torkun sıfırlanmadan önce minimum değerini belirler.

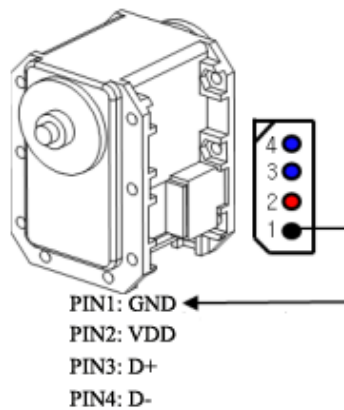
Servo motorlar birbirine ağ yapıda paralel bir şekilde bağlanırlar. Her bir motorun kendisine ait 0-253 arası bir adresi(ID) vardır. Ağdaki iki motor aynı ID numarasını alamaz. 254 adresi genel yayıncı(broadcast) adresidir. Bu adrese veri gönderildiğinde tüm motorlar bu veriyi alırlar. Motorların istenirse durumları ile ilgili çeşitli veriler

alınabilir. Bunlar komut hatası, aşırı yükleme hatası, veri doğrulama hatası, pozisyon sınır hatası, aşırı ısınma hatası, komut aralık dışı hatası, giriş voltaj hatasıdır.



Şekil 7.10. Servo motor iletim hattı

Servo motorlar 4 pinli bir konektöre sahiptir. Bunlardan ikisi besleme ve diğer ikisi ise iletim amaçlı kullanılmaktadır. Başlangıçta servo motorlara adres atamak için Dynamixel Wizard denilen firmanın sağladığı program kullanılabilir. Bu program yardımıyla motorun tüm parametrelerine erişilerek değerleri öğrenilir veya değiştirilebilir.



Şekil 7.11. Servomotor konektörünün pin dağılımı

### 7.2.1. Motor-Bilgisayar Bağlantı Arayüzü

Bilgisayardan gönderilen verilerin motorlara uygun forma dönüşmesi için USB2Dynamixel denilen bir çeviriciye ihtiyaç vardır. Bu aparat 2 tip çeviri yapar.

Aparat USB arayüze takılır fakat seri port gibi kullanılır. Diğer taraftan aynı aparat motora uygun sinyali(RS-485 veya TTL) de üretir. Dynamixel serisi motorlar iki farklı iletim protokolüne sahiptir. Bir kısmı TTL(3 pinli) diğer kısmı RS-485(4 pinli) protokolüne sahiptir.



Şekil 7.12. USB2Dynamixel yapısı ve aparat şekli

### 7.2.2. Motor Güç Devresi

Sistemin güç gereksinimi motor/motor sürücü ve iletişim yapısı olarak birbirinden bağımsızdır. Motorlar için gerekli olan gerilim harici bir kaynaktan sağlanmaktadır. Gerilim kaynağı olarak 12V bir adaptör veya denk bir kaynak kullanılabilir. Motor ve adaptör ara bağlantısını yapmak için güç aparatına ihtiyaç vardır.



Şekil 7.13. Servomotor enerji besleme arayüzü

Motorların istenen doğru pozisyonda ve hızda çalışabilmesi için motorlar tarafından talep edilen akım miktarının sürekli sağlanması gerekmektedir. Aksi halde gerilim düşümü yaşanması kaçınılmazdır. Bu bağlamda kaynak olarak 12 V akü kullanılmıştır.

### 7.2.3. Motor Bağlantı Kabloları

Motor bağlantı kablo uçları 4 pine sahip konektörlü yapıda, çoklu tel yapıdan oluşmakta ve 20cm uzunluğundadır.



Şekil 7.14. Dynamixel motora ait kablo/konnektör yapısı

### 7.3. Sistem Düzenegi

Engellerin bulunduğu bir ortamda engellerden sakınarak hedefe varılabilmesi için engeller ve robotun içerisinde olduğu çalışma alanı gerekmektedir. Bu çalışma alanına literatürde workspace denilmektedir. Gerçek zamanlı resim alma üzerine dayalı bir sistem, çözünürlüğü yüksek bir kameraya ve aydınlatması iyi bir ortama sahip olması gerekmektedir. Burada belirli renklerde engellerin olduğu bir platform, yılanı robot, engelleri ve hareket ortamını bilgisayara aktarmak için twain uyumlu bir kamera ve gelen görüntüleri tarayıp yılanın hareket yörüngesi belirleyen ve bu yörünge üzerinde yılanı robotun hareket edebilmesi için gerekli komutların oluşturulduğu ve robota gönderildiği bir bilgisayar bulunmaktadır. Robota giden veriler USB üzerinden çevirici bir adaptör ile sağlanır. Bu amaçla uyumlu hazır bir devre kullanılacaktır.

### 7.4. Engeller

Malzeme olarak yeşil renkte kalın mukavva karton kağıtlardan oluşmaktadır. Engeller düzgün olmayan çeşitli geometrilere sahiptir. Engeller, ortamda sabit olmayıp istenirse yerleri ve doğrultuları değiştirilebilir.

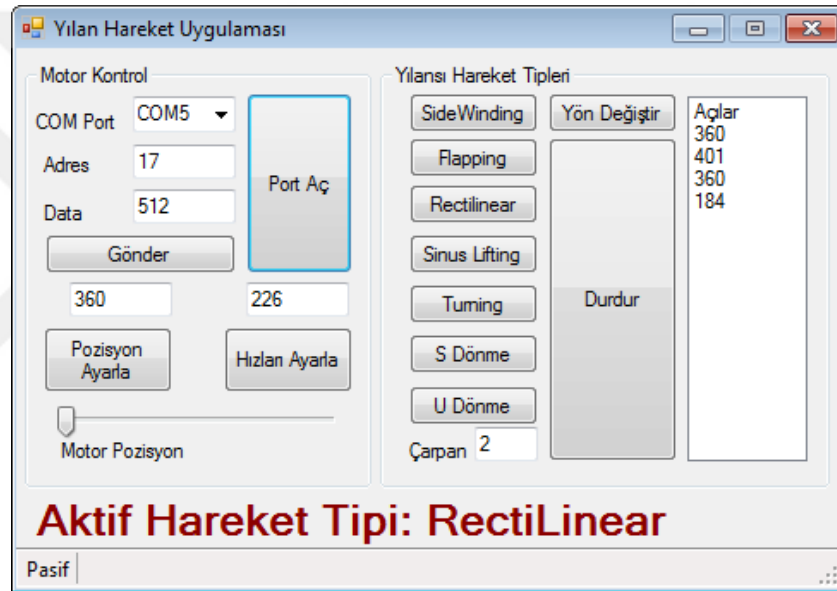
### 7.5. Bilgisayar

Gelen verileri değerlendirip yılanın bir sonraki eklem açılarını belirlemek amacıyla kullanılır. Engellerin bulunduğu ortamdan alınan yüksek çözünürlüklü bir resim, threshold tekniği kullanılarak engellerin konumu belirlenir. Üç bantta(RGB) uygulanan

threshold tekniği, daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Belirlenen engel koordinatları yeni geliştirilen akıllı nesnelere yöntemi ile yılanın güvenli hareket edebileceği bir yol belirlemektedir.

## 7.6. Yılanlı Robot

Yılanlı robotun eklem sayısını belirlerken kararlılık, istenen hareketi yapabilme, hızlı hareket edebilme ve az enerji tüketimi dikkate alınır. Enerji tüketimi motor seçimi yapıldıktan sonra eklem sayısının olabildiğince az olması ile çözümlenir.



şekil 7.15. Yılanlı robot hareket yazılım arayüzü

## 7.7. Resimlerin Elde Edilmesi

Resimler yüksek çözünürlüğe sahip Logitech QuickCam Pro 9000 yardımıyla bilgisayar ortamına alınmıştır. Bu kamera Twain uyumlu olup yazılımcılar için standart fonksiyonlara sahiptir. Kamera 2 megapiksel(1600x1200) video çözünürlüğüne sahip ve 8 megapiksel resim çözünürlüğüne sahiptir. Üzerinde Carl Zeiss marka lens vardır. Programlama ortamlarında kullanıcıya resim yakalama aygıtını kontrol etmeyi sağlayan ara yüz olan Twain yardımıyla uygulama içerisine resimler gerçek zamanlı alınmış ve gerekli tüm resim işleme tekniklerine açık hale getirilmiştir. Resimler bilindiği üzere Kırmızı(R), Yeşil(G) ve Mavi(B) bantlarının birleşiminden oluşmaktadır. Bu bant değerleri 24 bit bir resim için her biri 8 bit ve 256 farklı tondan oluşmaktadır.



Şekil 7.16. Uygulamada kullanılan Logitech marka WebCamin görünümü

TWAIN uyumluluk katmanı, bir programın WIA(Windows Resim Alma) aygıtıyla iletişim kurabilmesini sağlar. Bu katman kalıcı bir TWAIN veri kaynağı olarak gösterilir. Katman başlatıldığında veya etkinleştirildiğinde, kullanıcı, veri aktarımı gerçekleştirmek veya işlemi sonlandırmak ister.

Kalıcı bir veri kaynağı olduğunda, TWAIN döndürülen kodları için üç seçenek sunulur.

*Hata:* TWAIN veri kaynağının veri aktarımı gerçekleştirmesini engelleyen bir hata oluşmuştur.

*Başarılı:* Tüm ayarlar yapılmıştır ve işlem veri aktarımı gerçekleştirmek için hazırdır.

*İptal:* Kullanıcı arabirimi kapatmıştır ve veri aktarımı gerçekleştirmek istememektedir.

Yukarıda listelenen üçüncü taraf programlar döndürülen kodları iki kategoriye ayırır:

Uygun veya başarısız. "İptal" döndürülen kodu "başarısız" kodu olarak gruplandırılır.

Döndürülen kodları hatalı yorumlayan programlar hata iletilerinin görüntülenmesine neden olabilir. Sorunu gidermek isteyen bir kullanıcı hata iletilerini okuyabilir ve program tarafından bildirilen eylemleri gerçekleştirebilir, ancak kullanıcının algılanan sorunu giderme girişimleri gereksizdir [73].

## 7.8. Renkli Resimlerin Gri Seviyeye Çevrilmesi

Resim işleme tekniklerinde işlemleri kolaylaştırmak, parametreleri azaltmak ve algoritmada maksimum hız elde etmek için renk sayısı azaltılmış ve daha az hafızaya

gereksinim duyan resimlere ihtiyaç vardır. Bunların en başında renkli bir resmin siyah beyaz (gri tonlamalı) olarak temsil edilmesi gelir. Bilindiği üzere beyaz renk her üç bandın maksimum 255 değeridir. Siyah renk ise minimum 0 değeridir. Her iki durumda bir pikselin tüm bantlarının değeri aynıdır. Dolayısıyla RGB değerleri eşitlenen bir piksel siyah ve beyaz arasında değerine göre gri bir seviyeye sahip olacaktır. Renkli bir resim siyah beyaza çevrilirken aşağıdaki yöntem izlenir.

$$O_{r,g,b}=KR_x+LG_x+MB_x \quad (7.1)$$

Yukarıdaki ifadede  $K+L+M=1$  olmalıdır. Her bandın eşit miktarda temsili için  $K=L=M=0.333$  olarak alınabilir.

$$O_{r,g,b}=0,3333.R_x+0,3333.G_x+0,3333.B_x \quad (7.2)$$

$R_x, G_x, B_x$  değerleri ise sırasıyla resmin konu olan pikselinin kırmızı, yeşil, mavi değerleridir.  $O_{r,g,b}$  değeri ise renkli resmin, gri tonlamalı resimdeki  $x$ 'nci pikselinin alacağı  $r, g, b$  değerleridir.

Yukarıdaki ifadeden anlaşılacağı üzere, renkli bir resim gri tona çevrildiğinde her bir pikselin tüm bantlarının değerleri aynıdır. Dolayısıyla 0–255 arasında bir değer alacaklardır.

## 7.9. Filtreleme İşlemleri

Filtrelemenin amacı; resim eldesi sırasında oluşan gürültüyü yok etmektir. Filtreleme uzaysal veya frekans tabanlı olabilir. Resim işlemede çok çeşitli filtre tipleri mevcuttur.

Filtreler konvolusyon tekniği ile maskenin resim üzerinde kaydırılarak, karşılık gelen piksel değerlerinin çarpılıp, toplanması ile uygulanır. Eşitlikte bu işlem  $I(4,3)$  numaralı piksel için açıkça gösterilmektedir.



-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

HP1

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

HP2

1	-2	1
-2	5	-2
1	-2	1

HP3

Şekil 7.19. Yüksek geçiren filtre çeşitleri

Bilgileri işlemek için resimleri indirgemenin en yaygın yolu segmentasyondur [75]. Pratikte yalnızca ölçülmek istenen nesnelere barındıran resim ve görüntüler elde etmek imkânsızdır. Herhangi bir ortamdan alınan resim üzerinde ölçülmek veya üzerinde çalışma yapılmak istenen kısımlar ile beraber ikinci planda kalan, ortam nesnelere de olacaktır. Segmentasyon resim dokusu içerisindeki istenen, gerekli bölümleri çıkarmak için kullanılan teknikleri barındırır. Segmentasyon istenen kısımlar elde edilene kadar devam eder ve elde edildikten sonra ise durur [76].

Eşik değeri (eşik değeri) yöntemi segmentasyonda kullanılan çok önemli bir yaklaşımdır. Eşik değeri, genelde siyah beyaz (gri seviye) resim üzerine uygulanan bir yöntemdir [77]. Resim üzerinde istenen kısımların ayırt edilebilmesi için en az bir aralık değeri içeren ölçüt tanımlanması gerekir. Bu ölçüt, resim üzerinde bir pikselin değerinin tanımlanan aralık içerisinde olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Eğer ölçüt sağlanırsa resmin o piksellerinin rengi değiştirilir. Şimdi eşik değeri yöntemlerini inceleyelim.

### 7.10. Yarı Eşik Değeri

Resme uygulanan eşik değeri aralığı dışında kalan kısmın 0 yapılması ve aralık içerisindeki aynen piksel değerlerini koruması şeklinde yapılır [78].

$$b(x) = \begin{cases} a(x) & \text{eğer } h \leq a(x) \leq k \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (7.5)$$

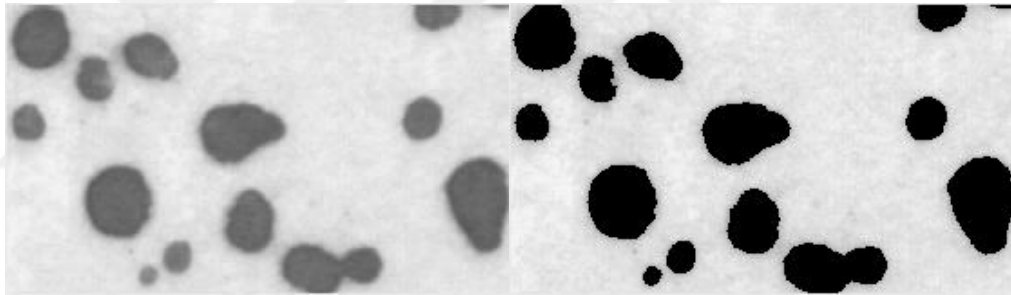
Denklemden  $a(x)$  kaynak resmi,  $b(x)$  ise eşik değeri resmi gösterir. Eğer aralık, tek bir değerden oluşuyorsa aşağıdaki gibi olacaktır.

$$b(x) = \begin{cases} a(x) & \text{eğer } a(x) \geq k \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (7.6)$$

Diğer bir durumda ise 1 olacak kısımlar 0 yapılabilir.

$$b(x) = \begin{cases} a(x) & \text{eğer } a(x) \leq k \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (7.7)$$

Eşitliklerde yer alan  $[h,k]$  değerleri eşik değer aralığını belirlerken,  $a(x)$  kaynak resmi,  $b(x)$  ise eşik değer resmi gösterir. Aşağıda gerçek zamanlı alınan bir resmin yarı eşik değer yöntemi ile segmentasyon işlemine tabi tutuluşu gösterilmiştir.



Şekil 7.20. Solda orijinal resim, sağda eşik değer uygulanmış resim

### 7.11. Çok Bantlı Eşik Değer

Renkli bir resmi gri seviyeye çevirmek piksel değerleri açısından, resim üzerinde iki önemli etki oluşturur.

- Resmin her bir pikselinin RGB değerleri, aynı değere sahip olurlar.
- Resimdeki piksellerin renk tonu sayısı 16.777.216 değerinden 255'e indirgenerek renk kayıpları yaşanır

Bir resmin RGB değerlerinin, tamsayı olduğu düşünülürse her bandın alabileceği değer farklılığı 256 ya indirgenmiş olur. Milyonlarca  $(256 \times 256 \times 256)$  renk yerine her bir kanal için 256 rengin kullanılması ve kanalların renk değerlerinin de birbirine eşit olması gri seviyeye çevrilmiş resimleri daha az özellik ve ayrıntı taşıyan bir konuma

getirir. Bu aşamada yapılan eşik değer uygulaması, özellikle içerisinde birden fazla ton barındıran resimlerde daha kaba ve hassas olmayan bir etki oluşturacaktır

RGB seviyesinde yapılan eşik değer işlemi her bir bant için (R,G,B) ayrı ayrı uygulanarak renkli bir resmin segmentasyon işlemi yapılır.

$$\begin{aligned}
 b_R(x) &= \begin{cases} 1 & \text{eğer } R_1 \leq a_R(x) \leq R_2 \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \\
 b_G(x) &= \begin{cases} 1 & \text{eğer } G_1 \leq a_G(x) \leq G_2 \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \\
 b_B(x) &= \begin{cases} 1 & \text{eğer } B_1 \leq a_B(x) \leq B_2 \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

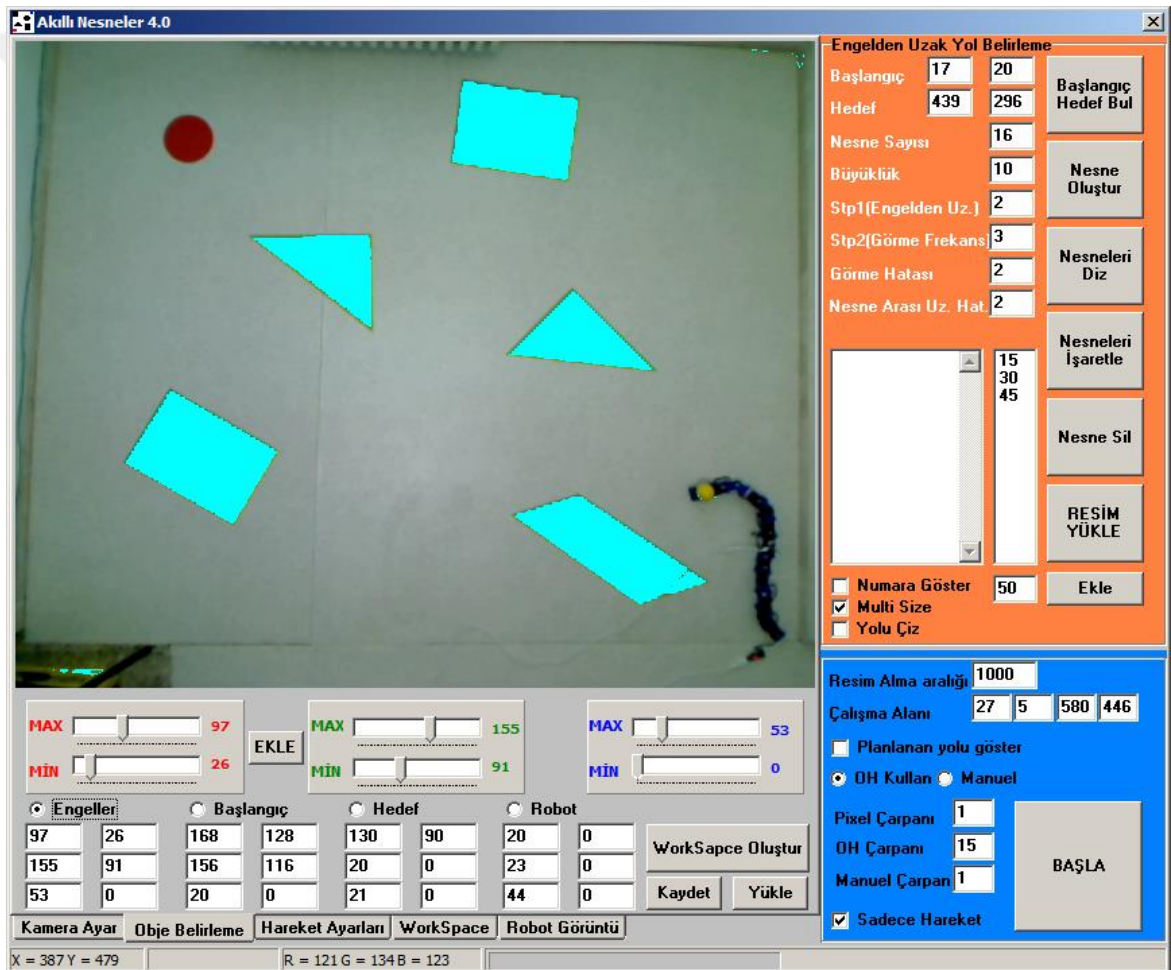
Yukarıdaki eşitliklerde,  $b_R(x)$ ,  $b_G(x)$ ,  $b_B(x)$  değerleri her bantın hesaplama sonucunda aldığı 1 ya da 0 değeri,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  değerleri her bant için uygulanan ayrı ayrı eşik değerleridir.  $a_R(x)$ ,  $a_G(x)$ ,  $a_B(x)$  ise orijinal resmin piksellerinin sırasıyla R, G, B değerlerini ifade eder. Yukarıdaki hesaplamalar sonucunda üç bant için hesaplanan değerler, son olarak Denklem 7.9'da yerine konularak eşik değer hesaplanır.

$$b(x) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } (b_R(x)=1) \text{ ve } (b_G(x)=1) \text{ ve } (b_B(x)=1) \text{ ise} \\ a(x) & \text{değilse} \end{cases} \tag{7.9}$$

Denklem 7.9'da yer alan  $b(x)$  değeri, pikselin alacağı son değer ve  $a(x)$  değeri, orijinal değerdir.  $a(x)$  yerine istenirse bazı eşitliklerde kullanıldığı üzere 0 değeri de kullanılabilir.

$$b(x) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } (b_R(x)=1) \text{ ve } (b_G(x)=1) \text{ ve } (b_B(x)=1) \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \tag{7.10}$$

Uygulamada çok bantlı eşik değer yöntemi kullanılmıştır. Çünkü kullanılan kameranın gerçek zamanlı resimlerde ortam ışıklandırmasından kaynaklanan renk tonu geçişleri/karışıklığı gri resimlerde doğru sonuç vermemektedir. Örneğin kırmızı bir nesnenin ortamda ışık düşen tarafları beyaz renk tonlarında, karanlıkta kalan tarafları ise siyah renk tonlarında görünmektedir. Her ne kadar ton değişikliklerini azaltmak için LED projektör kullanılsa da güneş ışığı alan çalışma alanında ışık durumuna göre ton kaymaları oluşabilmektedir. Hazırlanan programa ait ekran görüntüsü aşağıda verilmiştir.

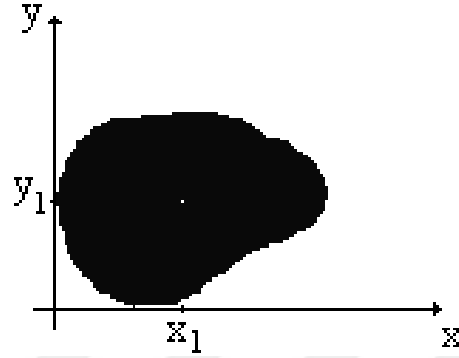


Şekil 7.21. Online yılanı robot engel tanıma yazılımı arayüzü

## 7.12. Ağırlık Merkezlerinin Bulunması

Başlangıç ve hedef noktalarının merkezini bulabilmek için ağırlık merkezlerinin bulunması özellikle gerekmektedir.

Başlangıç ve hedef noktaları(kırmızı ve mavi renk) ağırlık merkezi bulunurken bu noktaların sahip olduğu piksellerin x ve y koordinatları dikkate alınır. Aşağıda resim alt parçası için kullanılan ağırlık merkezi bulma eşitliği gösterilmiştir.



Şekil 7.22. Ağırlık merkezinin bileşenleri

$$x_a = \frac{\sum x_c}{\sum p}, \quad y_a = \frac{\sum y_c}{\sum p} \quad (7.11)$$

$x_a$ : Ağırlık merkezinin x eksenini kestiği nokta

$y_a$ : Ağırlık merkezinin y eksenini kestiği nokta

$x_c$ : Pikselin x koordinatı

$y_c$ : Pikselin y koordinatı

$p$ : Piksel sayısı

## 8. BÖLÜM

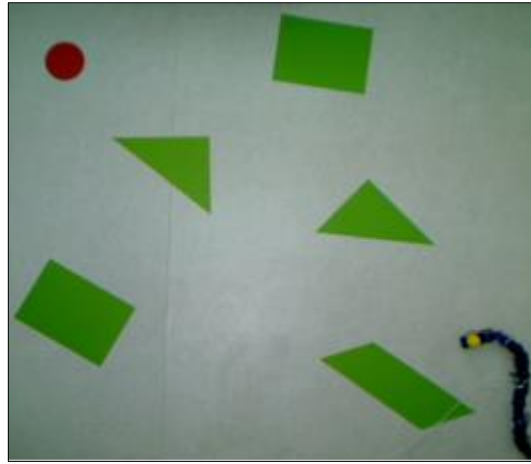
### DENEYLER

#### 8.1. Ortamın Hazırlanması

Yılanlı robotun hareket edebileceği içerisinde engellerin, başlangıç ve bitiş noktalarının olduğu bir ortam hazırlanarak test çalışmaları yapılmıştır. Görüntü analizi yapılarak robotun engellere değmeden varış noktasına ulaşması için gerekli komutlar robota iletilmiştir. Robotun engellere değmeden güvenli bir yol izlemesi için kullanılan görüntü analizi teknikleri farklı renklerin ortamdaki algılanmasına dayanmaktadır. Bu nedenle ortam bileşenleri farklı renklerde seçilmiştir. Yer sergisi beyaz, engeller yeşil, varış noktası kırmızı ve robot siyah tonlarda seçilmiştir.

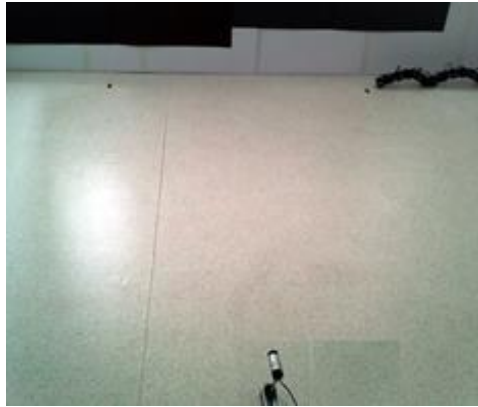
Renklerin kamera tarafından sahip oldukları doygunlukta algılanması için ise gün ışığına ek olarak aydınlatma kullanılmıştır. Işığın yetersiz olduğu ortamlarda renklerin siyah renge doğru kaymakta ve renkler arası ayırt edilebilirlik azalmaktadır.

Deney çalışmalarında yılanlı robotun hareketi için yunuslama-sapma ve sadece yunuslama eksenlerinde iki türlü hareket biçimi üzerinde çalışılmıştır. Bu yüzden her iki hareket biçimindeki deney çalışmalarında engellerin yerleşimi ve tipleri farklı olacaktır.



Şekil 8.1. Yatay hareket için deney platformu

Şekil 8.1’de görüleceği üzere yunuslama-sapma eksenlerine sahip hareket biçimlerinde robot yatay engeller arasından geçerken, yunuslama eksenine sahip hareket biçiminde düşey engeller arasından geçecektir. İlkinde kamera, Şekil 8.5’ te gösterildiği üzere üstte ve ortada yer alırken, ikincisinde ise yanda(düşeyde) ve ortada yer almaktadır.



Şekil 8.2. Düşey hareket için deney platformu

### 8.1.1. Taban ve Yan Sergisi

Robotun üzerinde hareket ettiği platform piyasada mineflo ismi ile satılan malzemedir. Mineflo zemine özel tutkalı sürülerek yapıştırılan 3mm kalınlığında PVC kaplı bir zemin sergisidir. Seçilen renk, beyaz zemin üzerine gri, krem ve siyah noktalı desene sahip olup kamera için %20 gri bir renk olarak algılanmaktadır.



Şekil 8.3. Yılsarı robot hareket robot platformunun yer sergisi

Mineflo tercihi robotun sert beton zeminde kaymadan hareket edebilmesi ve mekanik kısmın değme noktalarında deforme olmaktan korunmasını sağlamaktır.

Yapılan çalışmalarda yer sergisinin ortamın sıcaklığına göre robotun hareketine rasgele değerlerde bozucu giriş olarak negatif etki ettiği gözlenmiştir. Sıcaklık arttıkça bozucu etki arttığı saptanmıştır.

Doğrusal harekette engeller düşeyde yer alacak olup bu nedenle 50x300cm boyutlarında duralit malzeme kullanılmıştır. Üzeri beyaz renkli kağıt ile örtülmüş ve engeller olarak çeşitli boyutlara ayarlanabilen siyah renkli fon kartonları kullanılmıştır. Robotun tepe noktaları bu engellerle kesişmeyecek şekilde, dalgalanma açısını ayarlayarak geçmesi amaçlanmıştır.

### 8.1.2. Renklendirmeler

Yılsarı robota bağlanan veri kablosu, sinyal dönüştürücü aparat, güç dağıtım noktası, güç kablosu ve adaptörün renklerini resim işleme hesaplamalarında göz ardı etmek için elektrik, ısı, ses yalıtımında ve klimalardaki boru yalıtımında kullanılan PVC izole bant kullanılmıştır. Bu bantlar alev ve yüksek ısıya dayanıklı olarak üretilmiştir. Piyasada bantların çeşitli renkleri üretilmiş olup uygulamada beyaz renkli izole bant kullanılmıştır.



Şekil 8.4. Renk tabanlı resim algılamada ortamın iyileştirilmesi çalışması

İzole bant kablo ve diğer aparatlar üzerine sarılarak uygulanmıştır.

### 8.1.3. Aydınlatma

Renklerin doğru ve doygun olarak elde edilmesi için ortam aydınlatmasına ek olarak başka aydınlatma kaynakları gereklidir. Ayrıca gün ışığının yetersiz olduğu durumlarda ve karanlıkta ortam bileşenlerinin kameralar tarafından hatasız algılanması için yine harici bir aydınlatma gereklidir. Analog yapıya sahip, mevcut ortam aydınlatmalarında kullanılan ışık kaynaklarının kameralara belirli bir frekansta bindirdiği bozucu girişleri gidermek için analog olmayan aydınlatma kaynaklarına ihtiyaç olmaktadır. Bu amaçla 50W gücünde led ışık kaynağı(projektör) kullanılmıştır. Led lambanın ışık rengi gün ışığına yakın bir aydınlatmaya sahiptir. Led lambalar doğru akım ile çalıştığından frekans tabanlı ışık dalgalanmalarına neden olmamaktadır. Hatta led lambalar ışığı etrafa diğer normal ortam aydınlatmalarına göre daha düzgün yayarlar.

Led projeksiyon ortamda kameranın yanına ve hem kendisi hem de kablosu kamerayı ve görüntüyü etkilemeyecek şekilde tavana monte edilmiştir.

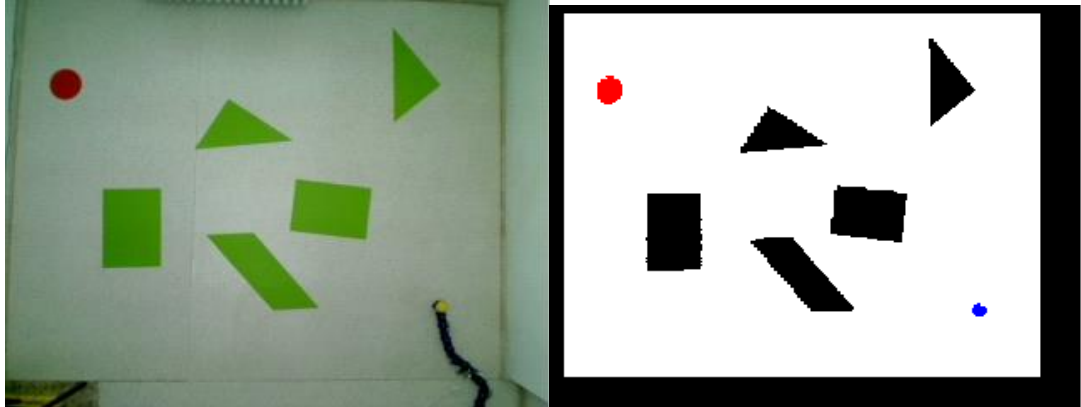


Şekil 8.5. Uygulamada kullanılan 50W gücünde tepe aydınlatması

## 8.2. Gerçek zamanlı engel belirleme

Akıllı nesnelere algoritmasında engelden uzak bir yol belirlenebilmesi için, gerçek zamanlı görüntü alınarak bu görüntüden engel ve hedef noktalar belirlenip en kısa yol uygulamasına hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

Hazırlanan yazılım, USB porta bağlı kameradan görüntüyü gerçek zamanlı olarak alıp işleyebilmektedir. Bu sayede robot ve engellerin bulunduğu ortamdan alınan resim üzerinde hareket yolunun bulunabilmesi için literatür kısmında bahsedilen resim işleme teknikleri kullanılmıştır. Bu tekniklerden eşik değeri (threshold) yöntemi kullanılarak resim; engeller, başlangıç noktası, bitiş noktası ve robot olmak üzere 4 kısma (segmentasyon) ayrılır. Eşik değeri yöntemi kamera ile alınan renkli bir resim üzerinde RGB bandında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.6. Yatayda elde edilen resimde segmentasyon işlemi

Resimlere uygulanan segmentasyon işlemi sorunsuz yapılabilmesi için ortamın yeteri kadar ışık alması gerekmektedir. Bu amaçla platform üzerine led yapıda bir projektör takılmıştır. Kamera kadrajına dâhil edilen kullanılmayacak alanlar resimdeki en dış kısmında bulunan siyah alanlardır. Engeller ve kullanılmayacak alanların rengi siyahtır. Video çözünürlüğü ve boyut büyüklüğü arttıkça eşik değer yöntemi ile bulunan ortama ait bilgiler gerçek ölçülere ve sınırlara daha yakın olacaktır.

Robotun en baş kısmındaki sarı renkli hedef robot her nerede ise bu noktadan itibaren hedef noktaya varmak için kullanılan başlangıç noktası olarak ayarlanmıştır. Robotun gövdesi segmentasyon içerisine dâhil edilmemiştir. Çünkü robotun gövdesine ait resim bileşenleri, belirlenen yörüngeyi robotun izlemesinde kullanılacaktır.

Doğrusal, sadece yunuslama ekseninde gerçekleşen hareket çeşidine ait ortam için ise düşey salınımları algılamak için düşey hedef ve engellerin görüntülenmesi gerekmektedir.

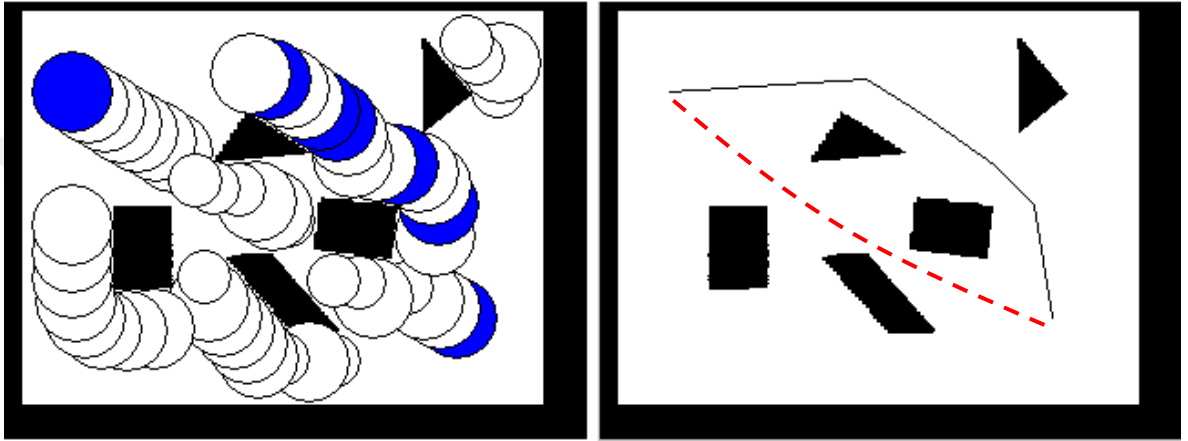


Şekil 8.7. Düşeyde elde edilen resimde segmentasyon işlemi

### 8.3. Yörünge Belirlenmesi

Akıllı nesnelere algoritması kullanılarak robot için en uygun yörünge bulunmaya çalışılmıştır. Geliştirilen algoritmanın diğer hareket planlama algoritmalarından farkı ve

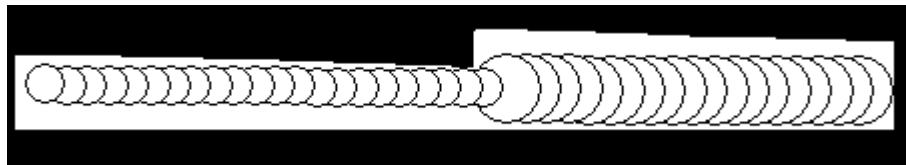
özgün değeri yılanı robotlar için hızlı hareket şartlarından olan geniş alanları bulabilmesidir. Daha hassas yol planlama yapmak için çoklu boyutlu akıllı nesnelere kullanılmıştır. Başlangıçta 24 adet nesne iki nokta arasına yerleştirilerek yol planlama çalışması başlatılmıştır. Engelden uzaklık değeri 2, görme frekansı 3, görme hatası 2 ve nesnelere arası uzaklık hatası ise 2 olarak seçilmiştir. Nesnelere boyutu uygulamamızda iki farklı şekilde seçilmiş olup 35cm ve 20cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.8. Akıllı nesnelere algoritması ile çoklu boyutlu hareket planlama uygulaması ve belirlenen yörünge

Belirlenen yol sabit genlikli ve en büyük nesne olan 35 cm boyutunda olduğu gözlenmiştir. Dikkat edilirse matematiksel olarak en kısa yol kesikli çizgiler ile gösterilen yoldur. Fakat bu yolun yılanı robot tarafından en kısa sürede alınmayacağı literatür kısmında izah edilmiştir. Robot düz çizgi ile belirlenen yolu sabit genlikte(35cm) daha hızlı alacaktır. Fakat bulunan bu yol matematiksel yola kıyasla daha uzun bir yoldur.

Doğrusal hareket için yapılan yörünge belirlemede ise robotun engellere değmeden olabildiğince yüksek genlikte gidebilmesi için resimde görünen genlik değeri çıkmıştır. Geniş alanda büyük dar alanda küçük genlikler öngörülmüştür.



Şekil 8.9. Yunuslama eksenine sahip robot için engelden uzak yol belirlenmesi

Yunuslama ekseninde icra edilecek hareket planlamada akıllı nesnelere algoritmasında kullanılan nesnelere boyutları 20 ve 35 cm büyüklüğündedir.

#### 8.4. Yılsans Robotun Yörüngeyi İzlemesi

Bulunan yörünge robot tarafından yüksek doğrulukta izlenmesi gerekmektedir. Robot kontrolünün hedefi, yılsans robotun baş kısmının izlenecek yola paralel olarak sırayla diğer eklemlerinde bu yola yakınsanması ile robotun yönlendirilmesidir [79]. Genelde yılsans robotlar iki farklı kategoriye; holonomik olmayan hız kısıtına sahip olanlar ve holonomik olmayan hız kısıtına sahip olmayanlar olarak ayrılabilir [80]. Holonomik kelimesi eğer bir robotun toplam serbestlik derecesi, kontrol edilebilen serbestlik derecesine eşitse bu robot için holonomik robot denilebilir. Holonomik yapılara örnek ise dönel mobilya tekerlekleri veya Omni ismi verilen tekerlekler gösterilebilir. Bu tekerlekler her bir zaman diliminde her yöne kısıtsız hareket edebilirler. Eğer kontrol edilebilen serbestlik derecesinin sayısı toplam serbestlik derecesinden daha düşükse holonomik olmayan robot denilir. İnsan kolu ve arabalar birer holonomik olmayan yapılardır. Holonomik olmayan kısıtlar, robotun her bir ekleminin bir yana kayma biçimidir. Burada her bir eklem yana doğru harekete zorlanır. Bu kısıtlar yılsans robotun istenen yönde doğrudan tahriki için girişlerin kontrol edilmesine imkân verir [80].

Yılsans robot yörüngeyi izlerken yataydaki sapmayı ifade eden OH parametresi yılsans hareket çeşitlerinin bükülme açısını ifade eden Denklem 2.2, 2.4, ve 2.5'e eklenmesi ile robotu yönlendirme amaçlı kullanılır [81].  $OH = 0$  olduğunda yılsans robot düz bir şekilde hareket ederken,  $OH \neq 0$  olduğunda ise işaretine göre bir yönde (sağ ya da sol) eğri bir yol boyunca hareket eder.

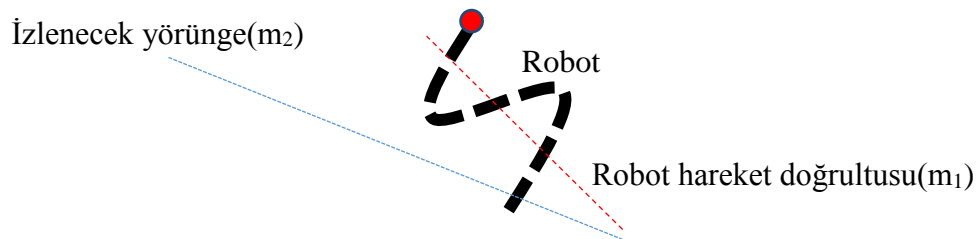
$$\theta_h(t) = A_h \sin(\omega_h(t) + (i - 1)\phi_h) + OH \quad (8.1)$$

Parametrelerdeki h indisi hareket bileşenlerinin yataya ait olduğunu ifade etmektedir. Çünkü robotun yüzeyde yönlendirilmesi sapma eksenine ait motorların tahriki ile mümkündür. Denklemde  $\Theta$  parametresi, bükülme açısını göstermekte olup  $A_h$  ve  $\phi_h$  ise sinüzoidal S hareketini belirler.

Uygulamada OH parametresinin değeri, PID tipi kontrolle belirlenmiştir. PID(Proportional,Integral, Derivative =oransal-integral-türevsel) denetleyici, yaygın bir şekilde endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan genel bir kontrol döngüsü mekanizmasıdır. PID kontrolör süreç kontrol girişini ayarlayarak hatayı(hata = istenen değer - ölçülen değer) en aza indirerek istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır. Oransal kontrol, sistemin statik doğruluğunu ve dinamik cevabını artırır. İntegral bileşeni büyük yük değişimleri nedeniyle oluşan oransal farkı azaltmak ve yok etmek için kullanılır. Türev yöntemi deosilasyon eğilimini azaltır ve hata sinyalini önceden sezen bir etki sağlar. Türev yöntemi özellikle ani yük değişimlerinin olduğu süreç kontrolünde çok kullanışlıdır. Diğer bir ifadeyle PID yöntemi bir veya iki denetim yönteminin hatayı kabul edilebilir limitler içerisinde tutamadığı hızlı ve büyük yük değişimleri olan süreç kontrol sistemlerinde kullanılır [82]. Robotun doğrultusu ile robotun baş kısmına en yakın bölgedeki yörünge doğrultusunun eğimleri farkı hata olarak PID kontrole girdi olarak uygulanmıştır.

$$OH = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (8.2)$$

Formülde  $m_1$ , robot gövdesinin doğrultusuna ait eğimi,  $m_2$ , yörüngeye ait eğimi,  $e$ , hata( $m_2 - m_1$ ) değerini,  $K_p$ , oransal kazancı,  $K_i$ , integral etki kazancını,  $K_d$  ise türev etki kazancını göstermektedir.



Şekil 8.10. Robotun yörünge izleme yapısı

Robota ait hareket doğrultusu kısmi ağırlık merkezleri arasındaki çizgiden oluşmaktadır. Uygulamada kısmi ağırlık merkezi toplam dört bölümden oluşmakta olup en son ve baştaki ağırlık merkezi birleştirilerek robotun vücut doğrultusu hesaplanmaktadır.

## 8.5. Frekans-Konum İlişkisi

Robotun bir periyod hareketi, saniyede icra etme süresi robotun frekansını belirlemektedir. Frekans arttığında robotun eklemleri daha hızlı hareket etmektedir. Fakat frekansın sistemin desteklediğinden fazla bir değere çıkması, hem motorlarda hem de robotun konumunda hatalara neden olmaktadır. Çünkü hareketlenen eklem konuma yerleşmeden yeni bir komut geldiğinde hali hazırdaki konuma gelmeden yeni konuma gelmek isteyecektir. Dolayısı ile frekans değerinin, açısal hızla bağlantılı olması gerekmektedir. Yüksek frekans yüzey ile robot arasındaki osilasyonu artırarak yere tutunamama problemlerini artırmaktadır.

Deney ilk olarak PVC(mineflo) yer sergisi üzerinde 2 Hz frekans değerinde yapılmıştır.

Tablo 8.1 PVC üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi

ORTAM = PVC												
Eklemler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Teorik pozisyonlar	-31	-34	-27	27	22	-4	44	-21	11	34	-35	-27
Deneysel pozisyonlar (f = 2 Hz)	-31	-32	-27	27	25	-4	47	-20	20	30	-20	1
Deneysel pozisyonlar (f = 1 Hz)	-31	-32	-26	27	25	-6	47	-20	15	30	-22	0
Deneysel pozisyonlar (f = 0.5 Hz)	-31	-34	-27	27	22	-4	46	-20	12	35	-30	5
Yunuslama hızı= 50 devir/dk Sapma hızı= 70 devir/dk					$\alpha_{\text{sapma}} = 45^\circ$ $\alpha_{\text{yunuslama}} = 20^\circ$					$K_n = 2$		

2 Hz frekans değerinde diğer düşük ölçümlere göre daha fazla pozisyon hatası saptanmıştır. Bu hatalar kuyruk tarafı eklemlerine doğru yığılmıştır.

1 Hz'lik ölçüm tablosuna bakıldığında hatanın yine son eklemlerde olduğu gözükmektedir.

1 Hz'lik testte olması gerekenle testte elde edilen değerlerin yüksek frekans ile birbirine yakın fakat 1 Hz'lik deneyde konum hatalarının azaldığı görülmektedir. 2 Hz ve 1 Hz

deneylerde hataların hep benzer eklemlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Diğer bir uygulamada ise frekans=0.5 Hz için 1 Hz verilerine göre konumlanmanın daha iyileştiği görülmüştür.

Eklem 11’de görülen kalıcı hata frekans düştüğünde ortaya çıkmamış olup önceden devam eden bir hatadır. Bu hata hareket gereği motor torkunun aşırı yük altındaki denge noktasını göstermektedir.

İkinci deney beton zemin üzerinde yapılmıştır. Zemin yüzü silinmiş karo taşlardan oluşmuştur. Beton zeminde robotun açısal hızları daha da düşürülerek yere değme anlarında pleksiglass malzemenin zarar görmesi engellenmeye çalışılmıştır. Diğer bir neden ise motor hızlarını artırmak robotun zeminde kayma problemini artırıcı bir etki oluşturmaktadır.

Tablo 8.2. Beton karo üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi

ORTAM = Beton(Karo)												
Eklemler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Teorik pozisyonlar	-31	34	-35	-27	-38	4	5	21	43	-34	27	27
Deneysel pozisyonlar (f= 2Hz)	-12	27	-14	-3	-39	-17	-21	20	25	-15	35	-15
Deneysel pozisyonlar (f=1Hz)	-13	28	-13	-2	-39	-12	-20	20	26	-15	35	-13
Deneysel pozisyonlar (f=0.5Hz)	-30	34	-34	-23	-39	-3	-7	19	38	-27	33	-17
Yunuslama hızı= 20 devir/dk Sapma hızı= 30 devir/dk					$\alpha_{\text{sapma}} = 45^\circ$ $\alpha_{\text{yunuslama}} = 20^\circ$					$K_n = 2$		

Beton zeminde yüksek frekansta pozisyon hatalarının oldukça fazla olduğu gözlenmiştir. PVC zemine göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip beton zeminde motor açısal hızlarının düşüklüğü pozisyona ayak uydurmada çoğunlukla geç kalındığı tablodan görülmektedir.

Frekansın 1 Hz olması konumlanma hatalarını belirgin azaltmadığı veya kuvvetlendirmede gözlenmiştir. Pozisyon değerleri olarak çoğunlukla birbiri ile örtüşmüş olup birkaç eklemde küçük iyileşmeler saptanmıştır.

Frekansın 0.5 Hz olduğu deneyde, yarı sayıda eklemde istenen pozisyonlar küçük hatalar dışında yakalandığı, diğer eklem pozisyonlarındaki hataların ise düşme eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Hataların yine kuyruk eklemlerine kaydığı görülmektedir.

Halı üzerinde yapılan denemelerde ise aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Deneyin yapıldığı halı hav yüksekliği 13 mm olarak ölçülmüştür. İlk olarak 2 Hz değerinde frekans ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 8.3. Halı üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi

ORTAM = Halı(hav yüksekliği 13 mm)												
Eklemler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Teorik pozisyonlar	-31	34	-35	-27	-38	4	5	21	43	-34	27	27
DeneySEL pozisyonlar (f= 2Hz)	-30	35	-41	-41	-42	5	7	8	8	-35	27	27
DeneySEL pozisyonlar (f=1Hz)	3	30	-35	-26	-39	4	7	20	43	-35	27	27
DeneySEL pozisyonlar (f=0.5Hz)	-31	34	-33	-25	-38	4	5	20	43	-34	27	27
Yunuslama hızı= 40 devir/dk Sapma hızı= 56 devir/dk					$\alpha_{\text{sapma}} = 45^\circ$ $\alpha_{\text{yunuslama}} = 20^\circ$					$K_n = 2$		

2 Hz sonuçları teorik ile 4 eklem dışında örtüştüğü görülmektedir. Yalnız eklem 3, 4, 8, 9 da diğer hatalara oranla daha fazla hata vardır. Bu durumu robotun halı yüzeyinin direncine bağlı konum hatası olarak açıklayabiliriz.

Frekans değeri yarıya düştüğünde hataların daha da azaldığı gözlenmektedir. Halı üzerinde halı tüylerinin neden olduğu direnç etkili bozucu girişler, istenmeyen hareket bozulmalarına neden olmaktadır. Halı üzerinde dönüşlerdeki başarının düz ortamlara göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Yapılan denemelerde yerin düz olmadığı en bozucu girişe sahip ortam çim kaplı toprak yüzeylerdir. Çim üzerinde motorların hızları diğer PVC değerlerine artırılmıştır. Motorlarda istenen pozisyonlar sağlansa bile robotun istenen yönde ve doğrultuda hareketi her daim mümkün olmamaktadır. Doğal çim zemin üzerinde yapılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tablo 8.4. Doğal çim üzerinde robota ait frekans-konum ilişkisi

ORTAM = Doğal Çim(Ortalama çim yüksekliği 11 cm)												
Eklemler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Teorik pozisyonlar	-31	34	-35	-27	-38	4	5	21	43	-34	27	27
Deneysel pozisyonlar (f= 2Hz)	-31	35	35	35	-41	3	7	20	43	-35	26	28
Deneysel pozisyonlar (f=1Hz)	22	35	-36	-26	-41	3	7	21	20	-35	26	28
Deneysel pozisyonlar (f=0.5Hz)	-31	35	-35	-26	-38	4	4	20	42	-33	26	28
Yunuslama hızı= 50 devir/dk Sapma hızı= 70 devir/dk					$\alpha_{\text{sapma}} = 45^\circ$ $\alpha_{\text{yunuslama}} = 20^\circ$					$K_n = 2$		

Yüksek frekansta istenen açıların iki eklem dışında doğru bir şekilde tutturulduğu görülmektedir. Robot yumuşak ot örtüsü üzerinde hareket ettiğinden genel itibari ile motor pozisyonlarında sıkıntı yaşanmamaktadır.

Yüksek frekanstaki başarı düşük frekansta da devam etmektedir. Eklem1 ve eklem9'da meydana gelen hatalar zeminin rastgele bozucu girişinden kaynaklanmaktadır.

0.5 Hz frekans değerinde de istenen diğer ortamlarda olduğu gibi açıların tutturulduğu görülmektedir.

Genel anlamda çok büyük farklılıklar olmasa da tablolardan da görüleceği üzere frekans arttıkça konumlanmada istenen açıların yakalanması zorlaşmaktadır. Uygulamada hareket tamamlanmadan yeni bir hareket bilgisini içeren komutlar motorlara uygulanmamıştır. Yani frekans motor hareketine engel oluşturacak seviyelerde yüksek değerlerde çalışılmamıştır. Beton zeminlerde robotun güvenliği ve hızlı hareket için

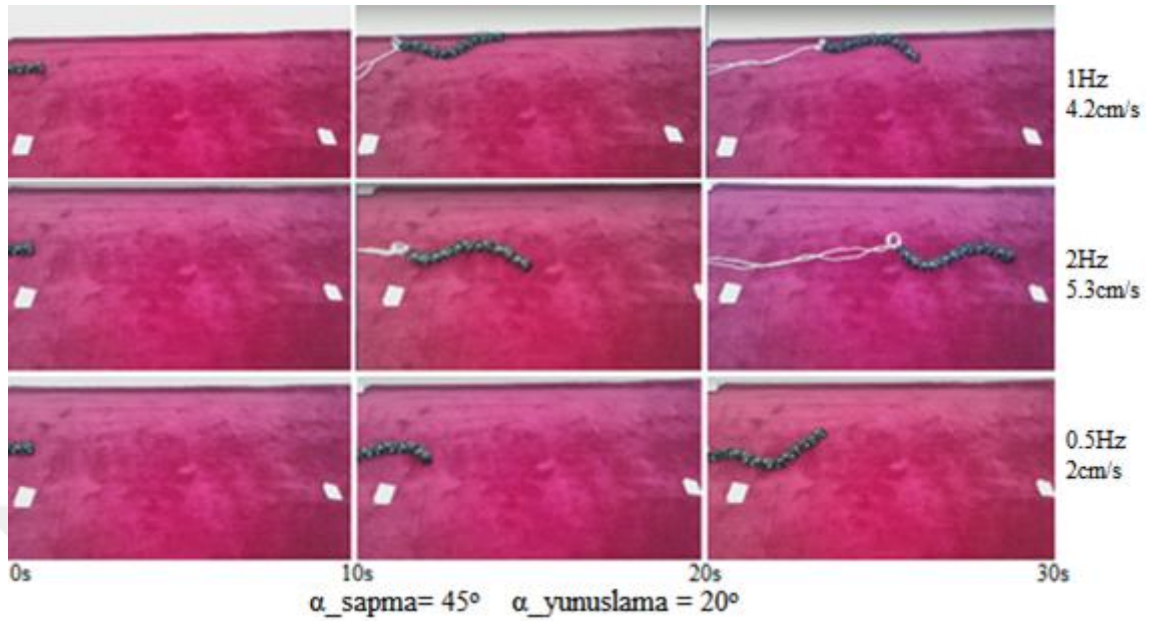
yapılan hız düşürme işlemi motorların gerilimi(Voltaj) üzerinden yapıldığından istenen pozisyona ulaşmada sıkıntılar oluşmaktadır. Özellikle çim üzerinde hızı düşürmek bozucu girişlere karşı zayıflamaya ve hatta sıfır ilerleme ve rasgele harekete neden olduğundan hızı artırmak harekete pozitif katkı yapmıştır. Özellikle PVC zemin ortamında, frekansın pozisyona etkisi daha net görülmektedir.

## 8.6. Frekans-Hız İlişkisi

Uygulamada kullanılan servo motorların açısal hızlarını RPM(dakikada dönüş hızı=devir/dakika) cinsinden belirlemek mümkündür. Uygulamada hiçbir sistem  $t_0$  anında belirli bir  $V_0$  değerinden başlayıp süre sonunda bir anda sıfır hıza ulaşır duramaz. Fakat istenen hızın kalkıştan itibaren sağlanması ve sürdürülebilmesi için servo motor içinde dahili PID kontrolör bulunmaktadır. PID denetimi kullanıcıya kapalıdır. Bozucu girişlere karşı hızdaki dalgalanmalar PID sayesinde dengeye ulaştırılmaktadır. İstenen pozisyona ulaşmak için servo motor dahili kontrol birimi Şekil 7.9'daki eğriyi kullanmaktadır.

Farklı ortamlarda genlik ve dalgalanma açıları sabit kalmak koşulu ile sırayla 100, 1000 ve 50Hz frekanslarında robotun toplam hızı aşağıdaki uygulamalarda hesaplanmıştır.

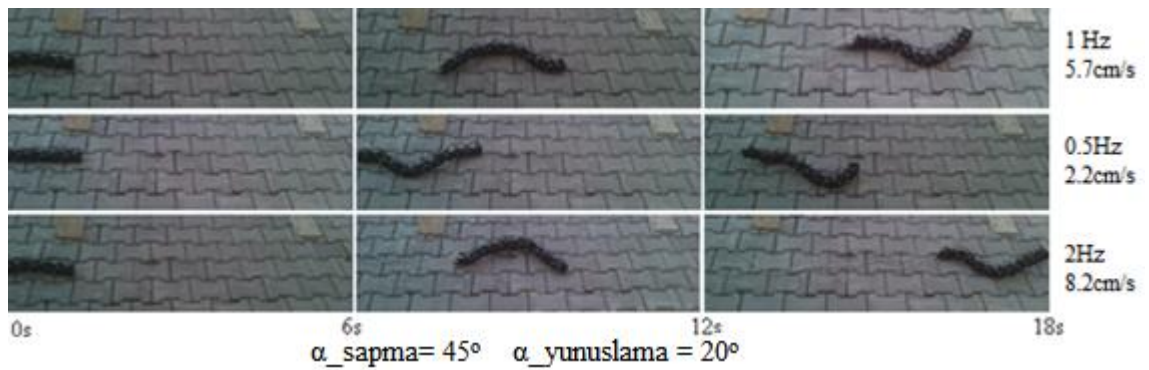
İlk deney halı üzerinde yapılmıştır. Halı üzerindeki çalışmada frekans arttıkça birim zamanda alınan yolun arttığı gözlenmiştir. Elde edilen hız, ortalama hız olup robotun yüzeyin durumuna göre hızı değişmekte bazen hızlanma bazen ise yere tutunamama gibi problemler meydana gelmektedir. Frekans değerleri sapma eksenine( $f_s$ ) göre verilmiştir. Dalgalanma açısı 45 derece olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.11. Halı üzerinde yılanı robota ait frekans hız ilişkisi

Diğer ortamlara kıyasla, robot en yavaş hareketini halı üzerinde yapmıştır. Halı üzerinde neredeyse çim zeminden daha fazla yörünge sapma problemleri ortaya çıkmıştır.

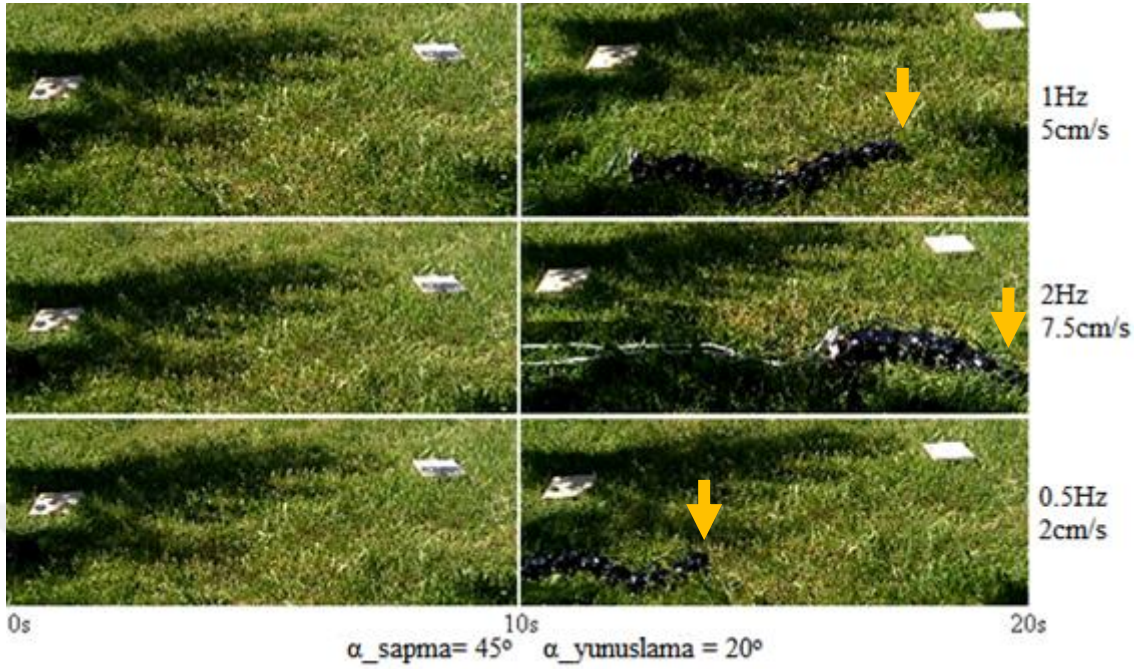
İkinci olarak kaldırım parke taş üzerinde robotun frekans hız ilişkisi incelenmiştir. Robotun en hızlı bu zeminde hareket ettiği gözlenmiştir.



Şekil 8.12. Parke taş üzerinde yılanı robota ait frekans hız ilişkisi

Robotun kayma, tutunamama gibi sorunlara en az maruz kalarak hızlı bir şekilde ilerlemesi parke taş üzerinde gerçekleşmiştir.

Son deneyde ise doğal biçilmiş çim üzerinde robotun hareketi halıdan hızlı fakat parke taş üstünden daha yavaş gerçekleşmiştir. Değerler Şekil 8.13'te gösterilmiştir.



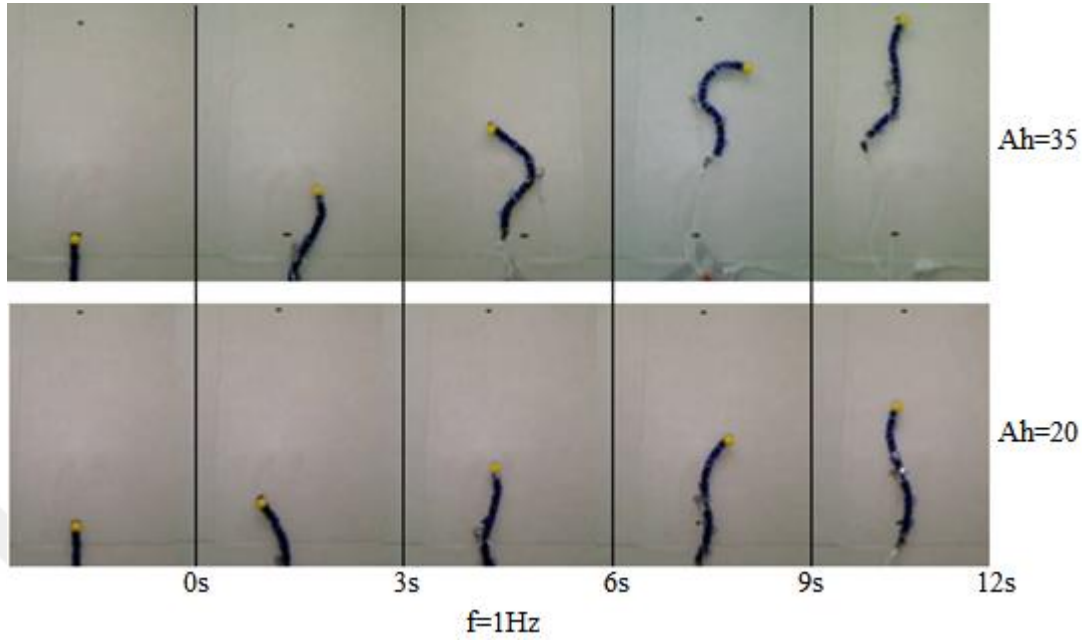
Şekil 8.13. Doğal çim üzerinde yılanı robota ait frekans hız ilişkisi

## 8.7. Akıllı Nesnelere Algoritması Uygulaması

Tez kapsamında geliştirilen akıllı nesnelere algoritması, yılanı robotlar için oldukça mümkün olan geniş alanları bulmaktadır. Çünkü yılanı robot, genliği daha büyük alanlarda daha hızlı gitmektedirler. Genliğin hıza olan etkisi Denklem 8.1’de görüldüğü üzere yataydaki Ah dalgalanma açısı değerinin robotun hızına etkisi aşikârdır. Ah açısı değeri arttıkça robotun hızı da artmaktadır.

### 8.7.1. Genlik ve Hız İlişkisi

Robotun farklı genliklerde sürülmesi ile oluşan hız farkı uygulamada da görülmüştür. Bu noktadan hareketle, tez çalışmasında yılanı robotlar için hareket planlama algoritması geliştirilmiştir. Hız farklılıklarının tespiti için, tepe kamera altında yapılan denemelere ait video görüntüleri karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir. S sayısını gösteren  $K_n$  değerleri tüm hareketler için 1 değerinde alınmıştır. Deneylerde her iki harekete denemelerde, motorların tahrik frekansları ve açısal hızları ise eşit değerlerde belirlenmiştir.

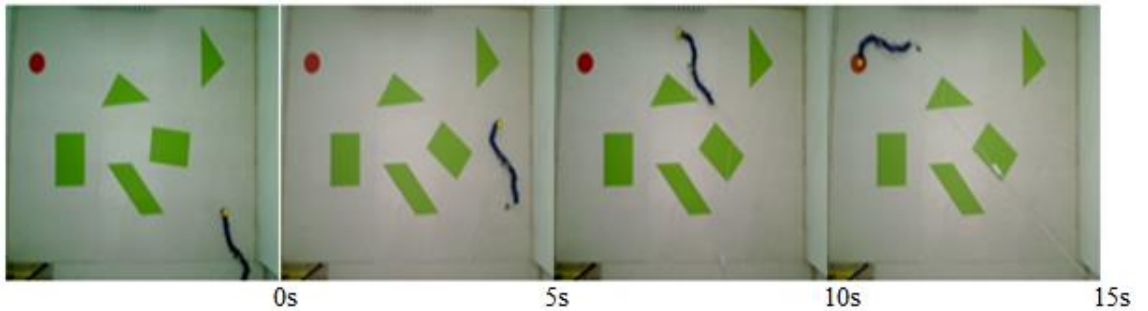


Şekil 8.14. Hız-genlik ilişkisine ait uygulama

Ah=35 değeri için seçilen motor tahrik frekans değerlerinde ortalama hız 0.125m/s iken Ah=20 derecede ise 0,075 m/s olarak gerçekleşmiştir. Değerlerden de görüleceği üzere genliği büyük hareket daha hızlı gerçekleşmiştir.

### 8.7.2. Engelli Ortamda Hareket

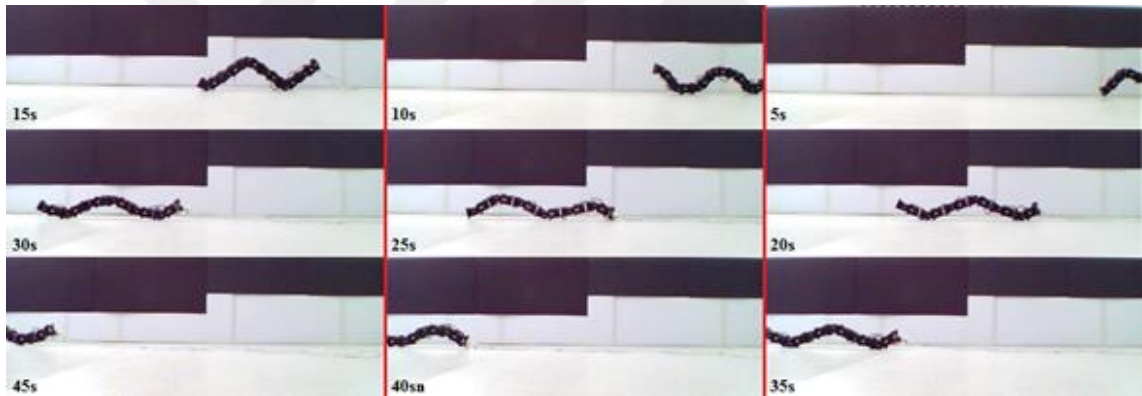
Engelli ortamda yapılan çalışmada Şekil 8.6'daki engelli ortam kullanılmıştır. Belirlenen yol OH parametresi yardımıyla manuel müdahale gerekmeden yaptırılmıştır. Yunuslama ve sapma eksenlerin kullanıldığı hareket biçiminde engellere değmeden robotun hareketi sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 8.15. Engelli ortamda robot hareketi(f=1Hz)

Robot hareketi için planlanan yörünge uzunluğu yaklaşık olarak 2.55cm uzunluğuna sahip ve Şekil. 8.8'deki kesikli hattın uzunluğu ise 2.1m dir. Robot sabit genlikte 25 saniyede belirlenen yolu almıştır. Robotun motor millerindeki açısal hız ve tahrik frekansı arttıkça yerdeki tutunma süresi azaldığından robot istenen hareketleri yapmakta zorlandığı ve sebepsiz kaydığı görülmüştür. Hareket planlayıcı uygulamanın bu durumda doğrultusu değişen robotun uygun yönlenmeye gelmesi için gerekli prosedürleri koşturduğu ve bununda gereksiz zaman kayıplarına yol açtığı saptanmıştır.

Doğrusal sadece yunuslama ekseninin kullanıldığı hareketin engelleri, düşey olarak beyaz zemin üzerine asılmıştır. Kamera ise yandan görüntü alarak bilgisayara aktarmaktadır. Geniş alanlarda büyük genlik, dar alanlarda düşük genlik kullanılarak çok boyutlu akıllı nesnelere uygulaması takip edilmiştir.



Şekil 8.16. Doğrusal hıza ait engelden sakınma algoritması zaman diyagramı

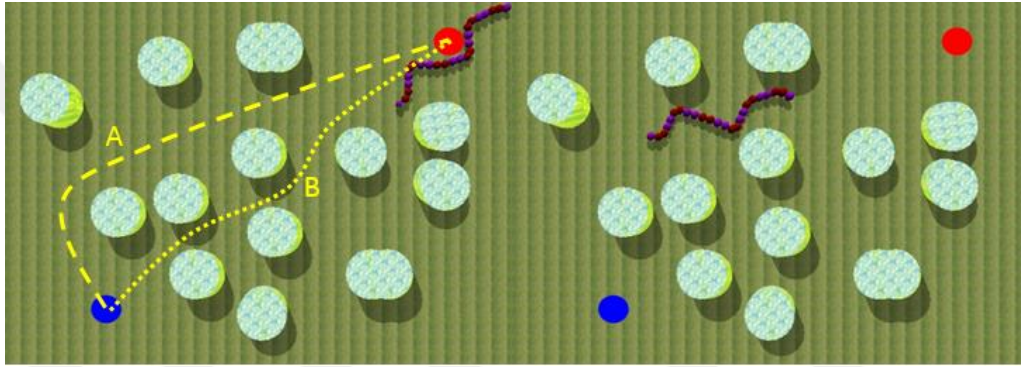
Robot yüksek engelleri yüksek genlikle alçak engelleri ise düşük genlikle almıştır. Hareket platformunun uzunluğu 3m olup engeller yarı mesafede değişmektedir.

Her iki yunuslama- yunuslama ve yunuslama-sapma uygulamalarında da kameradan kaynaklı projeksiyon hataları tesbit edilmiş ve bu hatalar dikkate alınmamıştır.

### 8.7.3. Bilgisayar Benzetimi

Bilgisayar benzetimi, ODE(Open Dynamic Environment) ile gerçekleştirilmiştir. ODE, OpenGL tabanlı bir katı cisim dinamiği yazılım kütüphanesidir. ODE yazılımı karmaşık eklemlili yapıların hızlı simülasyonlarına imkan verir[83].

Aşağıdaki Şekil 8.17’de görüldüğü üzere engelli ortamda belirlenen tekli ve çoklu boyutlu akıllı nesnelere algoritması ile oluşturulan yollarda yılanı robotun farklı ve sabit genlikteki hareketi üzerine çalışılmıştır. Yüksek genliğe ve dolayısı ile hıza imkan veren yol planlaması Şekil 8.17’de solda A harfi ile etiketlenerek gösterilmiştir. Algoritmada nesne boyutları sırayla 115, 85, 70 ve 40cm olarak seçilmiştir. A yolunda kullanılan nesne boyutları sırayla 115cm, 85cm, 70cm olurken B yolunda kullanılan 115cm, 70cm ve 40cm olarak belirlenmiştir. Küçük kesikli çizgiler dar genliğe sahip bir S hareketine imkan sağladığından daha küçük hıza sahip bir harekete neden olmaktadır.



Şekil 8.17. Simülasyon çalışması ve belirlenen yollar.

Simülasyonda robotun hız, mesafe, zaman parametreleri her iki yol için aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu parametrelerden hız ve süre, servo motorların tahrik aralığına göre değişim arz etmektedirler. Simülasyonda her iki yol için servo motor tahrik zaman aralığı eşit şekilde uygulanmıştır.

Aşağıda verilede A ve B yolunu almadaki ortalama hız ile geçen toplam süre arasındaki oran farkı dönüşlerdeki zaman kaybıdır.

Tablo 8.5. Simülasyona ait parametreler.

Büyüklikler	A Yolu	B Yolu
Mesafe	7.5 m	6.1 m
Ort. robot hızı(m/s)	0.260	0.158
Mesafeyi alma süresi(s)	31.5	39.12
Ort. Genlik(m)	0.88	0.55

Yılınsı robotun gerçek ortamında ve bilgisayar benzetiminde koşturulması ile akıllı nesnelere algoritmasını doğrulayan sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Fakat gerçek uygulama ile bilgisayar benzetimi arasında aynı parametrelerdeki yılınsı robot hareketleri için aynı sonuçlar ortaya çıkmamakta olup özellikle gerçek ortamda yörünge sapmaları ve hız kayıpları yaşanabilmektedir. Bunun olası nedenleri;

- Bilgisayar benzetimindeki yüzeyin tam düz olması, buna karşın gerçek ortamın milimetre seviyelerde olsa da engebeli olması.
- Bilgisayar benzetimindeki yüzeyin tam anlamıyla gerçek mineflo yüzeyi yansıtmaması.
- Gerçek ortamda mikro boyutlarda pürüzlerin olması.
- Yılınsı robotun motor millerindeki mikro boşluklar
- Kasa yapımında kullanılan malzemenin gerek hareket esnasında ve zamanla esnemesi olabilir.

## 9. BÖLÜM

### TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezin ilk evre çalışmalarında, yılanı hareketi etkileyen parametrelerin iyileştirilmesine yönelik optimizasyon veya yapay zeka tekniklerinin kullanılmasına yoğunlaşılmıştır. Fakat kısıtlı genliklerde, robotu en hızlı ve en kısa sürede istenen hedefe yönlendirmek mümkün gözükmedi. Bu yüzden yeni bir arayış içerisinde yılanı robot hareketini iyileştirmek için farklı çalışmalar yapılmıştır. Yılanı robot hareketinin önemli parametrelerinden birisi olan hareket genliği, hareket optimizasyonunun ilk adımı olacağı varsayılarak tez çalışmasında yılanı robotlar için yeni bir hareket planlama çalışması geliştirilmiştir.

Literatürdeki diğer yöntemlerin, yılanı robotların hızlı ve etkin bir şekilde seyahatleri için büyük genliğe imkan verebilecek alanları bulmada yetersiz kaldıkları görülmüştür. Tez kapsamında geliştirilen akıllı nesnel algoritmasının ise özellikle hareket planlama literatüründeki diğer yöntemlere göre sadece yörüngeyi değil bunun yanında yılanı robotlar için gerekli geniş alanları da bulduğu görülmektedir. Hareket planlama sonrası oluşturulan yörünge her bir noktasının ne kadar geniş olduğu belirlenerek, bu noktalar üzerinde yılanı robotun uygun genlikte hareketinin, sabit genliğe göre daha kısa süre aldığı görülmüştür.

Literatürdeki hareket planlama teknikleri matematiksel en kısa yolu, robotların en hızlı ve kısa sürede alacağını öngörmektedir. Oysaki yılanı robotlar en hızlı hareketi, geniş

alanlarda yapabilmektedir. Akıllı nesnelere algoritması yılanlı robotlar için geniş alanları bulabilmekte ve bunu hareket planlamanın bir parçası olarak kullanabilmektedir.

Akıllı nesnelere algoritması, robotun boyutlarının hesaba katıldığı serbest yapılandırma alanının hesaplanmasına gerek kalmadan doğrudan hareket planlama yapabilmektedir. Literatürdeki diğer yöntemler, serbest yapılandırma alanının bulunmasını zorunlu kılmaktadır.

Hareket planlamada nesnelere sayısının belirlenebilmesi ve ortama yerleştirilme biçimi literatürdeki diğer yöntemlere göre daha planlı gerçekleştirilmektedir. Bu sayede en kısa mesafe, daha az sayıda düğümlerin hesaba katılması ile bulunmaktadır. Hatta algoritma robotun sığamayacağı boşlukları otomatik olarak hesap dışı bırakmaktadır.

Geliştirilen algoritmanın sadece yılanlı robotlar için değil, diğer çalışmalar içinde farklı ufukların açılmasına sebep olacağı görülmüştür. Örneğin her robot için güvenli yolu, veya sürtünme katsayısı farklı ortamlarda en hızlı mesafeyi bulmada yine literatürdeki diğer yöntemlere göre oldukça avantajlıdır. Ayrıca bu yöntem diğer yöntemlerle birleştirilerek farklı çalışma konularında avantajlarını ortaya çıkarabilecek özgünlüktedir.

Bahsedilen avantajlar yılanlı robotlar için akıllı nesnelere algoritmasının mutlaka hareket planlama çalışmalarında kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen algoritma ile özellikle mobil robotlar için çoklu hareket parametrelerine(güvenlik, kısıtlar, sürtünme katsayısı, mecburi güzergah...) sahip hareket planlamalar yapmak mümkün olacağı gözükmektedir.

Yılanlı robot tasarımında yılanlı hareketlerin gerçeğe yakın olması için motorların tork kontrollü ve oldukça hafif olması gerektiği saptanmıştır.

Robotun hareketi sırasında kaymaları önlemek için hızın düşürülmesi ve S lokomasyonunun olabildiğince hızlı bir frekansta(12 eklemlili bir robot için en uygun değer yaklaşık 100 hertz) ardışık olarak devamlı icra edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Aksi halde kesikli hareketlerin S hareket bileşenlerinin ilerlemeye katkısının kısıtlı kaldığı gözlenmiştir. Bu sebeple motorlarda akım artışı ve zorlanmalar tespit edilmiştir. Akım artışını karşılamada kaynak yetersiz kalırsa motorlarda pozisyon

kayıpları, hatta dahili koruma alarmları(aşırı ısınma, aşırı yük, düşük voltaj, pozisyon hataları) devreye girmektedir.

Robot eklem sayısının artması robotun hareket kabiliyetini ve ortama nüfusunu artırmakta fakat toplam ağırlık arttığından güç gereksinimi ve motorlardan çekilecek tork miktarı da bununla birlikte artmaktadır. Bu sebeple eklem sayısının robotun icra edebileceği esnekliğe göre değil, icra edilecek göreve göre belirlenmesinin isabetli olacağı saptanmıştır.

Gerçek zamanlı engelden uzak yol belirlemede, ortamın ışık şiddetinin platformdaki nesnelerin renklerinin eşik değer yöntemi ile segmentasyonu sırasında ortaya çıkmasına yetebilecek değerde olması gerektiği saptanmıştır.

Yatay düzlemde ayrılmayı ifade eden OH parametresi robotun daha çok geniş alanda yön değişmesine yardımcı olabilmektedir. Ayrıca robot hareket yüzeyinin yanal hareketlerde direnç oluşturması ile bozucu girişler yörünge değişim hareketini negatif etkilemektedir. Robotun pozisyon sınırlarını aşan keskin dönüşler yapması zaten yapısı gereği mümkün değildir. OH parametresi ile keskin dönüş ise mümkün değildir. Bu durum kaçınılmaz hatalara neden olmaktadır. Bu nedenle robotun engellere çarpması veya yol dışına çıkması muhtemeldir. Literatür kısmında geçtiği üzere robotun hareket kısıtları olup sonsuz çözünürlükte hareket kabiliyetine sahip değildir.

Robotun keskin dönüşler yapabilmesi doğrusal ilerlemesini sıfır yapıp kendi etrafında dönmesi ile mümkündür. Bu durumun neden olduğu ortalama hız kaybı en kısa mesafeyi belirlerken göz önüne alınması gerekmektedir. Robotun kendi etrafında dönmesi dalgalanma açılarına, frekansa, yerin sürtünme katsayısına, yüzeyin pürüzüne ve S dalga sayısına bağlıdır. Dolayısı ile hassas bir zamanlama yapmak zor gözükmektedir.

## KAYNAKÇALAR

- 1- Kyriakopoulos K. J., Migadis G. ve Sarrigeorgidis K., 1999. The NTUA Snake: design planar kinematics, and motion planning. **Journal of Robotic Systems**, Vol 16, Iss 1, pp. 37-72.
- 2- Oleg Shmakov, 2006. Snakelike robots locomotion's control, **Mechatronics Foundations And Applications**.
- 3- Zefran, M., 1996. Continious Methods For Motion Planning. University of Pennsylvania, PhD Thesis, 161s.
- 4- Aydın S., Temeltaş H., 2004. Mobil robotlarda diferansiyel evrim ile optimal yörünge planlama, **İTÜ Dergisi**, Cilt 3 Sayı 1, pp. 43-54.
- 5- E. Çağlav, 2006. A Snake-Like Robot For Searching, Cleaning Passages From Debris And Dragging Victims, METU Fen Bilimleri Enstitüsü Y.L. Tezi.
- 6- J. G. Gomez, 2008. "Modular Robotics an Locomotion: Application to Limbless Robots", Universidad Autonoma de Madrid, PhD Thesis.
- 7- G. Endo, K. Togawa, and S. Hirose, 1999. Study on self-contained and terrain adaptive active cord mechanism. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 1399–1405.
- 8- K. Togawa, M. Mori, and S. Hirose, 2000. Study on three-dimensional active cord mechanism: development of ACM-R2. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pages 2242–2247.
- 9- M. Mori and S. Hirose, 2001. Development of active cord mechanism ACM-R3 with agile 3D mobility. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 1552–1557.
- 10- M. Mori and S. Hirose, 2002. Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3. *IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent Robots and Systems*, pp. 829–834.

- 11- H. Yamada and S. Hirose, 2006. Development of practical 3-dimensional active cord mechanism ACM-R4. **Robotics and Mechatronics**, 18(3).
- 12- H. Yamada, S. Chigisaki, and M. Mori, 2005. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5. *36th Int. Symposium on Robotics*.
- 13- S. Ma, H. Araya, and L. Li., 2001. Development of a creeping snake-like robot. *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 77– 82.
- 14- S.Ma, W.J. Li, and Y.Wang, 2001. A simulator to analyze creeping locomotion of a snake-like robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pp. 3656– 3661.
- 15- S. Ma and N. Tadokoro, 2006. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot on a slope. **Autonomous Robots**, 20(1):15–23.
- 16- S. Ma and Y. Ohmameuda, 2003. Control of a 3-Dimensional snake-like robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pp. 2067– 2072.
- 17- K. Dowling, 1997. Limbless locomotion: Learning to Crawl With a Snake Robot. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, PhD thesis.
- 18- E. Shamma, A. Wolf, and H. Choset, 2005. Three degrees-of-freedom joint for spatial hyperredundant robots. **Journal of Mechanism and Machine Theory**, pp. 170 – 190.
- 19- H. Choset, 2001. Coverage for robotics-A survey of recent results. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, 31:113 – 126.
- 20- H. Choset and W. Henning, 1999. A follow-the-leader approach to serpentine robot motion planning. **In ASCE Journal of Aerospace Engineering**.
- 21- A. Crespi, A. Badertscher, A. Guignard, and A. J. Ijspeert, 2004. An amphibious robot capable of snake and lamprey-like locomotion. *The 35th international symposium on robotics*.

- 22- P.G Miller, 2002. Snake Robots For Search And Rescue. In *Neurotechnology For Biomimetic Robots*, MIT Press, pp. 271–284.
- 23- J. Conradt and P. Varshavskaya, 2003. Distributed central pattern generator control for a serpentine robot. *International Conference on Artificial Neural Networks and Neural Information Processing*.
- 24- J.K. Hopkins, B.W. Spranklin, and S.K. Gupta, 2009. A Survey of snake-inspired robot designs. **Bionispiration and Biomimetics**, 4(2):021001.
- 25- Raymond L Ditmars, 1943. *Snakes of the World*, p 16.
- 26- Harvey B. Lillywhite, 2014. *How Snakes Work Structure, Function And Behavior Of The World's Snakes*, Oxford Press.
- 27- C.Gans, 1970. How snakes move, **Scientific American**, vol 222, pp. 82-96.
- 28- Raisuddin Khan, M., Raisuddin Khan, M. Watanabe and A.A. Shafie, 2010. Kinematics model of snake robot considering snake scale, **American Journal of Applied Sciences** 7 (5): pp: 669-674.
- 29- Chen, L., Y. Wang, S. Ma and B. Li, 2004. Studies on lateral rolling locomotion of a snake robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 226-May 1, pp: 5070-5074.
- 30- J. Gray, 1946. The mechanism of locomotion in snakes. **Journal of Experimental Biology**, No.2.
- 31- A. A. Transeth and et al., 2008. Snake robot obstacle-aided locomotion: modeling, simulations, and experiments, **IEEE Transactions on Robotics**, Vol. 24, No: 1.
- 32- Pål Liljebäck, Kristin Y. Pettersen, Øyvind Stavdahl, Jan Tommy Gravdahl, 2013. *Snake Robots; Modelling, Mechatronics, and Control*, Springer-Verlag.
- 33- Hirose, S., Y., 1976. Umetani, Kinematic control of active cord mechanism with tactile sensors. *The 2nd RoMAnSy Symposium*, Warsaw, pp: 241-252.

- 34- S. Gray, 1968. "Animal locomotion," pp. 166–193.
- 35- Alexander Gmitterko, Ivan Virgala, Erik Prada, 2011. Snake-like robot rectilinear motion modeling with different kinds of friction models. *4. Modelling of mechanical and mechatronic systems conference*.
- 36- Alireza Akbarzadeh et al., 2011. Generating snake robot concertina locomotion using a new dynamic curve, **International Journal of Modeling and Optimization**, Vol. 1, No. 2.
- 37- M. Walton, B.C. Jayne, and A.F. Bennett, 1990. The energetic cost of limbless locomotion, **Science**, vol. 249, no. 4968, p. 524.
- 38- Yansong Shan ve Yoram Koren, 1993. Design and motion planning of a mechanical snake, **IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics**, vol. 23, no.4.
- 39- S.Sarrafan, A. Akbarzadeh, S. Molavipoor, M. Arhami, 2011. Kinematics and motion analysis of a three-dimensional sidewinding snake-like robot, *National Conference on Mechanical Engineering*.
- 40- M. Park, S. Chitta, A. Teichman, and M. Yim, 2008. Automatic configuration recognition methods in modular robots. **The International Journal of Robotics Research**, 27(3–4):403–421.
- 41- Alessandro CRESPI, 2007. Design and Control of Amphibious Robots With Multiple Degrees of Freedom, PhD Thesis, EPFL University.
- 42- Hadi Kalani, Alireza Akbarzadeh, 2011. "Effect of friction models on snake robot performance", **International Journal of Modeling and Optimization**, Vol. 1, No. 2.
- 43 - Wu X., Ma S., 2010. CPG based control of serpentine locomotion of a snake-like robot. **Elsevier Mechatronics**, pp: 326-334.
- 44- N. Mohamad Nor, 2014. CPG-based locomotion control of a snake-like robot, **Graduate School of Science And Engineering of the Ritsumeikan University**. p: 14.
- 45- Bingül Z, Küçük S, 2009. Robot kinematiği, Birsen Yayınevi.

- 46- Pål Liljebäck, Kristin Y. Pettersen, Øyvind Stavadahl, ve Jan Tommy Gravdahl, 2014. A 3D motion planning framework for snake robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1100–1107.
- 47- Akbarzadeh A, Kalani H, 2012. Design and modelling of a snake robot based on worm-like locomotion, **Advanced Robotics**, 26 : 5–6, 537–560.
- 48- Bingül Z, Küçük S, 2008. Robot Dinamiği ve Kontrolü, Birsen Yayınevi.
- 49- J.C. Latombe, 1991. Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers.
- 50- Jaradat M. A., Garibeh M. H., Feilat E. A., 2012. “Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field” **Springer-Verlag Soft Comput**, 16:153–164.
- 51- Steven M. LaValle, 2006. Planning Algorithms, Cambridge University Press.
- 52- B. R. Donald, P. G. Xavier, J. Canny, ve J. Reif, 1993. Kinodynamic planning. **Journal of the ACM**, 40. 1048-66.
- 53- Howie Choset, 2005. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation, The MIT Press.
- 54- Lozano Perez T. ve Wesley M.A., 1979. An algorithm for planning collision free paths among polyhedral obstacles, comm. **Journal of the ACM** 22(10): 560-570.
- 55- J.C. Latombe, 1999. Motion Planning: A journey of robots molecules digital actors and other artifacts, **The International Journal of Robotics Research**, 30: 846-894.
- 56- Voronoi G., 1908. "Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques". **Journal für die Reine und Angewandte Mathematik**, 133: 97–178.
- 57- F. Aurenhammer, 1991. “Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure”, **ACM Comput. Surv.**, vol. 23, no. 3, pp. 345–405.

- 58- O.Khatib, 1986. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, **The International Journal of Robotics Research**, Vol. 5, No. 1.
- 59- Ge S.S. ve Cui Y.J., 2000. "New potential functions for mobile robot path planning," **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v.16 (5), pp.615-620.
- 60- B. Chazelle, 1987. Approximation and decomposition of shapes, **Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics**, pages 145–185.
- 61- Kavraki, L. E., P. Svestka, J-C. Latombe, ve M. Overmars, 1996. "Probabilistic roadmaps for planning in high dimensional configuration spaces", **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, vol. 12, issue 4, no. 4, pp. 566-580.
- 62- S. M. LaValle ve J. J. Kuffner, 1999. Randomized kinodynamic planning., *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 473--479.
- 63- The Java Tutorials, What is an object, 2015. (Web sayfası: <http://docs.oracle.com/javase/tutorial/java/concepts/object.html>), (Erişim tarihi: Haziran 2016).
- 64- Kindler, E.; Krivy, I., 2011. "Object-oriented simulation of systems with sophisticated control". **International Journal of General Systems**. pp. 313–343.
- 65- Lewis, John; Loftus, William, 2008. Java Software Solutions Foundations of Programming Design. Pearson Education Inc. "Object-Oriented Programming".
- 66- Object – Oriented Programming (C# ve Visual Basic), 2015. (Web sayfası: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd460654.aspx>), (Erişim tarihi : Haziran. 2016).
- 67- Mostafa K. Ardakani, Madjid Tavana, 2015. A decremental approach with the A\* algorithm for speeding-up the optimization process in dynamic shortest path problems, **Measurement Journal**. 60 299–307.
- 68- Yıldırım Ş., Yaşar E., 2015. Development of an obstacle-avoidance algorithm for snake like robots, **Measurement Journal**, 73 pp. 68-73.

- 69- Yıldırım Ş., Yaşar E., 2015. An Algorithm of avoiding obstacles with intelligent objects. **Recent Innovations in Mechatronics(RIiM)** Vol 2. No 1–2.
- 70- Yıldırım Ş., Yaşar E., 2015. Yeni Bir Akıllı Nesnelere Algoritması İle Yıllans Robotlarda Yörünge Analizi, *Uluslararası Katılımlı 17. Makina. Teorisi Sempozyumu, İzmir.*
- 71- Shengyong Chen and et al., 2012. Gait, Stability and Movement of Snake-Like Robots. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, Vol. 9, 214.
- 72- Papatya zinciri, 2015. ( Web sayfası: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Papatya\\_zinciri](https://tr.wikipedia.org/wiki/Papatya_zinciri)), (Erişim tarihi: Haziran 2016).
- 73- "TWIN Kaynağı Etkinleştirilemedi" veya "Tarayıcı Bulunamadı" Hata İletisi Görüntüleniyor, 2015. (Web sayfası: <https://support.microsoft.com/tr-tr/kb/300944>), (Erişim tarihi: Haziran 2016).
- 74- Craig A. Lindley, 1991. Practical Image Processing in C: Acquisition, Manipulation, Storage, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- 75- RUSS J.C., 1999. The Image Processing Handbook. CRC Press and IEEE Press. USA.
- 76- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 1992. Digital Image Processing, Addison-Wesley, Reading, MA.
- 77- Efford N., 2000. Digital Image Processing. Addison-Wesley, USA.
- 78- Ritter G.X., Wilson J. N., 1996. Hand Book Of Computer Vision Algorithms In Image Algebra. Crc Press. USA.
- 79- K. Y. Pettersen and et al., 2013. Snake robots from biology to nonlinear control, *9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems Toulouse, France.*
- 80- Rezapour and et al., 2014. Path following control of planar snake robots using virtual holonomic constraints: theory and experiments. **Robotics and Biomimetics.**

81- Blessy Mariam Markose, Harshitha Loke, 2014. Intelligent vision based snake robot. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, Vol: 03.

82- PID Kontrolü, 2009. MEGEP, Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri, Ankara.

83- P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, Ø. Stavdahl, J. T. Gravdahl, 2014 "A 3D Motion planning framework for snake robots", *Intelligent Robots and Systems IEEE/RSJ International Conference (IROS)*.



## EKLER

### **EK 1. Servo Motorlara Ait Parametreler.**

Ek-1 Tablo 1. Dynamixel RX-24F serisi motorların RAM ve EEPROM bilgileri.

<b>Ad</b>	<b>Adı</b>	<b>Tanım</b>	<b>Erişim</b>
0	Model No(L)	Motor model nosunun düşük baytları	R
1	Model No(H)	Motor model nosunun yüksek baytları	R
2	Yazılım sürümü	Motor yazılım sürümü	R
3	Motor no	Tekil motor numarası	RW
4	İletim hızı	Motor iletim hızı	RW
5	Gecikme süresi	İletilen komuttan sonar durum paketi alınana kadar geçen süre	RW
6	CW Açı sınırı(L)	Saat yönü sınır açısının düşük baytları	RW
7	CW Açı sınırı(H)	Saat yönü sınır açısının yüksek baytları	RW
8	CCW Açı sınırı(L)	Saat tersi yönü sınır açısının düşük baytları	RW
9	CCW Açı sınırı(H)	Saat tersi yönü sınır açısının yüksek baytları	RW
11	Mak. sıcaklık sınırı	Dahili sıcaklık sınırı	RW
12	Düşük voltaj sınırı	En düşük voltaj sınırı	RW
13	Yüksek voltaj sınırı	En yüksek voltaj sınırı	RW
14	En yüksek tork(L)	Maksimum torkun düşük baytları	RW
15	En yüksek tork(H)	Maksimum torkun yüksek baytları	RW
16	Durum paketi seviyesi	Durum paketi seviyesi	RW
17	Alarm göstergesi	Uyarı amaçlı LED aktif/pasif	RW
18	Alarm kapatma	Alarm verdiğinde kapat	RW

24	Tork kontrol aktif	Tork kontrol aktif/pasif	RW
25	LED aktif	LED aktif/pasif	RW
26	CW Hata aralığı	Saat yönünde hata aralığı	RW
27	CCW Hata aralığı	Saat tersi yönünde hata aralığı	RW
28	CW Tork düşümü	Saat yönünde tork düşüm aralığı	RW
29	CCW Tork düşümü	Saat tersi yönünde tork düşüm aralığı	RW
30	Hedef Pozisyon(L)	Hedef pozisyonun düşük baytları	RW
31	Hedef Pozisyon(M)	Hedef pozisyonun yüksek baytları	RW
32	Hareket hızı(L)	Hareket hızının düşük baytları	RW
33	Hareket hızı(M)	Hareket hızının yüksek baytları	RW
34	Tork sınırı(L)	Tork sınırının düşük baytları	RW
35	Tork sınırı(M)	Tork sınırının yüksek baytları	RW
36	Anlık pozisyon(L)	Anlık pozisyonun düşük baytları	R
37	Anlık pozisyon(M)	Anlık pozisyonun yüksek baytları	R
38	Anlık hız(L)	Anlık hızın düşük baytları	R
39	Anlık hız(M)	Anlık hızın yüksek baytları	R
40	Anlık Yük(L)	Anlık yükün düşük baytları	R
41	Anlık Yük(M)	Anlık yükün yüksek baytları	R
42	Anlık voltaj	Anlık gerilim	R
43	Anlık sıcaklık	Anlık sıcaklık	R
44	Kayıtlı	Komut kayıtlı	R
46	Hareketli	Hareketli/hareketsiz	R
47	Kilit aktif	EEPROM hafıza kilidi	RW

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Ebubekir YAŞAR  
 Uyuğu : Türkiye (TC)  
 Doğum Tarihi ve Yeri : 09.07.1977, Sivas  
 Medeni Durumu : Evli  
 Tel : +90 541 606 70 58  
 E-mail : ebubekir.yasar@gop.edu.tr  
 Yazışma Adresi : Güneşli Mah. Turhal M.Y.O. Turhal/TOKAT

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	GOPÜ Tarım Makinaları ABD	2007
Lisans	EÜ Kontrol ve Bilgisayar Müh.	2002

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2002- Halen	Gaziosmanpaşa Üniversitesi Turhal Meslek Yüksekokulu	Öğr. Gör.

### YABANCI DİL

İngilizce

### YAYINLAR

#### Kitaplar

1. **Algoritma ve Delphi** 2005, 492 Sayfa, ISBN: 975-8768-64-6 Ekin Yayınevi 2005.
2. **WEB Teknikleri**, ISBN: 975-8768-96-4 Ekin Yayınevi 2006.
3. **A'dan Z'ye Bilgisayar Donanımı**, DVD eki Ağustos 2008 Chip Dergisi.
4. **Algoritma ve Programlamaya Giriş**, ISBN: 978-605-5937-51-5 Murathan Yayınevi 2009.

5. **İnternet Programcılığı I**, ISBN: 978-605-5937-52-2 Murathan Yayınevi 2009.
6. **İnternet Programcılığı II**, ISBN: 978-605-5937-68-3 Murathan Yayınevi 2010.
7. **Bilgisayar Donanımı**, ISBN: 978-605-5451-02-8 Murathan Yayınevi 2011.
8. **Mikrodenetleyiciler ve Uyg.** ISBN:978-605-5451-72-1 Murathan Yayınevi 2012.

### **Makaleler**

- Şahin YILDIRIM, Ebubekir YAŞAR, Development of an obstacle-avoidance algorithm for snake like robots, Measurement Journal, 68-73, 2015.

### **Projeler**

- AB destekli Turhal'da Etkin İnsan Kaynakları Yönetimi ile İşsizlikle Mücadele Projesi kapsamında bilgisayar eğitmeni ve web sorumlusu
- Tübitak destekli Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Güneş Enerjili Araç Projesinde (TOGATA) Araştırmacı.

### **Sempozyumlar**

- Şahin YILDIRIM, Ebubekir YAŞAR, An Algorithm of avoiding obstacles with intelligent objects. Recent Innovations in Mechatronics(RIİM) Vol 2. No 1-2, 2015.
- Yıldırım Ş, Yaşar E, Yeni Bir Akıllı Nesnelere Algoritması İle Yılanlı Robotlarda Yörünge Analizi, 17. Makina Teorisi Sempozyumu İzmir, 2015.
- Metin SEZER, Oğuz TEKELİOĞLU, Musa YAVUZ, Ebubekir YAŞAR, Japon Bildiricilerinde Yumurta Kabuk Renginin Görüntü İşleme Tekniği ile Ölçümü. Ulusal Zootekni Bilim Kongresi, 2007.
- Musa YAVUZ, Metin SEZER, Ebubekir YAŞAR, Meraylı Kaplayan Bitki Örtüsü Oranının Fotoğraflama Tekniği ile Ölçümü. Ulusal Zootekni Bilim Kongresi, 2007.