İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILAN TİPİ HAREKET MEKANİZMASI VE HAREKET KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Atilla KILIÇARSLAN

(503021602)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Sistem Dinamiği ve Kontrol

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet KUZUCU

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca, yalnızca karşılaştığım problemlerin çözümü konusunda bana aydınlatıcı bilgiler verdiği için değil, aynı zamanda irdelediğimiz konularda daima bir adım ötesini görebilmemi sağladığı için Sayın Hocam Prof. Dr. Ahmet KUZUCU' ya sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalıştığım konun temellerini atan ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Z.Yağız BAYRAKTAROĞLU' ya da içten teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK-MAG gurubuna projeye verdikleri destekten ötürü samimi teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma MAG-PIA-1 numaralı (uluslararası) ve MAG-277 numaralı (ulusal) TÜBİTAK araştırma projeleri ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'ın finansal desteğinden sonra, bu çalışma hız kazanarak devam etmiştir.

Bana her konuda daima destek olan annem Azmiye KILIÇARSLAN ve babam Ömer KILIÇARSLAN' a sonsuz sevgilerimi sunarım.

Son olarak ta benden desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Erdal GENÇ' e, Arş. Gör. İ. İlker DELİCE' ye, H.İlker ÇARDAKLI' ya, Özkan ÇELİK' e, Kılıç F. ÖZEN' e ve Hüseyin ÇABUK' a içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2005 Atilla KILIÇARSLAN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ v

ŞEKİL LİSTESİ vi

SEMBOL LİSTESİ viii

ÖZET ix

SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1
1.1. Neden Yılan Tipi Robotlar 1
1.2. Kullanım Alanları 2
1.2.1. Gözlem ve Keşif 3
1.2.2. Arama Kurtarma 3
1.2.3. Tıbbi Uygulamalar 3
1.2.4. Askeri Uygulamalar 3
1.2.5. Boru Hattı İnceleme 4
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı 4

2. SÜRÜNGEN HAREKETLERİ 6
2.1. Hareket Tipleri 6
2.1.1. Yanal Dalgalanma Hareketi 6
2.1.2. Karın Üzeri Doğrusal Hareket 7
2.1.3. Akordeon Tipi Hareket 7
2.1.4. Yanal Kaymalarla Hareket 8
2.2. Yanal Kuvvet Kavramı 9
2.3. Kayan Dalga Hareketi 10
2.4. Harekete Yardımcı Etkenler Ve Çevre Algılama 11
2.4.1. Harekete Yardımcı Etkenler 11
2.4.2. Çevre Algılama 13

3. YILAN ROBOTLAR 15
3.1. İlk Robot Yılan Kavramı 15
3.2. Diğer Yılan Tipi Robotlar 17
3.2.1. Burdick ve Chirikjian 17
3.2.2. Shan 18
3.2.3. Ikeda ve Takanashi 19
3.2.4. Paap 19
3.2.5. IS Robotics 20
3.2.6. Miller 21

4. YILAN ROBOT TASARIMI **22**
4.1. Yanal İtki Mekanizması Kullanarak Hareket 22
4.1.1. Yanal Kuvvet İlkesi 22
4.1.2. Hareketin Elde Edilmesi 23
4.1.3. Gövde Modülleri ve Motorlar 25
4.1.4. Benzetim 29
4.1.5. Kontrol Donanımı 30
4.1.6. Seri İletişim 30
4.1.7. Servo Motor Sürücü Devresi 31
4.1.8. PIC 16F84A Mikro Kontrolörler 31
4.1.9. Doğru Akım Motoru Sürücü Devresi 32
4.1.10. Kontrol Algoritması 33
4.2. Yanal İtki Mekanizması Kullanmadan Hareket 34
4.2.1. İyileştirme Çalışmaları 36
4.2.2. İtici Kuvvetin Oluşumu 36
4.2.3. Öndeki Uzvu Takip Etme ve Açıların İlgileşimi 41
4.2.4. Eğri Uydurma 43
4.2.5. Eğri Uydurma Noktalarının ve Yönteminin Belirlenmesi 44
4.2.6. Polinom Tipi Eğri Uydurma 46
4.2.7. Parçalı Polinom (Spline) Türü Eğri Uydurma 48
4.2.8. Algılayıcılar 52
4.2.9. Kontrol Algoritması 52
4.2.10. Senaryo ve Deneyler 54
4.2.11. I-Senaryo 54
4.2.12. U-Senaryo 55
4.2.13. V-Senaryo 56
4.2.14. Deneyler 56
4.2.15. Sonuçlar 58

5. İYİLEŞTİRİLMİŞ YENİ PROTOTİP **59**
5.1. Yönlendirici İlkeler 59
5.2. Yeni Tasarım 59
5.3. Hareket ve Senaryolar 61
5.3.1. Dayanaklara Temas ile Hareket 61
5.3.2. Düşey Düzlemde Hareket 62

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **64**
6.1. Sonuçlar 64
6.2. Öneriler 66

KAYNAKLAR **68**

ÖZGEÇMİŞ **77**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Birinci Prototipin Özellikleri..... 26
Tablo 4.2. Eksantrik Mekanizması Motorunun Özellikleri..... 27
Tablo 4.3. Servo Motorların Özellikleri..... 28
Tablo 4.4. Robot Boyunca Eklemlerdeki Açı Verilerinin Ötelenmesi ……...41
Tablo 5.1. Yeni Prototipin Bir Modülünün Özellikleri..... 61
Tablo 5.2. Kayan Dalga Hareketinde Eklem Açılarının Ötelenmesi 63
Tablo 6.1. İki Prototipin Karşılaştırılması..... 64
Tablo A.1. RS-232 Seri Çıkış Özellikleri..... 70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Yanal Dalgalanma Hareketi 7
Şekil 2.2 : Karın Üzeri Doğrusal Hareket..... 7
Şekil 2.3 : Akordeon Tipi Hareket..... 8
Şekil 2.4 : Yanal Kaymalarla Hareket 8
Şekil 2.5 : Yanal Kuvvetin Dayanaklara Uygulanması 9
Şekil 2.6 : Semender Hareketi 10
Şekil 2.7 :Yılan Kas Aktivitesi 11
Şekil 2.8 : Pulların Harekete Etkisi 12
Şekil 2.9 :Yılan Kas Yapısı 12
Şekil 2.10 :Yılan İskelet Yapısı 13
Şekil 3.1 :ACM III 15
Şekil 3.2 :ACM III' ün Dokunma Algılayıcıları ile Yaptığı Farklı Hareketler, (a) Bir cisim etrafına sarılma, (b) Sürekli bir yolda hareket 16
Şekil 3.3 :ACM III'ün Algılayıcı-Motor Etkileşimi 16
Şekil 3.4 : Robot Yılan (Burdick ve Chirikjian) 17
Şekil 3.5 : Robot Yılan (Shan) 18
Şekil 3.6 : Robot Yılan (Ikeda ve Takanashi) 19
Şekil 3.7 : Robot Yılan (Paap) 20
Şekil 3.8 : Robot Yılan (IS Robotics) 20
Şekil 3.9 : Robot Yılanlar S4, S5, S6, S7 (Miller) 21
Şekil 4.1 : Yanal Kuvvetin Uygulanış Yöntemleri a) Yanal itki mekanizması ile, b) Eklem dönmeleri ile 23
Şekil 4.2 :Çekmece Mekanizması ile Kuvvetlerin Elde Edilmesi 24
Şekil 4.3 : Yanal İtki Mekanizması ile İlerleme 24
Şekil 4.4 : Birinci Prototipin Uzuv Yapısı 25
Şekil 4.5 :5 Uzuvlu Birinci Prototip 26
Şekil 4.6 : Eksantrik Mekanizması 26
Şekil 4.7 : Yanal İtki Mekanizması Motoru 27
Şekil 4.8 : Servo Motorlar 28
Şekil 4.9 : Yanal İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Benzetimi 29
Şekil 4.10 :İç İçe Geçen Yanal İtki Mekanizması Çubukları 30
Şekil 4.11 :İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Dayanak Atlaması 30
Şekil 4.12 :L293D Doğru Akım Motoru Sürücüsü 33
Şekil 4.13 : Yanal İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Genel Kontrol Akışı 34
Şekil 4.14 : Yanal İtki Mekanizmasız Birinci Prototip 36
Şekil 4.15 :5 Uzuvlu Bir Sistemin Dayanaklar Arasındaki İlk Konumu 37
Şekil 4.16 :5 Uzuvlu Bir Sistemin Dayanaklara Göre Uygun Bir Konfigürasyonu: a) Dayanaklara göre Şekil Alma, b) Yanal Kuvvet Uygulama 38
Şekil 4.19 :Eğri uydurma Noktalarının Tespit Edilmesi 44
Şekil 4.20 :Eğriye Parçalı Yapının Giydirilmesi ve Eklem Açılarının Tayini 45

Şekil 4.21 : Polinom Tipi Eğri Uydurma İşlemine Değişik Dayanak Verileri İçin Oluşan Eğriler 48
Şekil 4.22 : Parçalı Polinom Tipi Eğri Uydurmada Elde Edilen Eğri 49
Şekil 4.23 : Robotun Uydurulan Eğriyi Almış Hali 50
Şekil 4.24 : Dayanak Verilerine Göre Yılanın Konfigürasyonunun Hesaplanması ... 51
Şekil 4.25 :Yılan Eklemlerindeki Koordinat Sistemleri ve Eklem Açıları..... 53
Şekil 4.26 :U-Senaryo..... 55
Şekil 4.27 :V-Senaryo..... 56
Şekil 4.28 : Bozucu Etki Olmaksızın Senaryonun Başlangıç ve Bitiş Konfigürasyonu..... 57
Şekil 4.29 : Sisteme Dışarıdan Verilen Bozucu Etkiler (a,b,c). Sistemin Bozucu Etkiler Sonrasındaki Konfigürasyonu (d) 57
Şekil 5.1 :İyileştirilmiş Yeni Prototip Modülleri ve Ölçüleri 60
Şekil 5.2 : Yeni Prototipin Engele Dayalı Hareket Senaryosu 62
Şekil 5.3 :Düşey Düzlemde Kayan Dalga Hareketi..... 63
Şekil 6.1 : Birinci (5 Uzuvlu) ve İkinci (10 Uzuvlu) Prototipler 65
Şekil B.1 : Servo motor Sürücü Devresi..... 71
Şekil D.1 : Doğru Akım Motor Sürücüsü Bağlantıları 73
Şekil D.2 : Doğru Akım Motor Sürücüsü Uç Dizilimi 73

SEMBOL LİSTESİ

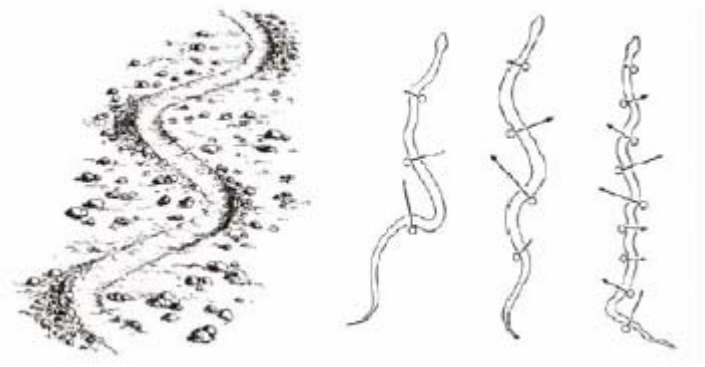
$\overrightarrow{R_i}$	**:** i. dayanaktan sisteme etkiyen tepki kuvveti
N	**:** Bir eklemin uyguladığı döndürme momenti
α_i	**:** Bir uzvun, i. dayanakla yaptığı temas açısı
θ_n	**:** n. eklemin bağıl açısı
Δt	**:** Robotun bir uzuv boyu kadar ilerlemesi için geçen süre
a_i, b_i	**:** Yılan eğrisinin geçeceği noktaların i. dayanaktan sapma miktarları
x_s, y_s	**:** Robotun en arka noktasının referans eksen takımına göre konumu
x_{p_i}, y_{p_i}	**:** i. dayanağın referans eksen takımına göre konumu
φ_s	**:** Robotun en arka noktasının referans eksen takımına göre dönmesi

YILANSI HAREKET MEKANİĞİ VE HAREKET KONTROLÜ

ÖZET

Son zamanlarda, doğada özellikle yılan ve tırtıllarda gözlemlenen fiziksel hareket ilkelerine dayanan birçok sayıda hareketli robot prototipi gerçekleştirilmiştir. Japon bilim adamı Hirose'nin konu üzerindeki özgün çalışmaları, onu izleyen dünya çapında birçok araştırmaya esin kaynağı olmuştur. Bu robotların birçoğu aktif veya pasif tekerleklerle donatılmış hareketli platformlardan oluşmaktadır. Yılansı mekanik yapılarına karşın, hareket etme ilkeleri klasik tekerlek hareketinden ibarettir. Doğadan esinlenen yılansı hareket ilkelerini uygulayan pasif tekerlekli birçok mekanizma tasarlanmıştır. Bu tekerlekli mekanizmalar, yeterince pürüzsüz yüzeyler üzerinde işletilebilmektedir.

Diğer yandan, yapay tekerlekli hareketin doğal yaşamda gelişmemiş olduğu bilinmektedir. 6 çeşit yılansı ayaksız hareket biçimi arasında *yanal dalgalanma* hemen hemen tüm (~2700) yılan türlerinde ve en sık bir biçimde gözlemlenen hareket türüdür. Şekil 1(a) ve 1(b) sırasıyla yanal dalgalanma ile ilerleyen bir yılanın bıraktığı izi ve yanal dalgalanma esnasında ayrık dayanaklarda oluşan tepki kuvvetlerini göstermektedir.

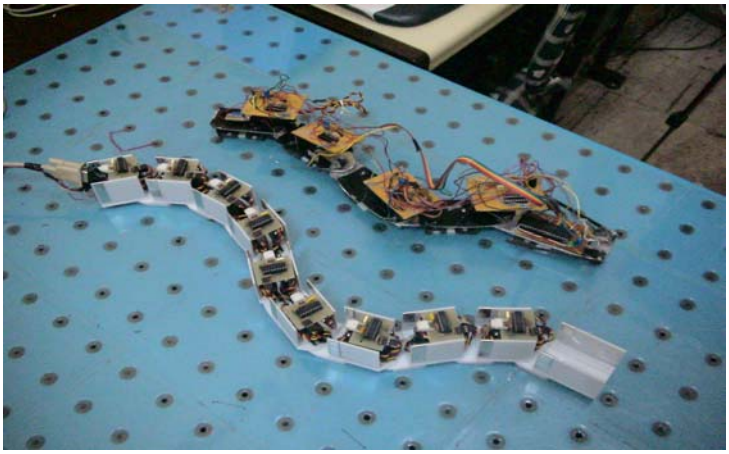


Şekil 1: (a) Yanal dalgalanma ile ilerleyen yılanın bıraktığı iz. (b) Çeşitli sayıda eşzamanlı dayanakların görüldüğü 3 farklı yanal dalgalanma konfigürasyonu.

Yanal dalgalanma ile yılansı hareket, hayvanın vücudunun tamamının çevresi ile sürekli etkileşimine dayanır. Yılan, vücudunu üzerinde bulunduğu yüzeydeki pürüzlere dayayabilmek için vücudunu büker. Yılanın vücudunun, *dayanak* diyebileceğimiz pürüzlerle olan temas yüzeylerinde oluşan tepki ve sürtünme kuvvetleri, hayvanın istediği bir yönde hareketini sağlayacak toplam itme kuvvetini oluşturur. Yerel olarak, hareketli vücut kesimleri dayanaklar etrafında kayarak döner

ve toplam kuvvet/moment tepkisi yılanı iter. Oldukça fazla eklem sayısına sahip (~120-400) yılan omurgaları çok çeşitli özelliklerdeki yüzeylere uyum sağlayabilmektedirler. Günümüzde yaklaşık 2700 tür yılan bulunmaktadır ve yılanlar dünya üzerinde kutuplar hariç her bölgede yaşamaktadır. Yılansı hareketle ilerleyen mekanizmalar, tekerlekli ve ayaklı platformların hareket zorlukları çektiği doğal ve düzensiz ortamlarda çalışmaya daha uygundur.

Bu tez çalışmasında, doğadan esinlenen hareket biçimini uygulayabilen tekerleksiz yılansı robot prototipleri tasarlanarak üretilmiştir (Şekil 2). Prototiplerden ilki 5 uzva ve bir serbestlik dereceli 4 ekleme sahiptir. İkincisi 10 uzva ve bir serbestlik dereceli 9 ekleme sahiptir.

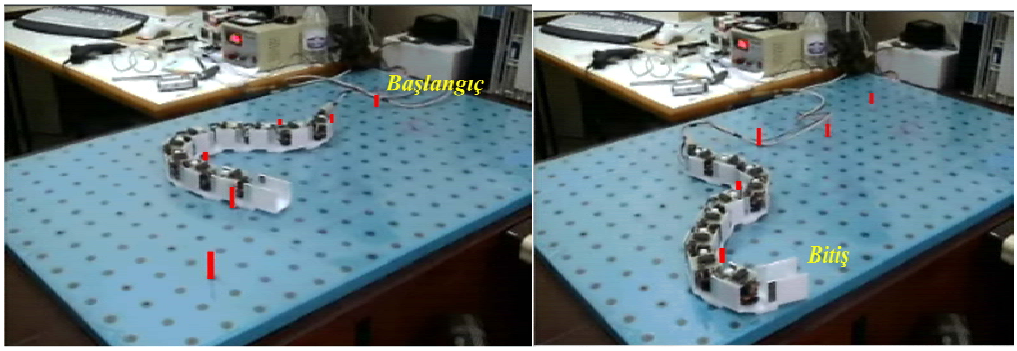


Şekil 2: Üretilen Yılan Tipi Robot Prototipleri

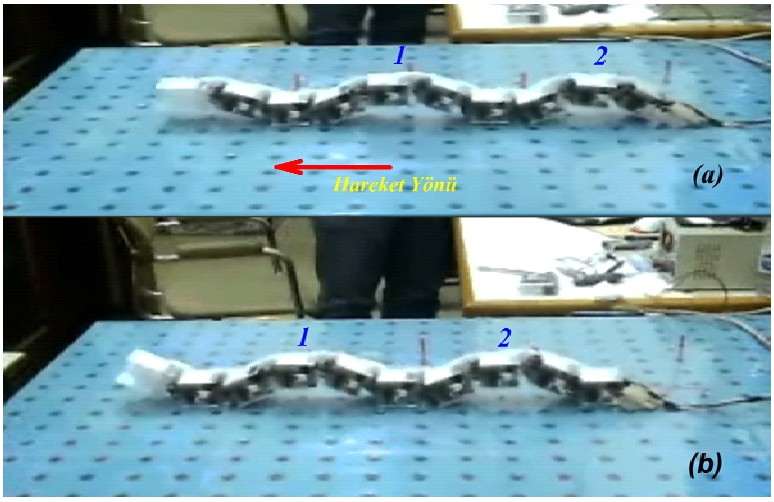
Prototiplerin hareket etmeleri, çalışma ortamında bulunan dayanaklara kuvvet uygulamaları ve bu dayanaklardan gelen tepki kuvvetlerinin yanal bileşenlerinin birbirlerini dengelemesi ve hareket yönündeki bileşenlerinin toplanarak sistemi hareket ettirmesi ile mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında zincir şeklinde birbirine bağlı uzuvlara uygun yöntemlerle çalışma ortamında bulunan dayanaklardan gelen tepki kuvvetleri etkimesi sağlanmıştır.

Üretilen prototiplerden ilki doğadaki yılanların en çok uyguladıkları "çevresel dayanaklara dayalı kayan dalga hareketi"ni uygulayabilmektedir. Bu prototip yanal kuvveti iki farklı yol ile oluşturabilmektedir. Bunlardan ilki her bir uzvun alt kısmında bulunan, birer eksantrik mekanizması ile tahrik edilen çekmece benzeri yapılarla mümkün olmaktadır. Eksantrik mekanizmaları bu çekmecelere hareket vererek çekmecelerin yılanın yan tarafından dışarı çıkmaları ve dayanaklara bu yolla kuvvet uygulamalarını sağlar. Yanal kuvvetin ikinci uygulanış biçiminde eksantrik ve çekmece mekanizmaları kullanılmamıştır. Sistemin uygun eklemlerine uygun zaman ve miktarlarda dönme verilerek sistemin uzuvlarının dayanaklara bu dönmeler sayesinde kuvvet uygulamaları sağlanmıştır.

Üretilen prototiplerden ikincisi, birinci prototipin uyguladığı ikinci hareket yöntemini çok daha hassas bir şekilde uygulayabilmektedir. Bu prototip, uzuv boylarının daha kısa olması ve daha çok uzva sahip olması nedeniyle farklı bir hareket etme biçimi olan "düşey düzlemde kayan dalga hareketi"ni de uygulayabilmektedir. (Şekil 3, Şekil 4).



Şekil 3: İkinci Prototipin Engele Dayalı Hareket Senaryosu



Şekil 4: Düşey Düzlemde Kayan Dalga Hareketi

Prototiplerin her iki yanında dokunma algılayıcıları bulunmaktadır. Bu algılayıcılar sayesinde sistem temas halinde olduğu dayanakların koordinatlarını bulabilmektedir.

Doğadaki yılanların her koşulda uyguladıkları sabit vücut eğrileri yoktur. Vücutlarının esnekliği sayesinde kendilerini doğal koşullara uyarlayabilirler.

Bu tez çalışmasında, dayanakların yerlerini tespit eden robotlara bu dayanakların oluşturduğu senaryolara uyabilmeleri ve her yeni dayanakta kendilerini bu yeni konfigürasyona uyarlayabilmeleri için, dayanak verilerine göre eğri uydurma yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yöntemle hareketin oluşabilmesi için sistemin deney tablası üzerinde alması gereken konfigürasyon açıları ve sistemin ileri yönde hareket edebilmesi için her bir eklemin aynı anda alacağı açı değerleri çok farklı senaryolar için yazılan bir algoritma tarafından belirlenmiştir. Bu yolla hareketin her anında dokuz eklem aynı anda kumanda edilerek hareket sağlanmıştır. Sonuçta çok farklı dayanak konfigürasyonlarında sistem kendini hareket koşullarına uyarlayabilmiş ve ileri yönde hareketi sağlayabilmiştir.

A SNAKE-LIKE MOBILE ROBOT PROTOTYPE AND ITS MOTION CONTROL

SUMMARY

Limbless locomotion has recently motivated the construction of numerous mobile machines taking the advantage of the physical phenomena observed particularly in snakes and inchworms. Original works of the Japanese scientist Hirose has inspired many of the following research on snake-like locomotion throughout the world. Most of these locomotors have consisted of mobile platforms equipped with active or passive wheels. Despite their snake-like mechanical structures, locomotion of machines using active wheels is based on the principles of classical wheeled functioning. Most structures with passive wheels have been designed to exert biologically inspired snake-like locomotion. However wheeled snake robots are intended to operate over perfectly smooth substrata, i.e. in artificially structured environments.

On the other hand, one knows that artificial wheeled motion does not appear in natural world. Among various limbless locomotion types, lateral undulation is the most frequently exerted progression type by nearly all snake species. Figure 1(a) illustrates the tracks of a snake progressing through lateral undulation and in Figure 1(b) shows the discrete lateral reaction forces which propel the whole body.

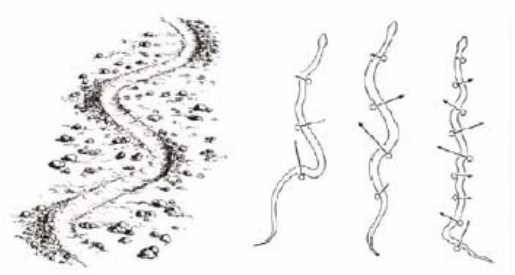


Figure 1: (a) Tracks of a snake moving through lateral undulation. (b) Three different cases with various numbers of simultaneous lateral contacts.

Snake locomotion through lateral undulation is based on a continuous interaction of the animal's entire body with its environment. The animal curves its own body so that it could push against the environment's irregularities. Reaction forces from the so-called push-points constitute together the total propulsive force required for progression in a given direction. Locally, sections of the mobile body slide along the push-points and the resulting global force/torque happens to propel the snake.

Highly articulated snake backbone ensures a kind of adaptation to a variety of substrata. Therefore the snake-like locomotion is rather suitable for outdoor

applications in uneven environments where wheeled and/or legged platforms can not operate properly.

Within this work two wheel-less snake-like mobile mechanisms, capable of exerting biologically inspired locomotion (Figure 2) are produced. The first prototype has 5 links and 4 joints and the second prototype has 10 links and 9 joints. Each joint on both prototypes has one degree-of-freedom.

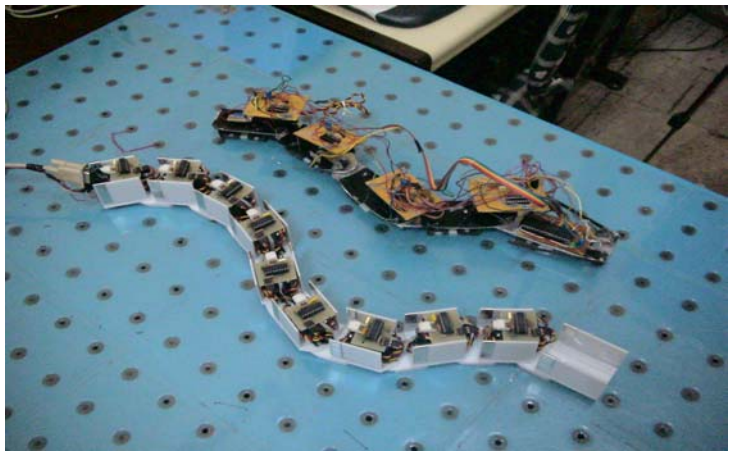


Figure 2: Snake-Like Mobile Mechanisms

The total gait of the system is constituted by applying some lateral forces to the pegs which are found in the work space of the robot. The lateral components of the reaction forces coming from the pegs balance each other; finally the total propulsive force is generated by the sum of the reaction force components acting along the direction of the gait. Within this work, by using some appropriate techniques, the reaction forces coming from the pegs are acted on the articulated mobile system.

First prototype can apply the lateral undulation movement with respect to the pegs which is the most common gait type of natural snakes. It applies lateral forces to the pegs by the help of two different mechanisms. First type is a “drawer” like mechanism which is driven by an eccentric. A DC motor drives the eccentric and the eccentric gives a lateral displacement to the drawer. By the help of this lateral displacement, robot can propel itself if there is a contact with a peg. Second type does not use any special mechanisms for applying lateral forces. If there are contacts with the pegs, by rotating the appropriate joints of the robot at appropriate times, robot can apply lateral forces to the pegs.

Since it has more links and shorter link lengths compared to the first prototype, the second prototype can sensitively apply the second type of motion mentioned above. And because of the same reason, the second prototype can also apply a different motion type; “traveling wave motion in the vertical plane” (Figure 3, Figure 4).

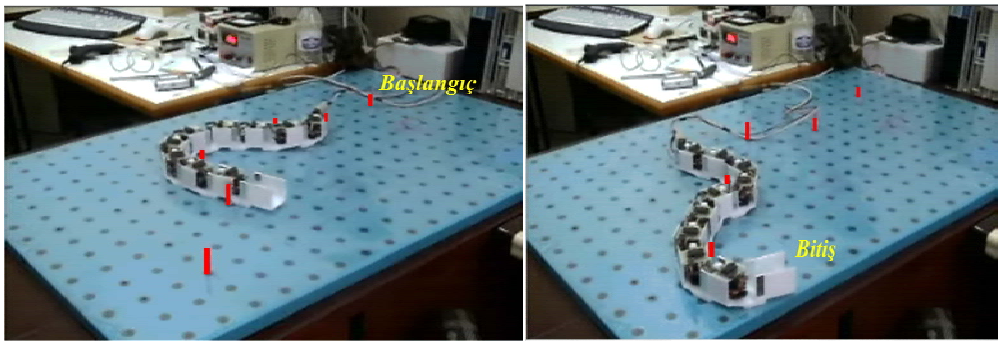


Figure 3: Motion with respect to the pegs' positions

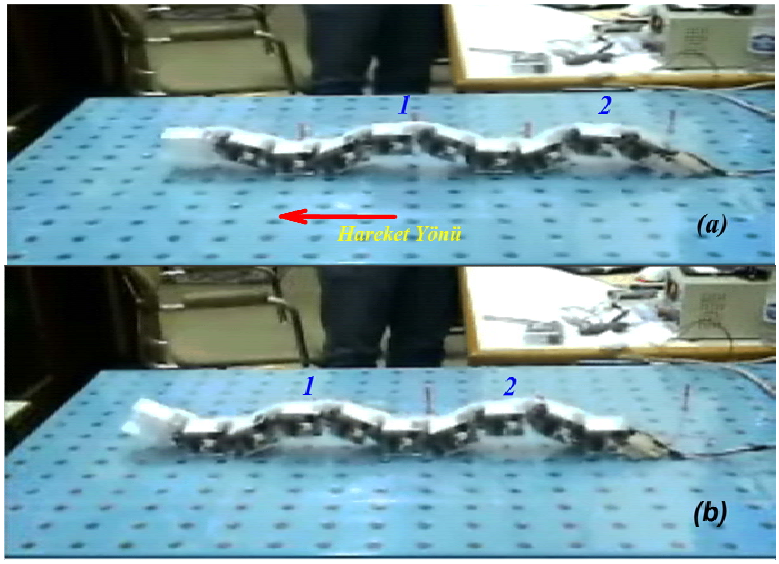


Figure 4: Traveling wave motion

By using the tactile sensors on both sides of the robots, the positions of the pegs which are in contact with links may be found.

Snakes in nature do not have a special body curvature that they use in all environmental conditions. By having an articulated flexible structure, they can adapt their body shapes to the environments.

Within this work, a curve fitting approach is used to adapt the robots to different kinds of scenarios which are determined by different configurations of the pegs. Using this approach, the configuration which the robot should have on the test table in order to generate the reaction forces in correct directions could be determined by an algorithm. Also, the simultaneous angle changes at each joint to make the robot move could be determined. As a result, nine servo motors could be controlled simultaneously and the movement of the whole system could be achieved for different kind of scenarios.

1. GİRİŞ

İnsanlar doğada gerçekleşen birçok olguyu gözlemleyerek, bunların altında yatan temel fikirler sayesinde doğal bilimleri oluşturmuşlardır. Doğal hayat içinde, canlılar yaşamlarını sürdürebilmek için evrim süreci boyunca doğal seçilim yoluyla kendi özelliklerini geliştirmişler ve bu sayede yaşam koşullarına uyum sağlayacak çok farklı vücut şekilleri ve etkin hareket, algılama ve savunma yöntemleri oluşturmuşlardır.

Uzun zaman boyunca, insanlar doğada yaşayan bu organizmaların temel prensiplerini anlamak ve bunları insan yaşam kalitesini arttırmada kullanmak için yollar aramışlardır. Günümüzde mühendislik alanındaki gelişmeler oldukça yüksek bir seviyeye erişmiştir. Mühendislik sistemlerinin çalışma koşullarına uygunluğu ve sistem tasarımı ile görevi arasındaki uyumun en yüksek seviyede olmasının gerekliliği gittikçe daha büyük bir öneme sahip olmaktadır. Bu nedenle doğal organizmaların çevrelerine uyumu ve işlevsellikleri daha fazla ilgi çekmektedir.

Bu bakımdan incelendiğinde, yılanlar evrimleşme sürecinde çok temel ve işlevsel bir vücut şekli geliştirmişler ve hareket yöntemleri bakımından su, toprak, kayalık, ağaç gibi çok farklı yaşam koşullarına adapte olabilmişlerdir.

Bu tez çalışmasında, vücut yapısı ve hareket tipleri bakımından çok verimli bir yapıya sahip olan yılan tipi hareketler incelenmiş ve yılan tipi vücut şekline sahip iki prototip üretilerek, çok temel bazı yılansı hareketler gerçekleştirilmiştir.

1.1 Neden Yılan Tipi Robotlar

Mühendisler çok farklı koşullarda çalışmaları için tekerlekli, paletli, ayaklı ilerleme yapılarına sahip robot tasarımları yapmışlardır. Buna rağmen bu robotların çalışma alanları, hareket mekanizmalarına bağlı olarak sınırlanmış durumdadır. Doğadaki yılanlar sürünme hareketi yapmaları bakımından birçok canlının ilerlemekte güçlük

çekeceği arazilerde verimli ilerleme hareketleri yapabilmektedirler. Bu tez çalışmasında her biri tekerleksiz ve türdeş uzuvların birleştirilmesiyle oluşturulmuş robot prototiplere sürünme hareketi yaptırılarak ilerleme sağlanmıştır.

Yılan tipi hareket yapan robotların avantajları şöyle sıralanabilir:

- Bir yılan tipi robot yerden yüksek bir alanda sürünmediği sürece düşme ihtimali yoktur. Sürünen bir robotta gövdenin büyük bir kısmı yer ile temas edeceğinden ağırlık merkezleri yere çok yakındır. Ayrıca kol, bacak, tekerlek gibi uzuvlarının bulunmaması, yüksek bir yerden düşmeleri halinde bile daha az zarar görecek parça bağlantısı anlamına gelmektedir. Yılanlar ayrıca basamak çıkma hareketi de yapabilmektedirler. Bu hareketlerinde hemen hemen basamağın şeklini alarak tırmandıkları için yürüyen bir robota oranla çok daha kararlı bir hareket yapabilirler.
- Yılan tipi robotların hareket ettikleri yüzeyin sertliğinin önemi yoktur. Hareket yüzeyleri bataklık veya kum tepeleri olabilir çünkü ağırlıklarını tüm vücutları boyunca yayabilirler.
- Çok engebeli yüzeylerde hareket sırasında tekerlekli, paletli robotlar engel üzerinden atlama hareketi yaparken, yılan tipi robotların vücut şekillerinin ince ve uzun bir yapıda olması, engellerin üzerinden atlamak yerine aralarından kıvrılma hareketi yapmasına olanak sağlamaktadır.
- Yılan tipi robotlar modüler yapıdadırlar ve modülleri birbirinin eşleniğidir. Bir modülün arızalanması durumunda bu modül sistemden çıkarılarak kalan kısımlarla hareket gerçekleştirilebilir.
- Eklemler arasında sadece dönme hareketleri oluşur ve tekerleklerdeki gibi sürekli dönme hareketine ihtiyaç yoktur. Bu nedenle bu sistemlerin sızdırmazlıkları çok kolay sağlanabilir. Bu da su altı uygulamalarda kolaylıkla kullanım olanağı sağlar.

1.2 Kullanım Alanları

Bahsedilen özelliklerinden dolayı, yılan tipi robotların birçok kullanım alanları bulunmaktadır. Bu kullanım alanlarını şöyle sıralayabiliriz.

1.2.1 Gözlem ve Keşif

Vücut yapılarının esnekliği ve ağırlıklarını tüm vücut boyunca dağıtabilmeleri nedeniyle, bu tip robotlar yürümenin güvenli olmadığı bölgelerde ve dar alanlarda keşif ve gözlem amaçlı kullanılabilirler. Köprü, bina gibi yüksek yapıların, ulaşılamayacak ve dar bölgelerine girerek bakım ve onarım çalışmalarının yapılmasında kullanılabilirler.

Engebeli ortamlarda ilerleyebilmeleri sayesinde, insanların yaşayamayacakları gezegen yüzeyleri, nükleer reaktörlerin bazı kısımları gibi ortamlarda keşif amaçlı kullanılabilirler.

1.2.2 Arama Kurtarma

Toprak kayması, çığ, deprem gibi doğal afetlerde, yıkıntıların, enkazların içerisine salınarak, yaşayan canlıların yerlerinin tespit edilmesinde kullanılabilirler. Robota kullanım alanına göre kamera, ısı detektörü gibi sistemlerin monte edilebilir. Uygun cihazların yerleştirilmesi durumunda yaralılara ilk yardım malzemelerinin ulaştırılmasında kullanılabilirler.

1.2.3 Tıbbi Uygulamalar

Endoskopik yöntemlerin tıpta uygulanmaya başlamasıyla teşhis ve tedavi alanlarında büyük gelişmeler sağlanmıştır. Esnek şekil alabilme ve hareket kabiliyetleri sayesinde kendi itkisini sağlayan bu tip bir cihaz uygun boyut ve koşullarda üretildiğinde vücut içinde belirtilen amaçlarla kullanılabilir.

1.2.4 Askeri Uygulamalar

Özellikle çok farklı ortamlarda hareket edebilme kabiliyetleri sayesinde bu tip robotlar, düşman saflarının gözlenmesinde, mayın, bomba gibi mühimmatların yerleştirilmesinde kullanılabilirler. Ayrıca ağırlıklarını vücutları boyunca dağıtabildiklerinden, mayın tarlalarında gezinerek mayın tespit etme işleminde kullanılabilirler.

1.2.5 Boru Hattı İnceleme

Boru hatlarında meydana gelen bir arızanın yerini tespit etmek çoğu zaman maliyetli bir uygulamadır. Bu tip bir robot uygun bir bölgeden boru hatlarının içerisine salınarak hattın arızalı yerlerinin bulunmasında veya bakım gerektiren iç yüzeylerin tespitinde kullanılabilir.

1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı doğadaki yılanların vücut yapılarından ve hareket biçimlerinden esinlenerek bir yılan tipi robot prototipin üretilmesidir. Yılanların hareket ederken kullandıkları mekanizmalar, vücut formları, duyuları incelenerek robot prototipe uygulanmaya çalışılmıştır. Prototip üretilmeden önce gövde formu ve hareket biçimleri benzetimlerle incelenmiş, sonuçta iki farklı robot prototip üretilerek farklı hareket biçimleri ile ilerleme elde edilmiştir.

Tezin birinci bölümünde doğadaki yılanların vücut yapısına ve hareket özelliklerine sahip bir yılan robotun farklı uygulama alanlarında getireceği faydalar vurgulanmıştır.

İkinci bölümde biyolojik yılanların vücut yapıları tanıtılmış ve hareket ederken kullandıkları mekanizmalar ve vücut eğrileri incelenmiştir. Yılanların hareketinde önemli bir yere sahip olan ve bu tez çalışmasında üretilen yılan tipi robotların hareketine temel teşkil eden yanal kuvvet kavramı ve kayan dalga hareketi incelenmiştir.

Üçüncü bölüm literatür çalışması bölümüdür. Burada öncelikle 1972 yılında Shigeo HIROSE tarafından üretilen yılan robot ve robotun hareketindeki özellikler tanıtılmıştır. Daha sonra yılan tipi robotlar üzerinde yapılan çalışmalar anlatılarak üretilen robot prototipler ve uyguladıkları hareket yöntemleri belirtilmiştir.

Dördüncü bölüm bu tez çalışmasında üretilen yılan tipi robot prototiplerini içermektedir. Öncelikle prototiplerin hangi ilke kullanılarak hareket ettikleri açıklanmış, daha sonra yapılan benzetim sonuçları incelenmiştir. Bu tez çalışmasında iki farklı robot prototipi üretilerek bunların birincisine, yapacağı ilerleme hareketinde

kullanılan yanal kuvvet ilkesi iki farklı mekanizma ile uygulanmıştır. Bu bölümde bu mekanizmalar tanıtılarak aralarındaki ilişki ve farklara değinilmiştir.

Robotta kullanılan motorlar, kontrol donanımı ve kontrol yazılımı tanıtılmıştır. Robota uygulanan hareket senaryoları tanıtılarak sonuçları incelenmiştir.

Beşinci bölümde ikinci prototipin üretilme amaçları belirtilmiş ve yeni tasarımın avantajları irdelenmiştir. İkinci prototipin yapısı tanıtılarak uygulayabildiği iki farklı yılansı hareket tipi gösterilmiştir. Kontrol donanımı ve yazılımında yapılan iyileştirmelere değinilmiştir.

Altıncı bölümde üretilen prototipler karşılaştırılmış, oluşturulan hareket biçimlerinden, hareket senaryolarından ve hareketin dış etkilere karşı olan dayanıklılığını gösteren deneylerden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Yeni üretilecek olan robot prototip için öneriler getirilmiştir.

2. SÜRÜNGEN HAREKETLERİ

Doğada yaşayan canlılarda, evrim süreci boyunca çok farklı hareket ve ilerleme biçimleri gelişmiştir. Bu ilerleme biçimleri, hayvanların vücut yapılarına ve yaşadıkları doğal ortamın koşullarına göre farklı özellikler kazanmıştır. Bütün bu ilerleme biçimlerindeki ortak nokta, her canlının çevresindeki dayanakları veya yüzeyi iterek ilerlemesidir. Balıklar vücutları ve yüzgeçleri ile su ortamını iterken, insanlar ayakları ile temas ettikleri yüzeyi iterler.

Hayvanlar genellikle hareket tiplerine uygun olarak gelişen bazı uzuvlar yardımıyla çevrelerine kuvvet uygularlar. Sürüngenlerin bir kısmında bu tip uzuvların bulunmasına rağmen genel olarak gövdelerinin kıvrılma hareketiyle çevrelerine kuvvet uygularlar. Bu durum yılanlarda da böyledir. Hareketlerine yardımcı olan uzuvların bulunmayışı, yılan tipi hareketleri çok ilgi çekici kılmaktadır. Aşağıda özetlenen yılan tipi hareketler hakkında geniş bilgi **Gray (1946)** ve **Hirose (1993)** te verilmiştir.

2.1 Hareket Tipleri

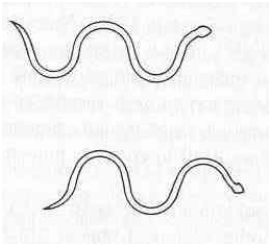
Yılanlar bulundukları ortama uygun olarak çok farklı hareket tipleri geliştirmişlerdir. Yüzme, tırmanma ve hatta belli mesafeleri uçma bunlardan bazılarıdır. Fakat en çok gözlemlenen ve en genel hareket tipleri şunlardır:

- Yanal dalgalanma hareketi
- Karın üzeri doğrusal hareket
- Akordeon tipi hareket
- Yanal kaymalarla hareket

2.1.1 Yanal Dalgalanma Hareketi

Yanal dalgalanma hareketi hemen hemen her tip yılanda görülen bir harekettir. Bu harekette vücudun bütün bölümleri benzer tipte hareket sergiler (Şekil 2.1).

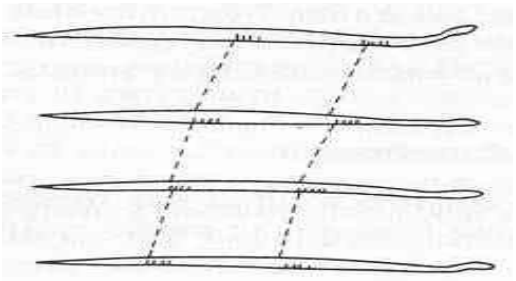
Yılanın bu hareketle ilerlemesi sırasında her eklem baş kısmının izlediği yolu izlediğinden hareket suyun bir yoldan akışını andırır. Bu tez çalışmasında dayanaklara bağlı olarak gerçekleşen yanal dalgalanma tipi hareket uygulanmıştır.



Şekil 2.1: Yanal Dalgalanma Hareketi

2.1.2 Karın Üzeri Doğrusal Hareket

Bu hareket tipi boğa, engerek gibi büyük yılanlar tarafından düzgün bir yüzeyde ilerlerken veya avlarına yaklaşırken kullanılan harekettir. Harekette karın altı kasları ve pulları büyük rol oynamaktadır (Şekil 2.2).



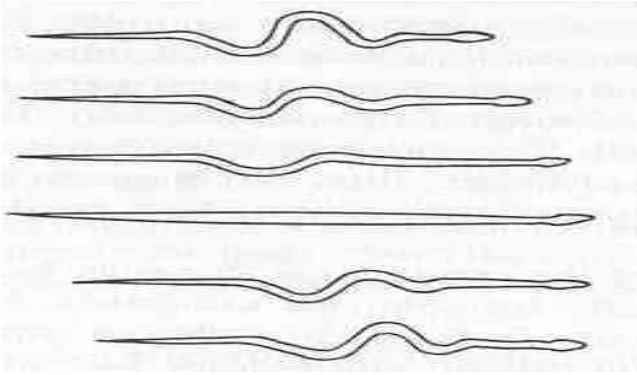
Şekil 2.2: Karın Üzeri Doğrusal Hareket

Karın altı kaslarının kasılması sonucu pullar toprakla daha dik bir şekilde temas ederek sürtünmeyi arttırırlar. Bu kas kasılmaları yılanın başından arka kısmına doğru kayarak ileri yönde hareketi oluşturur.

2.1.3 Akordeon Tipi Hareket

Bu hareket yılanların çok kaygan, yeterince engel bulunmayan alanlarda yaptıkları bir harekettir. Bu harekette yılan, statik sürtünme katsayısının dinamik sürtünme katsayısından daha büyük olmasından yararlanarak hareket eder. Bu nedenle bu hareketi kullanarak çok kaygan yüzeylerde hareket edebilirler. Vücutlarının bazı

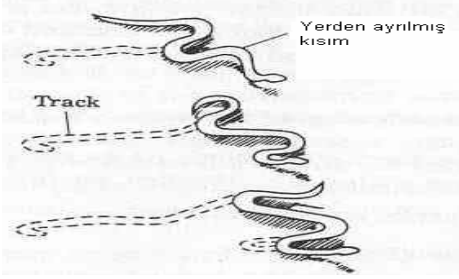
bölümlerini sabit tutarak kalan kısımlarını sabit bölümlerin yer ile olan sürtünmesinden yararlanarak iterler veya çekerler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Akordeon Tipi Hareket

2.1.4 Yanal Kaymalarla Hareket

Bu hareket, örneğin çıngıraklı yılanların çöl kumları üzerinde yaptıkları harekettir. Yılan, çöl ortamına son derece iyi adapte olmuş bir hareket sergiler. Hem sıcak ortamla teması azaltmak hem de kayma sürtünmesini azaltarak hareketin verimliliğini arttırmak üzere vücudun bazı bölümlerinin yer ile olan temasını keserek hareket ederler (Şekil 2.4).



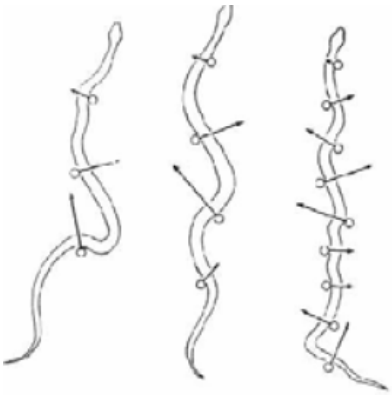
Şekil 2.4: Yanal Kaymalarla Hareket

Yerden ayrılmış olan kısmı, *S* tipi bir eğri almış olan vücutları boyunca geriye yayarak yanal kaymayı oluştururlar.

2.2 Yanal Kuvvet Kavramı

Yılanların çevrelerini iterek hareket etmelerine yardımcı olacak uzuvları bulunmadığından, çevreye kuvvet uygulayarak hareket etmek için tüm vücutlarını kullanırlar. Yılanların hareketine yardımcı olan deri yapısı, gövde üzerindeki pullar gibi faktörler vardır, fakat bu çalışmada bu faktörlerin harekete olan etkisi incelenmeden yanal kuvvet kavramı üzerinde durulmuştur.

Bulundukları çevrede var olan ve diğer birçok canlıya hareketlerinde engel teşkil eden çıkıntılar (taş, kaya, çimen… vb.), yılanların bu yapısından dolayı hareketlerine yardımcı olan dayanaklardır. Hareket etmek için, vücutlarının kıvrılmasıyla temas ettikleri bu dayanaklara kuvvet uygularlar. Bu sayede dayanaklardan gelen yanal tepki kuvvetleri vücutlarına etkir. Vücut biçimlerinin ayarlanmasıyla bu tepki kuvvetlerinin yönlerini değiştirebilirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Yanal Kuvvetin Dayanaklara Uygulanması

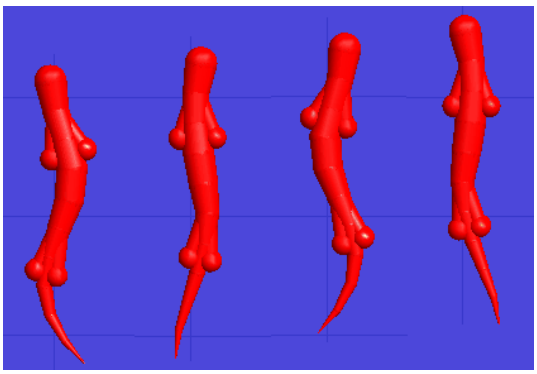
Aynı anda birçok dayanaktan kuvvet alarak, ilerlemeleri için gerekli olan kuvvet bileşenini rahatlıkla oluştururlar.

Yılanların çevreye kuvvet uygulama mekanizmalarının incelendiği, biyologlar tarafından yapılmış çalışmalar mevcuttur **(Moon ve Gans, 1998), (Gasc ve diğ., 1989), (Gray ve Lissmann, 1949)**. Bu çalışmalarda yılanların temas halinde bulunduğu ortama göre değişen kuvvet uygulama biçimleri incelenmiştir. Buna göre yılanlar dayanakların sayısına ve durumuna göre dayanaklara farklı mertebelerde ve yönlerde kuvvet uygulayabilmektedirler. Ayrıca yılanların eklem sayılarının fazla

olması (~120-400 eklem) ve bir uzuv boylarının kısa olması, tek dayanağa dahi yanal kuvvet uygulayarak hareket etmelerine olanak sağlamaktadır **(Gasc ve diğ., 1989)**.

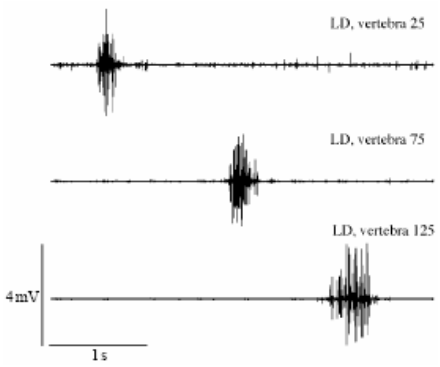
2.3 Kayan Dalga Hareketi

Kayan dalga hareketi, doğadaki canlıların yaptıkları en temel hareketlerden biridir (balıklar, su yılanları… vb.). Bu harekette canlılar vücutlarının kıvrılmasıyla *S* formunda bir eğri oluştururlar. Bu eğrinin kıvrımlarını, vücutları boyunca arkaya yayarak ileri yöne de bir itme gerçekleştirirler. Şekil 2.6 da bir semenderin su ortamında yaptığı kayan dalga hareketi gösterilmektedir **(Ijspeert, 2001)**. Yılanlar su ortamı veya kuru sürtünmenin olduğu ortamlar gibi birçok farklı ortamda bu hareketi gerçekleştirirler. Bu hareketin gerçekleşmesinde art arda gelen kas aktiviteleri rol oynamaktadır. Şekil 2.7 yılanların bu hareketi yaparken oluşturdukları kas aktivitelerini göstermektedir. Ölçümler yılanın sırasıyla 25, 75 ve 125. eklemlerine konulan elektrotlar yardımıyla yapılmıştır **(Moon ve Gans, 1998).** Burada yılanın kas aktivitesinin önden arkaya doğru yayıldığı açıkça görülebilmektedir.



Şekil 2.6: Semender Hareketi

Bu tez çalışmasında bu kas aktiviteleri robot prototiplerin her eklemine konulan servo motorlara sağlanmıştır. Yılana, kayan dalga hareketini oluşturacak konfigürasyon verildikten sonra motorlara ardışık olarak kumanda edilmesiyle hareket sağlanmıştır.



Şekil 2.7: Yılan Kas Aktivitesi

2.4 Harekete Yardımcı Etkenler Ve Çevre Algılama

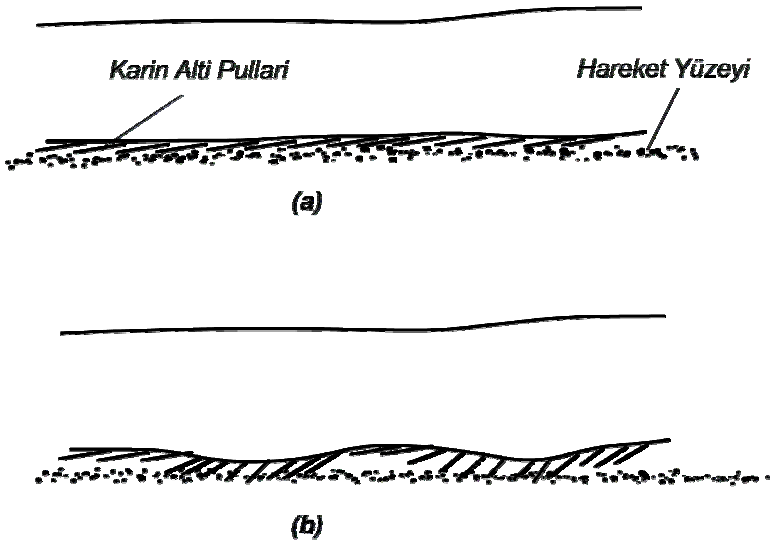
2.4.1 Harekete Yardımcı Etkenler

Kas aktiviteleri ve vücutlarının konfigürasyonlarını kullanarak hareket eden yılanlarda, hareket etmelerine yardımcı olan birçok farklı mekanizma bulunmaktadır.

Su yılanlarının deri yapısı su ile olan sürtünmeyi azaltacak şekildedir. Bu yılanların kuyruk şekilleri, vücutlarının genel formundan daha yassıdır. Bu şekilde bir yöne harekette su ile temas halinde olan alan artarak hareket kolaylaştırılmaktadır.

Yılanların karın altında ve gövde üzerinde bulunan pulları hareketlerinde önemli bir yere sahiptir. Yer düzleminde kayan dalga hareketi yapan bir yılanda, karın altındaki pulların dizilişi ve şekilleri nedeniyle, yanal ve ilerleme doğrultularında farklı sürtünme kuvvetleri elde edilmektedir. İlerleme yönündeki sürtünmenin, yanal yöne göre daha az olması yılanların ilerlemelerini mümkün kılmaktadır.

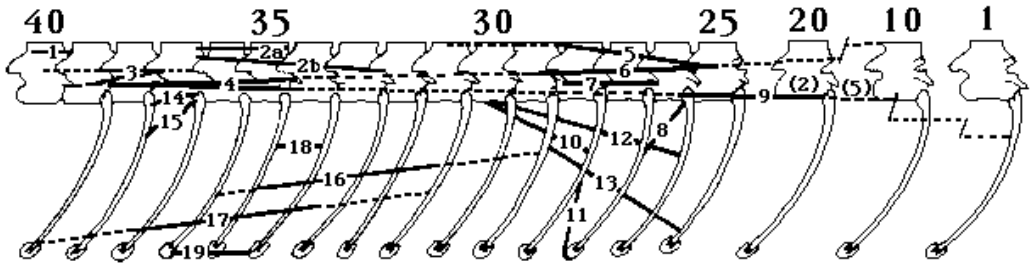
Karın üzerinde doğrusal hareket yapan yılanlar kayan dalga hareketini vücutlarının genel formunda değil, karın altında yer ile temas halinde olan yüzeyde gerçekleştirirler (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Pulların Harekete Etkisi

Bu hareketi gerçekleştirirken oluşan kas aktiviteleri, karın altı pullarının yer ile olan temas açılarını değiştirir. Pulların hareket yüzeyi ile kaymayacak şekilde temas etmesi ve kas aktivitesinin arkaya doğru yayılmasıyla yılan hareket edebilmektedir.

Yılanların kasları vücutları boyunca yayılmıştır. İç içe geçen kas yapıları sayesinde bir kas dayanak ile teması kaybetmeden ardından gelen kas bu teması devralabilmektedir. Bu sayede kesintisiz, akıcı bir hareket gerçekleşmektedir (Şekil 2.9, 16. ve 17. kaslar).



Şekil 2.9: Yılan Kas Yapısı

Yılanların iskelet yapıları art arda gelen birçok eklemden oluştuğundan (120~400 eklem), vücutları ile hassas ve düzgün eğriler elde edebilirler ve dayanaklarla hassas bir şekilde temas edebilirler (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Yılan İskelet Yapısı

2.4.2 Çevre Algılama

Yılanların çevre algılama sistemleri, türden türe farklılık gösterir. Algılayıcıları, yaşadıkları koşullara en iyi şekilde uyum sağlamak üzere evrimleşmiştir **(Greene, 1997)**.

Görüş

Bu duyuları diğerler duyuları kadar gelişmemiştir. Yılanlar yerde sürünerek ilerleyen hayvanlardır ve yerden yüksekliklerinin az oluşu nedeniyle görüş alanları sınırlıdır. Bu duyuları en gelişmiş tür ağaçlarda yaşayan yılanlardır. Ağaçlarda yaşayan yılanlarda uzak mesafeleri görmek bir üstünlük sağlar çünkü bunların avları kuşlar ve memelilerdir. Bu yılanlar, avlarını yakalamak için ağaçlarda kuşların yuvalarının bulunduğu yerlerde, dallardan asılır vaziyette veya sıçrama vaziyetinde beklerler. Avları uçarak onlara yaklaştıklarında ani bir sıçrama hareketiyle onları yakalarlar. Bu işlem iyi bir üç boyutlu görüş gerektirir.

Duyma

Bu duyu yılanlarda en gelişmiş duyulardan biridir. Yılanların vücutlarının dışında kulakları bulunmasa da, vücut içinde kulaklara sahiptirler. Bu sayede havadaki düşük frekanslı titreşimleri algılayabilirler. Fakat yılanlarda çok daha duyarlı bir duyma sistemi bulunmaktadır. Yılanlar aynı zamanda çeneleriyle duyarlar. Çeneleri genellikle yer ile temas ettiğinden, yerdeki titreşimleri algılayabilirler. Bu titreşimler çeneden kafatasına ve oradan da iç kulağa kadar iletilirler. Bu sayede avlarının gelişini daha avları oları görmeden hissederler.

Koklama, Tatma

Yılanların dilleri doğadaki en gelişmiş tat ve koku algılayıcılarından biridir. Yılanlar dilleri sayesinde havadaki molekülleri yakalayabilirler. Bu nedenle bu duyularına hem koklama hem de tatma duyuları denir. Dilleri ile yakaladıkları molekülleri, üst damaklarında bulunan Jacaobson's organı ile koku bilgisine dönüştürürler. Bu sayede çevrelerinde bulunan avları belirleyebilirler.

Dokunma

Sürüngenlerde bulunan en gelişmiş duyulardan biridir. Bu duyuları hareketlerinin sağlanması açısından son derece önemlidir. Çevrelerinde temas halinde bulundukları yerlerde meydana gelen en küçük değişiklikleri algılayabilirler. Bu duyuları sayesinde kas aktivitelerini çok çabuk değiştirebilirler. Hareketleri için gerekli olan dayanakları ve yerdeki çok küçük çıkıntıları algılayarak bunlara kuvvet uygulayabilirler.

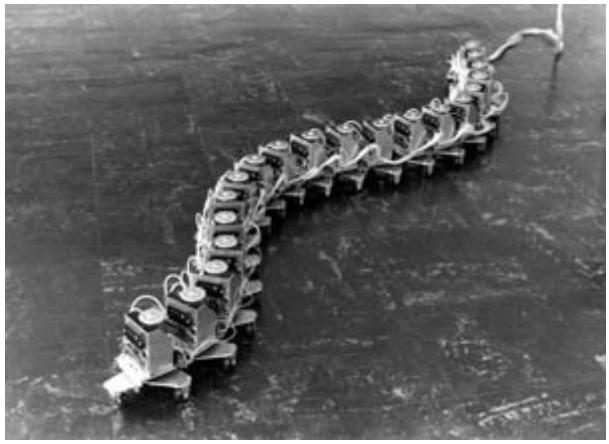
Isı Reseptörleri

Yılanların diğer bir duyuları da ısı algılama duyularıdır. Bu duyuları sayesinde avlarının ısılarını algılayarak yerlerini tespit edebilirler. Özellikle gece avlanmaları sırasında bu duyularını kullanırlar. Bu duyuları çok hassas işlemektedir. Kör bir engerek yılanı, vücut ısısı çevre ısısından 10^0 yüksek olan bir fareyi 70 cm mesafeden algılayabilir.

3. YILAN ROBOTLAR

3.1 İlk Robot Yılan Kavramı

1972 yılında Japon bilim adamı Shigeo HIROSE ilk yılan tipi robotu imal ederek (ACM III), biyolojik yılanların uyguladığı yanal dalgalana tipi hareketi yapmasını sağlamıştır. Bu robot 40 cm/s hıza çıkabilmektedir. Yılan 20 ekleme sahiptir ve toplam boyu 2 metredir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: ACM III

Her eklemde sağa ve sola dönebilen servo mekanizmalar bulunmaktadır. Sistemin yer ile teması için her uzvun altına tekerlekler yerleştirilmiştir. Tekerleklerin dönme yönünde çok az direnç uygulamaları, yanal doğrultuda ise çok büyük direnç uygulamaları sayesinde sistem hareket edebilmektedir. İleri itici hareket, baş eklemine verilen sinusoidal eğilme hareketi ile sağlanmıştır. Bu hareket daha sonra baştan en arka ekleme doğru sabit bir hızla kaydırılmıştır. Bu yöntem uygulandığı zaman, gövde bir bütün olarak geriye doğru yayılan bir dalga formu almaktadır. Tekerleklerin zeminde dönebilmesi ve bahsedilen sürtünme farkından dolayı sistem tıpkı bir yılan balığının suda ilerlemesi gibi akıcı bir hareket yapabilmektedir **(Hirose, 1993), (Hirose ve Umetani, 1976)**.

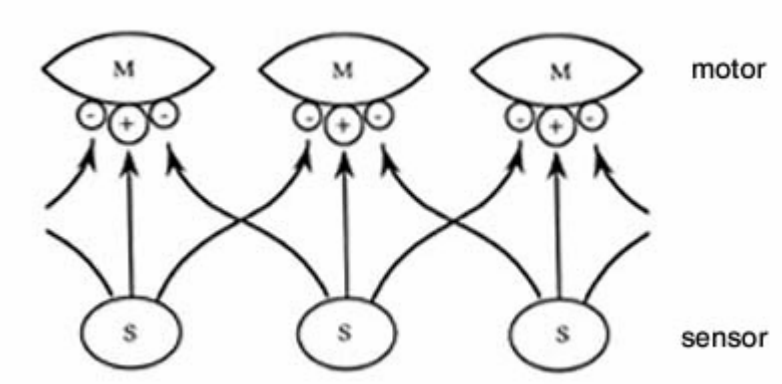
Şekil 3.2 de robotun iki tarafına düğme tarzında dokunma algılayıcıları takılarak yapılan hareketler göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 3.2: ACM III' ün Dokunma Algılayıcıları ile Yaptığı Farklı Hareketler, (a) Bir cisim etrafına sarılma, (b) Sürekli bir yolda hareket

Kol bacak gibi uzuvları bulunmayan bir sistemde hareket etmek için dokunma algılayıcılarının bulunması zorunludur. Fakat algılayıcının dokunduğu eklemin bilinmesi ve bu eklemin hareket ettirilmesi yeterli değildir. Burada Hirose, sinir ağına benzer ve komşu motorlarla da etkileşim halinde olan bir algılayıcı sistemi geliştirilmiştir (Şekil 3.3).



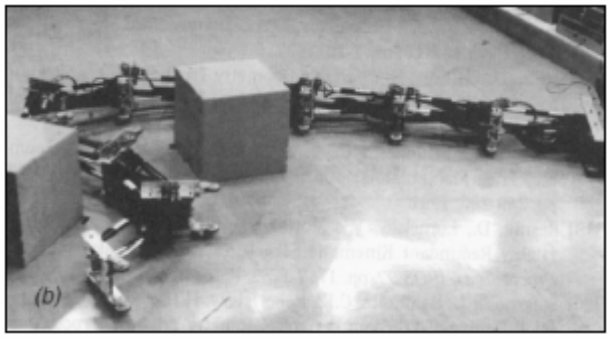
Şekil 3.3: ACM III'ün Algılayıcı-Motor Etkileşimi

3.2 Diğer Yılan Tipi Robotlar

Düzlemde yılan tipi hareketleri kullanarak ilerleme gerçekleştiren yılan tipi robotlar literatürde mevcuttur. Bu robotlar yer düzleminde yanal dalgalanma hareketini uygularken, altlarında bulunan tekerleklerdeki sürtünme farklarından yararlanırlar. Tekerleksiz prototipler ise düşey düzlemde kayan dalga hareketi ile ilerleme sağlarlar.

3.2.1 Burdick ve Chirikjian

Joel Burdick ve öğrencisi Greg Chirikjian'ın ürettikleri robot prototipin 3 er serbestlik dereceli 10 uzvu bulunmaktadır (Şekil 3.4).



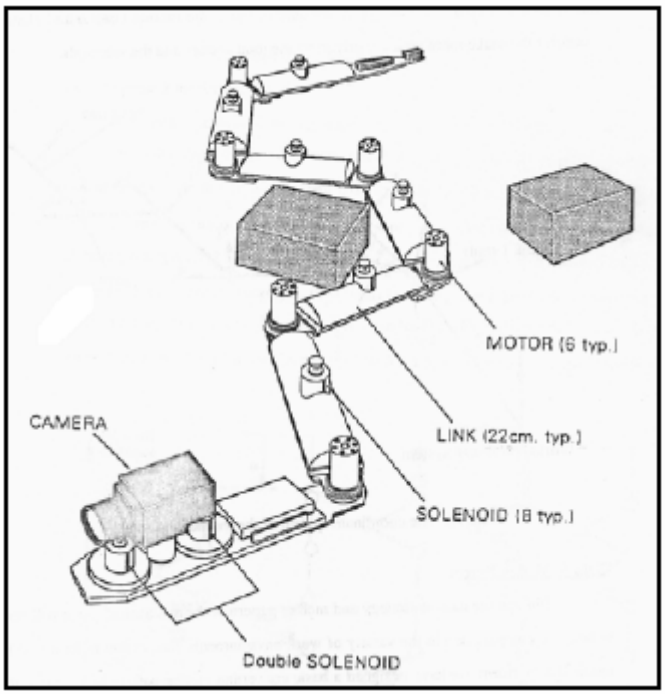
Şekil 3.4: Robot Yılan (Burdick ve Chirikjian)

Her uzuv 3 adet prizmatik ekleme sahiptir. Yani her bölüm bir paralel manipülatördür. Prizmatik eklemler doğru akım servo motorları ve bunlara bağlı vida mekanizmaları ile oluşturulmuştur. Her eyleyicinin uzunluğu 30 ila 46 cm arasında değişebilmektedir. Her eyleyicide, konum bilgisini ölçmek için bir lineer potansiyometre bulunmaktadır. Sistemin yer ile olan temas kısmına tekerlekler konularak sürtünmeler ayarlanmıştır **(Chirikjian ve Burdick, 1993)**.

Chirikjian yılan tipi manipülatörlerin kinematiği ve hareket planlaması üzerine çalışmıştır. Burada çevre koşullarına göre ayarlanmış olan uç noktanın konumu bir eğri ile temsil edilmekte, daha sonra bu eğri üzerine rijit uzuvların giydirilmesiyle sistemin konfigürasyonu belli edilmektedir. Yılan robotta konfigürasyon oluşturulmasında da bu yöntem kullanılmıştır.

3.2.2 Shan

Shan'ın çalışmasında kullandığı robot prototipinde 1 serbestlik dereceli yedi eklem bulunmaktadır. Her bir eklemde tahrik vermek için doğru akım servo motorları kullanılmıştır (Şekil 3.5).



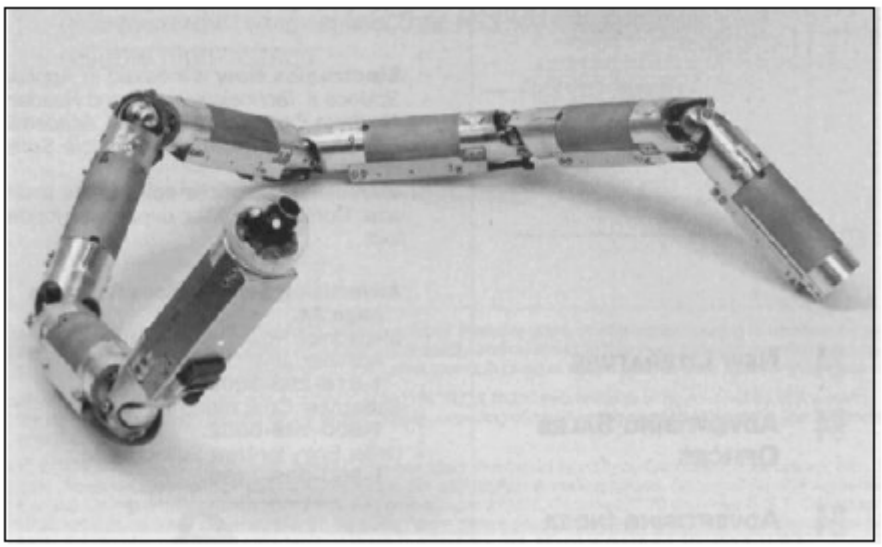
Şekil 3.5: Robot Yılan (Shan)

Robotun her bir uzvunda birer selenoid bulunmaktadır. Aktif hale getirildiklerinde yer ile temas ederek (yere saplanarak) bulundukları uzvu sabitlerler. Bu sistemin kurulmasındaki amaç robota akordeon tipi hareket yaptırmaktır. Robot bu hareketi kullanarak çalışma alanındaki cisimlerden kendini sakınmaktadır.

Robotun bir uzvunun kalınlığı ile uzunluğu arasındaki fark büyük olduğundan, çalışma alanının oldukça geniş olması gerekmektedir. Robot dar aralıklarda çalışamamaktadır **(Shan ve Koren, 1993)**.

3.2.3 Ikeda ve Takanashi

1995 yılında Japon elektronik firması NEC tarafından üretilen bu prototip 3 boyutlu hareket etmek üzere tasarlanmıştır. Tasarlanmasındaki amaç deprem, toprak kayması gibi doğal afetlerde, yıkıntılar içerisine gönderilerek canlı aranmasıdır. Uzuvları birbirine tahrikli üniversal eklemler ile bağlıdır. 7 uzuvlu bir yapı şekil 3.6 da görülmektedir **(Ikeda ve Takanashi, 1987), (NEC, 1996)**.

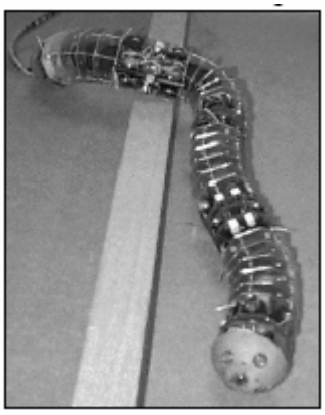


Şekil 3.6: Robot Yılan (Ikeda ve Takanashi)

Sistemin ucuna bir video kamera yerleştirilerek kullanıcıya konum bilgisi sağlanmıştır. Robot düşey düzlemde kayan dalga hareketiyle ilerleyebilmektedir.

3.2.4 Paap

Karl Paap ve Almanya GMD'de ki gurubu, gerçek zamanlı kontrol uygulamalarını denemek için bir yılan tipi robot geliştirmişlerdir. Bu robotta kısa bölümler birbirlerine kablo sarımları ile bağlanmışlardır. Yılanın eğri oluşturması tendon benzeri bu kablo mekanizması ile sağlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Robot Yılan (Paap)

Mekanizma daha çok solucan tipi kısalma ve uzama hareketi yapmaktadır. Her eklemde kablo sisteminin bulunduğu yerler, robotun aldığı eğriye uyamamaktadır. Robot bu nedenle üretilen diğer yılan tipi robotlara oranla daha az bir çalışma alanına sahiptir **(Paap ve Diğ., 1996)**.

3.2.5 IS Robotics

IS Robotics firması, boru kavrama işlemlerinde kullanmak ve yılansı hareketi göstermek için bir yılan tipi robot üretmiştir (Şekil 3.8).



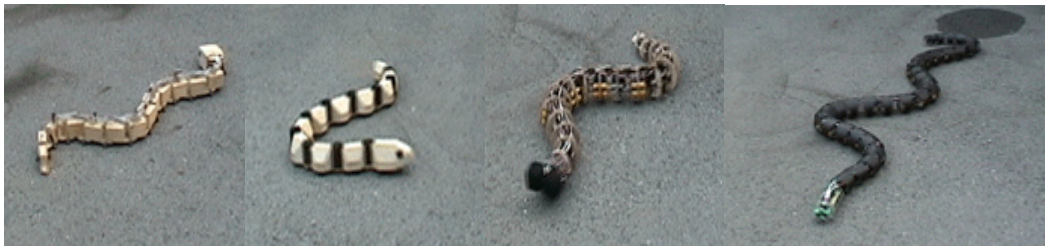
Şekil 3.8: Robot Yılan (IS Robotics)

Robotun toplam boyu 76 cm dir. Robotun ortasında bulunan bölüm, hesaplayıcı işlemlerin yapıldığı ana bölümdür. Robotun 19 eklemi bulunmaktadır. Her bir uzvun üzeri boru sistemlerine daha rahat tutunabilmesi için yüksek sürtünme katsayısına sahip lastik yapılarla kaplanmıştır. Her eklemde radyo kontrollü servo motorlar bulunmaktadır. Her motor en fazla 1.65 kg-cm dönme momenti uygulayabilmektedir.

Robot şekil 3.8 de gösterildiği konfigürasyonu ile hareket edememektedir. Robotun eklemlerinin bir serbestlik derecesi olması dolayısıyla robot düşey düzlemde kayan dalga hareketiyle ilerleyebilmektedir **(Desai ve diğ., 1995)**.

3.2.6 Miller

Gavin Miller'in ürettiği robot prototiplerin ilerleme yöntemi Hirose'nin kullandığı yöntemle aynıdır. Miller kontrol donanımında ve gövde tasarımlarında yaptığı iyileştirmelerle, düz yüzeylerde çok hassas yılansı hareketler elde etmeyi başarmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Robot Yılanlar S4, S5, S6, S7 (Miller)

Bu tasarımlar tekerlekli yapılara sahiptirler ve düzlemde yanal dalgalanma hareketinin yanı sıra diğer robot prototiplerden farklı olarak yanal kaymalar ile hareketi de oluşturabilmektedirler. Prototiplerde birer uzaktan kumanda modülü bulunmaktadır. Güç ünitelerinin robotların üzerlerine entegre edilmesiyle kablo bağlantısız bir tasarım elde edilebilmiştir **(Miller, 1989)**.

4. YILAN ROBOT TASARIMI

Bu çalışmada, tekerleksiz yılan tipi sürünme hareketi elde edilmesi amaçlanmış ve iki adet yılan tipi robot prototipi üretilmiştir. Üretilen iki prototipte de tekerlek mekanizması bulunmamaktadır. Robotların, gövdesi ile yer arasındaki sürtünme kuru sürtünmedir. Prototip, dayanaklarla modüllerin temas ettiği noktalara uyguladığı yanal kuvvetlerle hareket etmektedir. Bu dayanaklar, tekerlekli bir robot için engebeli bir yüzey anlamına gelirken, bu çalışmada üretilen robot prototipleri için hareketin oluşmasında bir koşul teşkil etmektedir. Doğadaki yılanlar da eklem ve kas yapılarının çok hassas olması nedeniyle, çevrelerindeki taş, çimen… vb. nesneleri birer dayanak olarak kullanabilmektedirler.

Üretilen iki prototipten ilkinde yanal kuvvet iki farklı şekilde oluşturulmaktadır. Bunlardan birincisinde bir yanal itki mekanizması kullanılmış, ikincisinde ise yanal kuvvet yalnızca eklemlerdeki dönme hareketi ile sağlanmıştır. Üretilen ikinci prototip ise eklemlerdeki dönme hareketini kullanarak sağlanan ilerlemeyi daha hassas yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Eklem sayısının birincisine göre daha fazla olması, tamamen farklı bir hareket oluşturulmasını sağlamıştır. Bu hareket, yerçekimine karşı yapılan düzlemsel kayan dalga hareketidir.

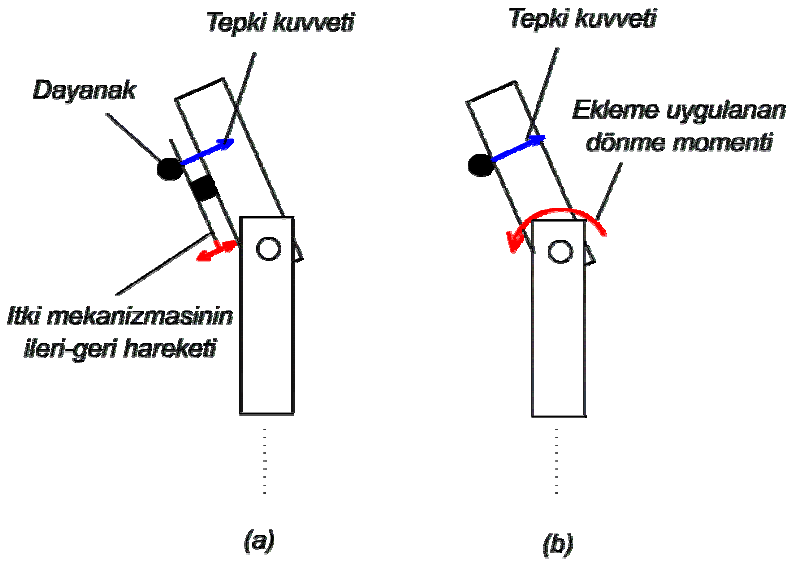
4.1 Yanal İtki Mekanizması Kullanarak Hareket

4.1.1 Yanal Kuvvet İlkesi

Doğadaki canlılar eklemlerindeki dönme hareketlerini, çeşitli mekanizmalar yardımıyla gövdelerinin doğrusal hareketine dönüştürürler. Bu işlemde kullandıkları mekanizmalar genellikle sahip oldukları uzuvlardır. Yılanlarda, vücutları boyunca kol, bacak gibi bu tip uzuvlarının bulunmayışı, onları çevrelerinde bulunan dayanaklara vücutlarının yardımıyla kuvvet uygulayarak hareket etme yoluna itmiştir.

Bu çalışmada bu tip yanal kuvvetler uygulanarak, yılana benzer yapıdaki bir robotun, eklemlerindeki dönme hareketlerini nasıl gövdenin doğrusal hareketine çevirebildiği gösterilmiştir. Gövde boyunca üç veya daha çok dayanağa aynı anda yanal kuvvet uygulayan robotta, dayanaklardan gelen tepki kuvvetlerinin istenen hareket yönündeki bileşenleri sayesinde sistem hareket ederken, kalan bileşenleri sistemin yörüngeden sapmaması için dengelenmektedir. Burada en önemli husus hareketi sağlayan bu yanal kuvvetlerin, çevredeki dayanaklara nasıl bir yöntemle uygulanacağıdır.

Yukarıda belirtilen ilkelere göre hazırlanan ilk prototipte iki farklı hareket mekanizması uygulanmıştır. Bu iki mekanizmanın yapısı ve yanal kuvvetin uygulanma ilkeleri özet olarak şekil 4.1a ve şekil 4.1b de gösterilebilir.



Şekil 4.1: Yanal Kuvvetin Uygulanış Yöntemleri a) yanal itki mekanizması ile, b) eklem dönmeleri ile

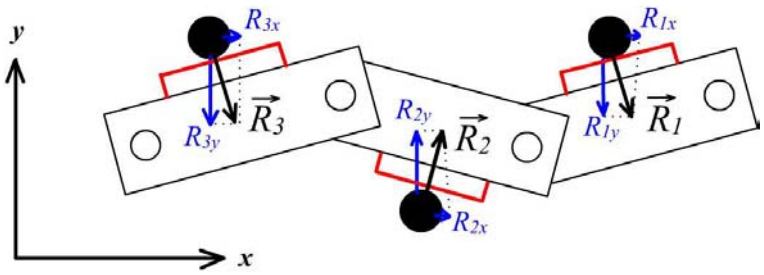
4.1.2 Hareketin Elde Edilmesi

Birinci prototip bir "çekmece" mekanizmasına sahiptir. Bu çekmece mekanizması bir doğru akım motoruna bağlı eksantrik mekanizması ile tahrik edilmektedir. Çekmece gövde dışına çıkarak bu yolla çevreye yanal kuvvetler uygulayabilmektedir (Şekil 4.1 a).

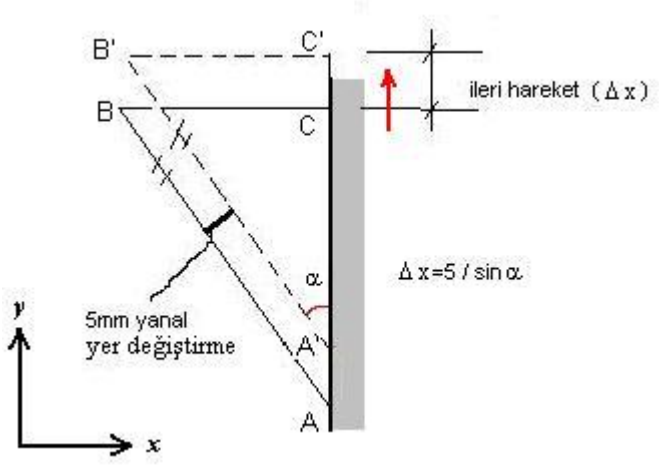
Çok eklemli mekanik zincirin, uzuvlarla temas halindeki dayanak noktalarına çekmece mekanizması ile bir itki yapmasıyla sistem üzerine etkiyen $\overrightarrow{R_1}$, $\overrightarrow{R_2}$, $\overrightarrow{R_3}$ tepki kuvvetleri oluşmaktadır (Şekil 4.2). Üç uzuvlu bir sistem uygun konfigürasyona geldikten sonra eklem açılarını sabitlediğinde ve burada siyah olarak gösterilen dayanaklar da yere sabitlenmiş olduğundan, çekmece mekanizmasıyla kuvvet uygulama sırasında yanal kuvvetler dengelenmektedir. İlerleme yönündeki kuvvet bileşenleri de sistemi hareket ettirmektedir.

$$\sum_{i=1}^{3} R_{iy} = 0, \;\; -R_{1y} + R_{2y} - R_{3y} = 0 \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$\sum_{i=1}^{3} R_{ix} > 0, \; R_{1x} + R_{2x} + R_{3x} = 0 \qquad \textbf{(4.2)}$$



Şekil 4.2: Çekmece Mekanizması ile Kuvvetlerin Elde Edilmesi



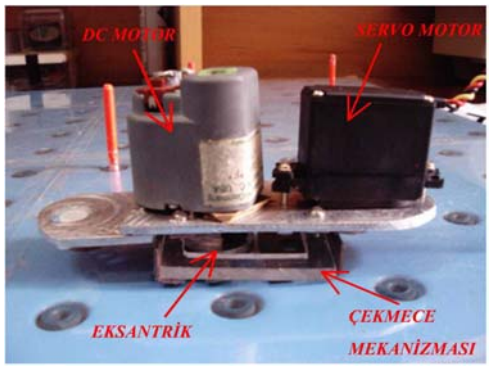
Şekil 4.3: Yanal İtki Mekanizması ile İlerleme

İleri hareketin oluşumunu gösterebilmek için şekil 4.3 teki sembolik gösterimde x yönündeki yer değişimin tamamen kısıtlandığı durumda α açısı ile yapılacak

5 *mm* lik bir yanal yer değiştirmenin hareket yönünde $\Delta x = \frac{5}{\sin(\alpha)}$ kadar bir yer değiştirmeye yol açacağı görülmektedir. Burada ABC üçgeninin $+x$ yönündeki hareketi kısıtlandığı için uygulanan 5 *mm* lik yer değiştirme, üçgeni $A'B'C'$ konumuna getirmiştir.

4.1.3 Gövde Modülleri ve Motorlar

Üretilen birinci prototipin bir uzvu ve yanal itki mekanizmanın yapısı şekil 4.4 te gösterilmiştir.



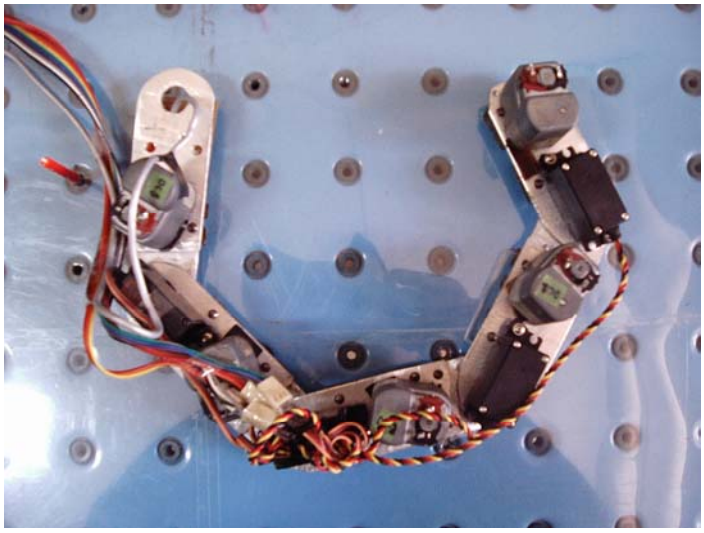
Şekil 4.4: Birinci Prototipin Uzuv Yapısı

Eksantrik mekanizması 5 mm yanal yer değişimi uygulayabilmektedir. Bu değer tamamen eksantrik mekanizmasının eksen kaçıklığına bağlıdır. Eksen kaçıklığını arttırmak, doğrudan sistemin boyutlarını etkilediğinden bu değer hem boyutları fazla büyütmeyecek, hem de hareketi rahatça gerçekleştirecek şekilde optimum bir değer olmalıdır. Bu hareket sırasında uzvun yerle olan kuru sürtünme kuvveti uzvun ileri doğru hareketi için gerekli dayanak tepki kuvvetinin oluşmasını sağlar.

Üretilen 5 uzuvlu ilk prototipin görünüşü şekil 4.5 teki gibidir. Üzerindeki motorlar ve kontrol donanımıyla birlikte bir uzvun özellikleri tablo 4.1 de özetlenmiştir.

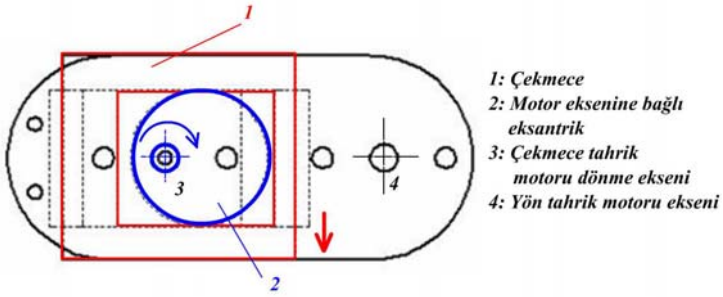
Tablo 4.1: Birinci Prototipin Özellikleri

Modül Ağırlığı [gr]		300
Boyutlar (en, boy, yükseklik) [mm]		40, 100, 60
Gövde Malzemesi		Alüminyum
Motorlar	**Çekmece**	DC motor (Buehler 1.61.013.306-8)
	Eklem	Servo motor (HITEC HS-475HB)



Şekil 4.5: 5 Uzuvlu Birinci Prototip

Eksantrik ve çekmece mekanizmaları pleksiglas malzemeden üretilmiştir.

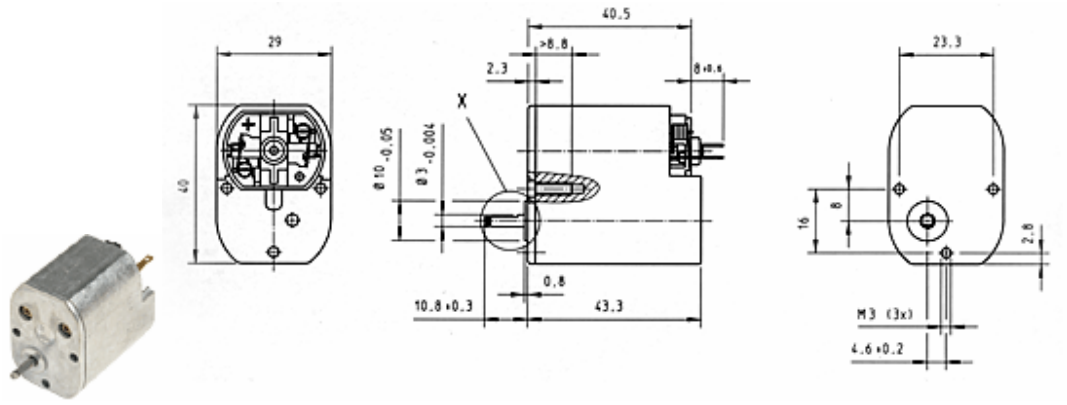


Şekil 4.6: Eksantrik Mekanizması

Bir uzuv aynı anda her iki yana da itme vermeyeceği için, her uzuvda tek bir eksantrik mekanizmasının bulunması yeterlidir (Şekil 4.6).

Sistemin yanal itme mekanizması kullanarak hareket etmesi için, öncelikle kuvvet bileşenlerinin doğru yönde oluşabileceği bir konfigürasyona gelmesi gerekmektedir (Şekil 4.2). Bu durum eğri uydurma bölümünde incelenecektir.

Birinci prototipte iki farklı motor kullanılmıştır. Bunlardan biri redüktörlü doğru akım motoru diğeri ise bir doğru akım servo motordur. Redüktörlü doğru akım motorları bahsedilen çekmece mekanizmasına hareket vermek için kullanılmıştır. Kullanılan redüktörlü doğru akım motorlarının yapısı ve özellikleri şekil 4.7 ve tablo 4.2 de özetlenmiştir.



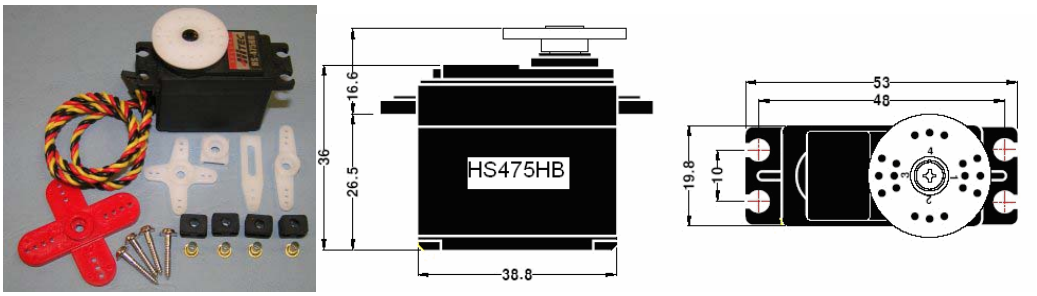
Şekil 4.7: Yanal İtki Mekanizması Motoru

Tablo 4.2: Eksantrik Mekanizması Motorunun Özellikleri

Özellikler (Buehler 1.61.013.306-8)	
Ağırlık [gr]	150
Çıkış Torku	20 N.cm @ 6 V
En Fazla Akım [mA]	320
Çevrim Oranı	241,6:1

Çekmece tahrik motorları eksantrik mekanizmasına dönme verdikleri için 360^0 lik bir dönmeye gerek yoktur. Eksen kaçıklığının tamamını itmeye çevirmek için $\pm 90^0$ lik dönmeler ve motorların yalnızca dönme yönlerini kontrol etmek yeterli olmaktadır. Bu motorlara yön vermek amacıyla bir L293D tümleşik devresi kullanılmıştır. Motorların hızları ise darbe aralığı ayarlama (Pulse Width Modulation) yöntemiyle ayarlanmıştır.

Eklemlere dönme vermek amacıyla, HITEC® marka HS-475HB tipi servo motorlar kullanılmıştır. Bu motorların yapısı şekil 4.8 de görülmektedir. Motorların özelikleri tablo 4.3 de özetlenmiştir.



Şekil 4.8: Servo Motorlar

Tablo 4.3: Servo Motorların Özellikleri

Özellikler (HS475HB)	
Boyutlar [mm]	38,8 x 19,8 x 36 mm
Ağırlık [gr]	40 g
Çıkış Torku [kg.cm]	4,4 kg.cm @ 4.8 V
	5,5 kg.cm @ 6 V
Çalışma Hızı	0.23 s/60° @ 4.8 V
	0.18 s/60° @ 6 V

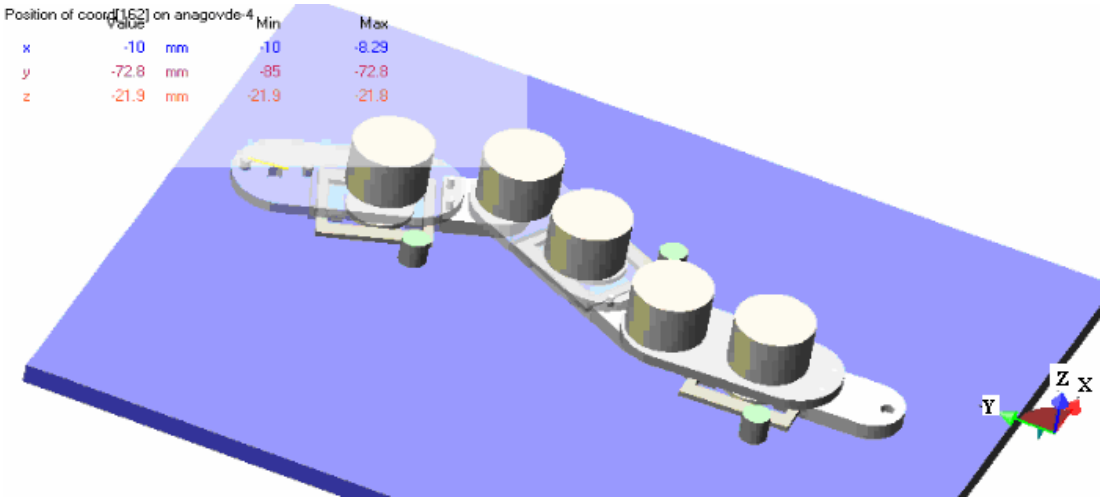
Eklem motorları olarak servo motorların seçilmesinin nedenleri şu şekilde özetlenebilir:

- Ağırlıklarına göre uyguladıkları dönme momenti değerleri oldukça yüksektir.
- Motorlar kendi içlerinde dişli kutularına sahiptirler
- Bu motorların maliyeti, ayrı ayrı doğru akım motor ve dişli kutusu takımlarının maliyetlerine oranla daha düşüktür.

Yılanların eklem sayılarının fazla olması, eklem başına düşen dönme miktarını da azaltmaktadır. Ancak üretilen birinci prototipin eklem sayısının yalnızca dört olması, eklemlere $\pm 90^0$ lik dönme verilmesini gerektirmiştir.

4.1.4 Benzetim

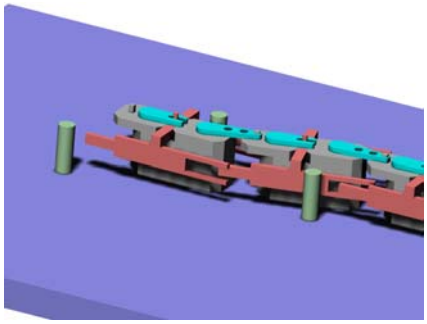
Yanal itki mekanizmasıyla hareket bölümünde anlatılan hareketin elde ediliş biçimi önce bir benzetim ile denenmiş (Şekil 4.9), daha sonra bu hareket prototip üzerinde de gösterilmiştir. Benzetimde kullanılan katı modeller SolidWorks® programında çizilmiş, benzetim de MSC Visual Nastran® 4D programında yapılmıştır.



Şekil 4.9: Yanal İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Benzetimi

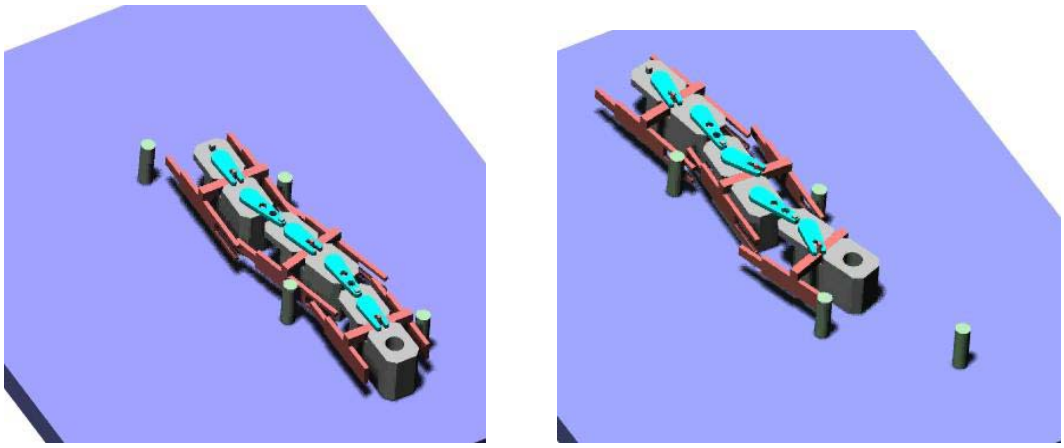
Benzetimde dayanaklarla temas açıları yaklaşık 25^0 olarak alınmıştır. Buna göre sistem *y* ekseni boyunca 12,2 mm ilerleme sağlamıştır. Böyle bir itki sisteminde, kısa bir itme sağlandıktan sonra, sistem dayanaklarla teması kaybetmektedir. Bunun için yeni bir itki sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemde çekmece mekanizmaları, yılan

boyunca birbirlerinin içinden geçecek şekilde tasarlandığından, bir çekmece mekanizması dayanakla olan temasını kaybetmeden önce, ardından gelen mekanizma aynı dayanakla temasa başlamaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: İç İçe Geçen Yanal İtki Mekanizması Çubukları

Bu sayede sistem, arkasında bir dayanağı bırakarak bir yenisi ile temasa başlayabilmiştir. Bu da hareketin sürekli olmasını sağlamaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Dayanak Atlaması

4.1.5 Kontrol Donanımı

Kontrol donanımının seçiminde, ileride tamamen kablosuz uygulamalarda kolaylık sağlaması amacıyla, mümkün olan en basit uygulamalara gidilmiştir. Tüm kontrol algoritmaları Matlab® R12 ortamında hazırlanmıştır.

4.1.6 Seri İletişim

Kablosuz uygulamalarda kolaylık sağlaması amacıyla, tüm kontrol verilerinin bilgisayardan sistem üzerinde bulunan mikro kontrolörlere ve algılayıcı bilgilerinin

ise mikro kontrolörlerden bilgisayara iletilmesinde bilgisayarın 9 uçlu seri portu kullanılmıştır.

Bir bilgisayarın seri portunun yapısı ve kullanılan uçların özellikleri Ek-A'da verilmiştir.

Bilgisayarın seri portundan bilgi alıp vermek için, Matlab yazılımının seri çıkış erişim komutları kullanılmıştır. Mikro kontrolörler ve bilgisayar arasındaki iletişim hızı 2400 Baud olarak kullanılmıştır. Seri iletişim asenkronize formatta gerçekleşmektedir. Ayrıca bilgisayar seri çıkışının "Full Duplex" yapıda olması aynı çıkış üzerinden, aynı anda hem veri alınmasını hem de veri verilmesini olanaklı kılmıştır.

4.1.7 Servo Motor Sürücü Devresi

Sistemin her bir eklemine dönme verebilmek amacıyla birer servo motor kullanılmıştır. Servo motorların çalışması, motorların kontrol ucuna belirli aralıklarda atımsal sinyallerin gönderilmesi esasına dayanmaktadır. Servo motorlar bu atımların frekansını kendi üzerlerinde bulunan devreler ile ölçebilmekte ve bu frekans değerine göre açısal konum almaktadır. Bu nedenle servo motorları sürmek için çeşitli frekanslarda atımlar verebilen bir devre kullanılması gerekmiştir. Bu işlem, bir PIC mikro kontrolör ve mikro kontrolör çalışma devresi ile sağlanmıştır. Devrenin yapısı ve devre elemanlarının listesi Ek-B' de verilmiştir.

Devre üzerinde seri portun 3. ucuna bağlı bir seri giriş, toprak girişi ve besleme girişi bulunmaktadır. Motor için ise toprak, besleme ve sinyal çıkışları bulunmaktadır.

4.1.8 PIC 16F84A Mikro Kontrolörler

Bilgisayar ve sistemin eklemleri arasındaki seri iletişim her bir eklemde bulunan mikro kontrolörler aracılığı ile sağlanmaktadır. PIC 16F84A tipi mikro kontrolörler 4MHz çalışma frekansı desteklemesi nedeniyle en fazla 2400 Baud seri iletişim hızını sağlayabilmektedirler. Bu iletişim hızı mevcut eklem sayılarında yeterli olmakla beraber, daha fazla eklemli prototiplerin üretilmesi sonrasında yeterli olmayabilir, çünkü daha fazla eklem, motorlara giden ve algılayıcılardan toplanan

daha fazla veri anlamına gelmektedir. Buna rağmen bu tip kontrolörlerin kullanılmasının nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Mikro kontrolörlerin boyutlarının küçük olması, modül tasarımında boyutların küçültülebilmesini sağlamaktadır.
- Programlanmaları kolaydır. Assembler dili ile 35 komut kullanılarak programlama yapılabilmektedir.
- Çalışma devrelerinin (osilatör devresi) basit oluşu, uygulamaların kolaylıkla gerçekleştirilmesi ve arızaların kolaylıkla giderilebilmesini sağlamaktadır. Devre kartlarının üretim maliyetleri düşüktür.
- Boyutlarının küçük olmasına rağmen, asenkronize yapıda seri iletişimi desteklemektedirler.

PIC 16F84A tipi mikro kontrolörlerin yapıları ve genel özellikleri Ek-C' de verilmiştir.

Her eklemde bir mikro kontrolör kullanılmasının en önemli nedeni modülerliktir. Bir mikro kontrolörde meydana gelebilecek çalışma hatası veya program hatası diğerlerinin çalışmasını etkilemeyecektir. Ayrıca, mikro kontrolörlere gönderilen referans motor açı değerleri de kontrolör içerisinde, yeni bir değer gelmediği sürece saklanmakta ve motora bu açı değerini sürekli olarak beslemektedir. Bu da, aşırı zorlanmadan dolayı meydana gelebilecek yanlış eklem açı değerlerinin zorlanma ortadan kalkar kalkmaz mikro kontrolör tarafından düzeltileceği anlamına gelmektedir. Bu yolla, motor ve mikro kontrolör arasında bir çevrim oluşturulmuştur.

Mikro kontrolörler içerisindeki programlar "Pic Basic Pro" derleyicisinde hazırlanmıştır. Program yazma editörü olarak "Micro Code Studio" ve programlama arayüzü olarak ta "JDM Programmer" kartı ve bunu destekleyen "IC-Prog" arayüz programı kullanılmıştır.

4.1.9 Doğru Akım Motoru Sürücü Devresi

Yanal itki motorları eksantrik mekanizması ile çekmece mekanizmasına hareket verdiklerinden, temas halinde oldukları dayanakların konumlarına göre dönme yönü değişmelidir. Ayrıca motorlara hız kontrolü de yapılmalıdır. Motorların dönme hızı

direkt olarak çekmece mekanizmasının hızını değiştireceğinden tüm sistemin hızı da buna bağlı olarak değişecektir.

Doğru akım motorları, belirli yönlerde sürekli veya kesikli olarak sürmek için L293D tipi motor sürücüleri kullanılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: L293D Doğru Akım Motoru Sürücüsü

Bir L293D tipi motor sürücüsü ile 2 adet doğru akım motoru sürülebilmektedir. Bu tümleşik devrelerin özellikleri Ek-D' de verilmiştir.

Tümleşik devrenin bir yüzünde bulunan iki kontrol giriş/çıkış ucundan birinin tetiklenmesi ile motor sağa veya sola dönmektedir. Bu uçların lojik 1 veya 0 olarak tetiklenmesi, bilgisayarın paralel portu ile sağlanmıştır.

Üretilen ilk prototipin, çekmece mekanizması kullanarak yaptığı hareket benzetimlerde görülen üç uzuvlu bir mekanizma ile sağlanmıştır. Bu mekanizma üzerinde iki adet Servo motor ve 3 adet doğru akım motoru bulunmaktadır. Doğru akım motorlarının sağa ve sola döndürülmesi için 6 adet tetikleyici uca ihtiyaç vardır. Tetikleyici kontrol uçları olarak bilgisayarın paralel portunda bulunan 8 veri ucunun 6 adedi kullanılmıştır. Bilgisayarın paralel portuna erişim için Delphi® bilgisayar programı kullanılarak bir arayüz yazılımı yapılmıştır. Bu yazılımda paralel portun istenilen uç veya uçları, istenilen darbe aralıklarında tetiklenebilmektedir.

Doğru akım motorlarının hızını kontrol etmek için darbe genişliği ayarlama (Pulse Width Modulation) yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan yazılım ile doğru akım motor sürücü tümleşik devresinin kontrol uçlarına sürekli olarak veya belirli darbe genişliklerinde lojik 1 veya 0 değerleri gönderilmiştir.

4.1.10 Kontrol Algoritması

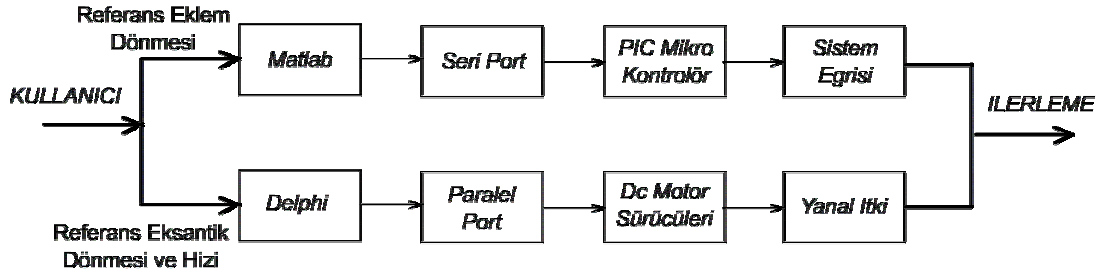
İlk prototipte yanal itki mekanizması kullanılarak oluşturulan harekette, 3 modül için, 2 servo ve 3 adet doğru akım motorun kontrolü yapılmıştır.

Yapılan seri iletişim asenkronize formattadır. Matlab®'in seri arayüz komutları da, yeni bir komut satırı girilmedikçe, ilk haliyle asenkronize formatta çalışmaktadır. Matlab de kullanılan seri arayüz komutlarının listesi ve kısa açıklamaları Ek-E' de verilmiştir.

İlk prototipin uzuv sayısının az olması ve dolayısıyla kontrol edilecek olan motorların az sayıda olması, hareket algoritmasının, hareketi oluşturacak şekilde, en basit haliyle kurulmasına olanak sağlamıştır. Sadece iki eklem motorunun (Şekil 4.2) sistemin dayanaklardan istenilen yönde tepki kuvveti alacak şekilde konumlanmasını sağlamak nispeten kolay bir işlemdir.

Bu tip bir hareket literatürde daha önce yapılan çalışmalarda benzetim ortamında gerçekleştirilmiş ve daha çok uzva sahip sistemler için ayrıntılı biçimde incelenmiştir **(Bayraktaroğlu ve diğ, 2000)**, **(Bayraktaroğlu ve Blazevic, 2004)**.

Sistemdeki genel kontrol akışı şu şekilde gerçekleşmiştir:



Şekil 4.13: Yanal İtki Mekanizmalı Birinci Prototipin Genel Kontrol Akışı

Bu hareket biçiminde sistemin gerekli konfigürasyonu alması ve itki mekanizmasının hareket sağlaması aynı anda gerçekleşmemektedir. Bu işlemler ardışık işlemler dizisi olarak uygulanmıştır. Sisteme önce dayanaklara göre hareketin oluşabileceği yaklaşık bir konum verilmiş, daha sonra da itki mekanizmalarına hareketiyle, tüm sistemin hareket etmesi sağlanmıştır.

4.2 Yanal İtki Mekanizması Kullanmadan Hareket

Benzetim ve prototip çalışmalarında sistemin ilerleme hareketinin elde edilmesine karşın, üretilme aşamasındaki zorluklar ve biyolojik sistemlere daha fazla benzerlik gibi kriterler göz önüne alınarak, üretilen sistemin basitleştirilmesi ve daha basit bir

mekanizma ile tüm sisteme hareket verilmesinin yolları araştırılmıştır. Buradan yola çıkılarak daha basit mekanik ve elektronik elemanlara sahip yılansı sürünme hareketi yapan sistemler üretilmiştir. Öncelikle mevcut üç uzuvlu sisteme iki yeni uzuv eklenerek sistem 5 uzva çıkarılmış, daha sonra da yanal itki (çekmece) mekanizması sistemden çıkarılarak, sisteme farklı bir yoldan yanal tepki kuvvetlerinin etkimesi sağlanmıştır. Son olarak da tamamen yeni modüllere sahip ikinci prototip üretilerek, sistemin çok daha hassas hareket etmesi sağlanmıştır.

Yanal itki mekanizmasından vazgeçip, yeni bir mekanizma tasarlanmasının amaçları şöyle özetlenebilir:

- Yanal itki mekanizmaları uzuv boylarını doğrudan etkilemektedir. Bu da hareketin hassaslığını azaltmaktadır. Uzuvların uzun olması, dayanaklarla temas açısının hassasiyetini, dolayısıyla tepki kuvvetlerinin miktarlarını da etkilemektedir.
- Yanal itki mekanizmalarındaki, itki mekanizmasının dayanaklarla temasının sürekliliği sorunu, yeni tip tasarımla ortadan kalkar. Temas süreklidir ve temas yüzeyi tüm sistemin yan yüzeyidir.
- Yanal itki mekanizması ve dolayısıyla yanal itki motorlarının olmayışı, bir uzvun maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir.
- Daha az mekanik aksam ve motor içeren bir uzvun ağırlığı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu da sistemin yer ile olan sürtünme kuvvetini azaltmakta, böylece eklem motorlarına daha az yük binmektedir. Daha az döndürme momenti değerine sahip eklem motorları seçilebileceğinden, eklem motorlarının boyutları kayda değer biçimde küçülebilmekte, bu da daha küçük modüller tasarlanabilmesini sağlamaktadır.
- Yanal itki mekanizmalı sistemde bulunan doğru akım motorlarının yeni sistemde kullanılmayışı, sistemin elektronik yapısını basitleştirmektedir. Doğru akım motorlarını kontrol etmek için kullanılan paralel portun kullanımına gerek olmayıp, tüm iletişim seri çıkış üzerinden sağlanabilmektedir.
- Kontrol için gerekli olan bilgisayar yazılımları daha basit bir şekilde yapılabilmekte ve tüm kontrol işlemleri Matlab® ortamından yapılabilmektedir.
- Sadece eklemlerdeki açısal dönmeler ile çevreye kuvvet uygulanabilmesi, ileriki aşamalarda 3 boyutlu hareketin sağlanabilmesi bakımından önem taşımaktadır.

- Yeni tip hareket, doğadaki yılanların uyguladığı hareket biçimine daha yakın bir harekettir.

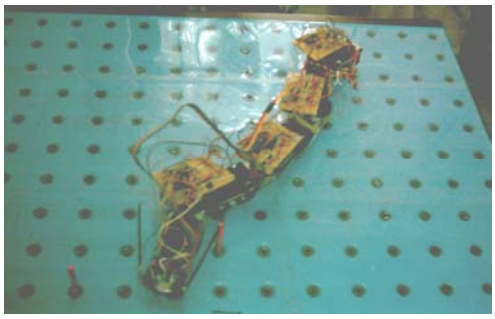
4.2.1 İyileştirme Çalışmaları

Yeni sistemde yanal kuvvetler, yalnızca eklemlerdeki dönme hareketleriyle sağlanmıştır. Bunun için öncelikle mevcut prototip üzerindeki bu mekanizmalar, mekanizmalara hareket veren motorlar ve elektronik donanımlar çıkarılmıştır. Yalnızca eklem motorları ve mevcut gövde yapısı kullanılmıştır. Hareket için gerekli olan kontrol yazılımları güncelleştirilmiştir. Ayrıca sisteme iki yeni uzuv eklenerek, uzuv sayısı beşe çıkarılmıştır. Çevredeki dayanakların durumlarına göre değişen yılan eğrileri elde etmek amacıyla kontrol yazılımına eğri uydurma algoritmaları eklenmiştir. Daha ileriki bir aşamada ise prototipin baş uzvuna dokunma algılayıcıları takılarak, sistemin önce uygun durumdaki dayanakları bulması, daha sonra da bulduğu dayanaklara göre kendi eğrisini oluşturması sağlanmıştır.

4.2.2 İtici Kuvvetin Oluşumu

Yanal itki mekanizması kullanan prototipin hareketi, doğrusal olarak hareket ederek, gövde dışında bulunan bir dayanağa kuvvet uygulayan bir "çekmece" mekanizması tarafından sağlanıyordu. Hâlbuki doğada yaşayan hiçbir canlıda doğrusal olarak hareket eden bir uzuv bulunmaz. Bütün canlılarda, oluşan doğrusal vücut ilerlemesi, dönel olarak çalışan mekanizmaların uygun yönde kuvvet bileşeni oluşturması yoluyla ortaya çıkmaktadır.

İyileştirme çalışmaları sonucunda birinci prototipin geldiği son durum şekil 4.14 de gösterilmektedir.

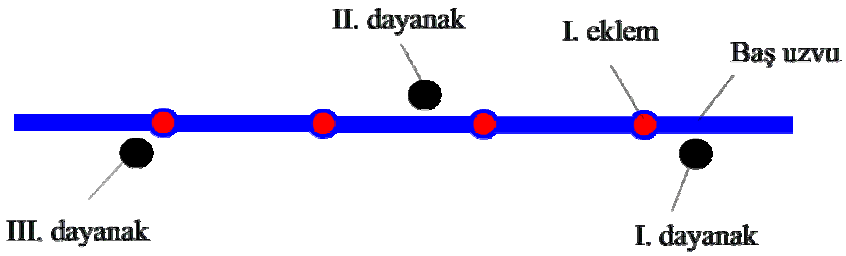


Şekil 4.14: Yanal İtki Mekanizmasız Birinci Prototip

İlerleme, eklemlere uygulanan dönme ve açısal hızlarla sağlanmıştır. Sağlanan bu hareketin oluşumunda etkili olan unsurlar şunlardır:

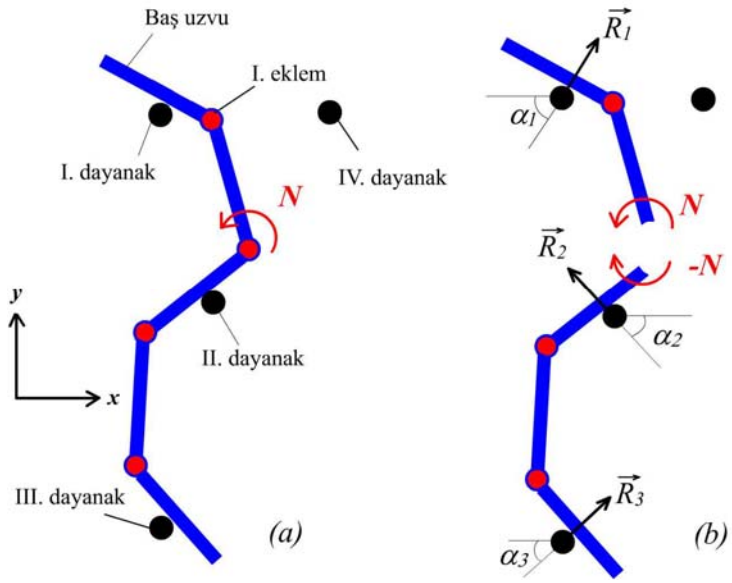
- Yılanın, istenen temas açılarıyla dayanaklara temas etmesi: Temas açısı değiştikçe, yanal ve ilerleme doğrultularında ki kuvvet bileşenleri değişmektedir.
- En öndeki dayanakla temas halinde olabilecek olan uzvun doğru yöndeki dayanağa kuvvet uygulaması: Burada, en öndeki dayanakla temas halinde olabilecek olan uzuv yalnızca harekete başlangıç durumunda baş uzvundan farklı bir uzuv olabilir çünkü hareket devam ettiği sürece her uzuv sırası geldiğinde baş uzvunun önceden sahip olduğu konumda bulunmalıdır. Bu eklem ayrıca doğru yöndeki dayanaklara kuvvet uygulamalıdır. Burada yanal kuvvetlerin oluşumu incelenirken, üç dayanaktan gelen tepki kuvvetlerinin yanal bileşenlerinin dengelenmesi şartı gözetilmelidir.

Bu durumlar şekil 4.15 ve şekil 4.16 üzerinde gösterilebilir:



Şekil 4.15: 5 Uzuvlu Bir Sistemin Dayanaklar Arasındaki İlk Konumu

Başlangıçta beş uzuvlu sistemin dayanaklar arasında bir doğru oluşturacak şekilde konumlandığını düşünebiliriz (Şekil 4.15). Sistem bu halden harekete hazır hale geçmek için, dayanakların durumlarına göre bir biçim almalıdır. Biçim almada gözetilen koşullar ve bu işlem için kullanılan algoritmanın yapısı "eğri uydurma" bölümünde verilmiştir. Burada kısaca ifade etmek gerekirse; sistem dayanaklar üzerinden geçen ve sinüs eğrisini andıran (burada dayanaklar yaklaşık eşit mesafelerde olduğu için) bir eğriye uymaktadır. İlerleme yönünün tersinde bir kuvvet bileşeni oluşmaması için bu eğrinin, dayanaklardan hareket yönünde bir miktar ötelenmiş olmasının gerekli olduğunu söyleyebiliriz. Sistem bu genel formu aldıktan sonra, eklemlere dönme momenti uygulayarak hareket sağlanmalıdır. Dönme momentlerinin yönlerinin seçiminde uygulanan yöntem şekil 4.16 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.16: 5 Uzuvlu Bir Sistemin Dayanaklara Göre Uygun Bir Konfigürasyonu: a) Dayanaklara göre Şekil Alma, b) Yanal Kuvvet Uygulama

Sistem, eğri uydurma işleminden sonra yaklaşık olarak şekil 4.16 (a) da ki biçimi almaktadır. Bu konuma gelindikten sonra, tüm eklem motorlarının kilitlenerek, zorlanma anında dahi sistemin eklemlerindeki açıyı koruduğu yani sistemin anlık olarak rijit durumda bulunduğu düşünülebilir. Bu durumdan sonra, hareketin elde edilmesi aşamasında bir eklem motorunun hareketteki görevinin gösterilmesi açısından sözgelimi ikinci eklem motoruna bir N döndürme momenti verildiği düşünülebilir. Bu döndürme momentinin yönü seçilirken, sistemin rijit olarak kabul edilen üst kısmının, birinci dayanağa dayanacak şekilde hareket etmesi gerekliliği gözetilebilir. Böylece sistemin uç kısmına saat yönünün tersi yönünde bir döndürme momenti verilmiş olur. Bu moment baş uzvunu I. dayanak ile temas ettireceğinden, baş uzvunun dayanakla temas açısına bağlı olmak suretiyle, bir $\vec{R}_1$ tepki kuvveti oluşur. Sisteme uyguladığımız N döndürme momenti nedeniyle, sistemin rijit olarak kabul edilen alt bölümüne de bir $-N$ tepki momenti uygulanmış olur. Bu moment de beşinci uzvu üçüncü dayanak ile temas ettireceğinden, gene uzvun dayanakla temas açısına bağlı olmak suretiyle, bir $\vec{R}_3$ tepki kuvveti elde edilir.

Temas yönlerinin ve açılarının doğru seçilmesiyle 1. ve 3. dayanaklardan;

$$\overrightarrow{R_1} = \begin{bmatrix} R_1.\cos\alpha_1 \\ R_1.\sin\alpha_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \overrightarrow{R_3} = \begin{bmatrix} R_3.\cos\alpha_3 \\ R_3.\sin\alpha_3 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

$+x$ ve $+y$ yönlerinde kuvvet bileşenleri olan tepki kuvvetleri elde edilir. $\overrightarrow{R_1}$ ve $\overrightarrow{R_3}$ tepki kuvvetlerinin $+y$ yönündeki kuvvet bileşenleri sistemi bu yönde hareket etmeye zorlarken $+x$ yönündeki kuvvet bileşenleri sistemi II. dayanağa doğru yaklaştırır. Daha önceden belirlenmiş olan temas açısı (α_2) nedeniyle sistem 2. dayanak ile temas ettiğinde,

$$\overrightarrow{R_2} = \begin{bmatrix} -R_2.\cos\alpha_2 \\ R_2.\sin\alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

tepki kuvveti oluşur. Bu tepki kuvvetinin $+y$ yönündeki bileşeni, 1. ve 3. tepki kuvvetinde olduğu gibi sistemi bu yönde harekete zorlarken, $-x$ yönündeki bileşeni ise 1. ve 3. tepki kuvvetlerinin x bileşenlerini dengelemektedir. Sonuçta:

$$R_{Ty} = \sum_{i=1}^{n} R_i.\sin\alpha_i \tag{4.5}$$

$$R_{Tx} = R_1.\cos\alpha_1 + R_3.\cos\alpha_3 - R_2.\cos\alpha_2 \tag{4.6}$$

toplam tepki kuvvetleri elde edilir.

Tepki kuvvetlerinin oluşması aşamasında ikinci ekleme, baş uzvunun I. dayanak ile temas edebilmesi amacıyla, saat yönünün tersi yönünde bir döndürme momenti uygulanmasının amacı IV. dayanak ile temas etmesi için tersi yönde bir döndürme momenti uygulanması durumunda, sisteme etkiyen tepki kuvvetlerinin dikey bileşenlerinin istediğimiz yönde oluşabilmesine karşın, yanal bileşenlerinin birbirini dengelememesi ve bir kuvvet çifti oluşturarak, sistemin tümünü saat yönünün tersi yönünde zorlayacak bir moment oluşturmasından kaçınmaktır. Doğru yönde

döndürme momentlerinin verilebilmesi için yanal kuvvetlerin birbirlerini dengelemesi şartı gözetilmiştir.

Sonuçta sistemin kontrol algoritmasına, başlangıçta giriş olarak verilen temas açıları (α_1, α_2, α_3) ve ardından sırasıyla uygulanan eğri uydurma ve motorlara kumanda etme işlemleri sonucunda, yanal bileşenleri birbirini dengeleyen ve hareket yönündeki bileşenleri ise sistemi bir yönde harekete zorlayan tepki kuvvetleri elde edilebilmiştir.

Sonuçta, yalnızca bir motora kumanda etme yoluyla sistem, eklemdeki açısal dönmeyi bütün sistemin doğrusal hareketine dönüştürebilmektedir. Doğada bulunan yılanların aynı anda birden fazla ekleminin dönme hareketi yapması gibi, bu çalışmada da üretilen iki prototipin hareketinde birden fazla motora aynı anda kumanda edilmektedir.

Birden çok motora kumanda edilmesi işleminde de aynı ilkeler kullanılmıştır. Anlık olarak hareket halindeki motor hariç, sistemdeki diğer motorların açıları sabit tutularak, sistemin diğer bölgeleri rijit olarak düşünülebilir. Böylece belirtilen hareket yöntemiyle sistemin hareketi sağlanır. Motorların yönlerinin seçilmesinde kullanılan bir diğer yöntem de tüm motorların hareket verdikleri uzuvları takip ettikleri uzuvların konumlarına getirmeleri şartının gözetilmesidir **(Choset ve Burdick, 1995)** .

Dönel hareketlerin, bir şekilde kuvvet bileşenleri yaratarak, bağlı oldukları sistemlere doğrusal hareket yaptırmaları, kam mekanizmalarındaki hareketlere benzetilebilir.

Biyologlar da bu benzetmeleri kullanarak doğadaki yılanların hareketlerini açıklamaya çalışmışlardır **(Moon ve Gans, 1998)**. Bu mekanizmalarda gerekli yerlerden yataklama yapılarak, istenmeyen kuvvet bileşenleri dengelenerek itki hareketi sağlanabilmektedir. Fakat mobil robotları böyle bir sabit mesnete yataklamak mümkün değildir. Burada, uzuvların birbirlerine göre bağıl açıları ve dayanaklarla yaptıkları açılar, bazı koşulları yerine getirecek şekilde seçilerek istenmeyen yanal kuvvetler karşı yanal kuvvetlerle dengelenebilmektedir.

4.2.3 Öndeki Uzvu Takip Etme ve Açıların İlgileşimi

Doğadaki yılanların yaptıkları hareketlerde, hareket sırasında tüm gövdenin başın izlediği yolu izlemesi ve bu sayede çok düzdün akıcı bir hareket edebilmesi, ancak her uzvun kendinden önce olan uzvu izlemesiyle mümkün olmaktadır.

Bu koşulu robot üzerinde sağlamak amacıyla açı verileri, kontrol algoritmasından sistemin üzerindeki mikro kontrolörlere (θ_n, n. eklemin açı değeri olmak üzere):

$$\theta_n(i) = \theta_{n-1}(i-1) \quad , \quad i = 1...n \tag{4.7}$$

koşulunu sağlayacak şeklinde iletilmektedir. Bu nedenle kontrol algoritmasında açı verileri üretilmesi işleminde ardışık iki eklemin bağlı oldukları uzuvlara göre açıları arasındaki fark hesaplanarak, daha geride olan eklemin mevcut açısına eklenmektedir.

Bir Δt süresi boyunca yapılan harekette açı verilerinin bir eklemden diğerine geçişleri tablo 4.4 de gösterilmektedir.

Tablo 4.4: Robot Boyunca Eklemlerdeki Açı Verilerinin Ötelenmesi

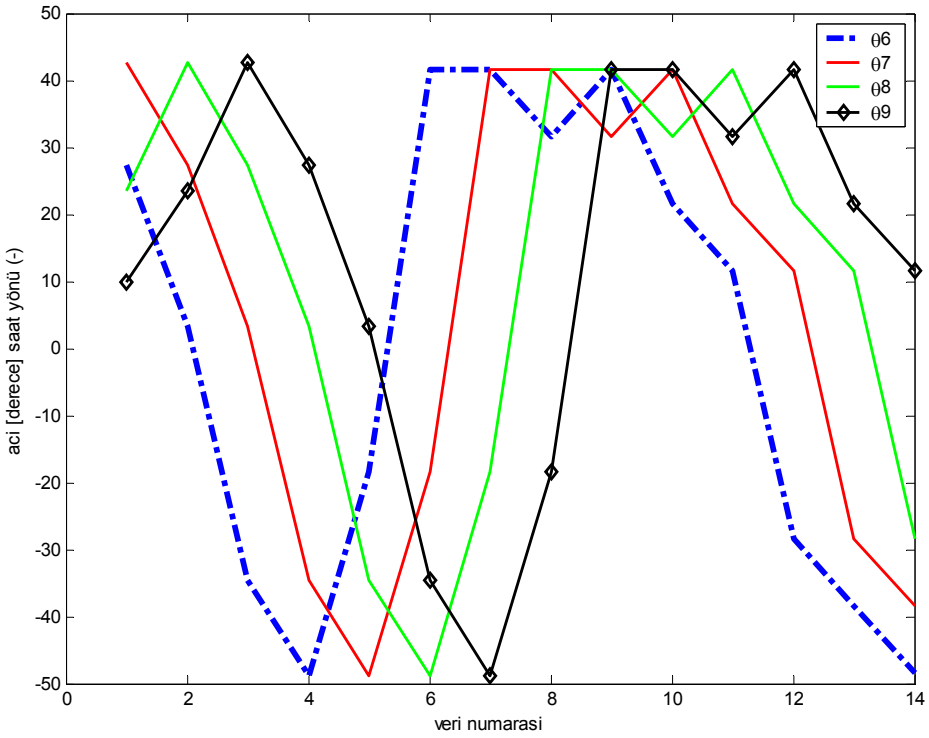
t	t_0	t_1	t_2	t_3
θ_1		θ_{1_1}	θ_{1_2}	θ_{1_3}
θ_2	θ_{2_0}	θ_{1_0}	θ_{1_1}	θ_{1_2}
θ_3		θ_{2_0}	θ_{1_0}	θ_{1_1}
θ_4	θ_{4_0}	θ_{3_0}	θ_{2_0}	θ_{1_0}
⋮	⋮	⋱	⋱	⋱
θ_{n-1}		θ_{n-2_0}	θ_{n-2_1}	θ_{n-2_2}
θ_n	θ_{n_0}	θ_{n-1_0}	θ_{n-2_0}	θ_{n-2_1}

Sistemin, başlangıçta dayanaklar arasında düz bir biçimde konumlandığını düşünürsek $\theta_i = 0^o \quad (i = 1...n,$ n=eklem sayısı) olduğu söylenebilir.

Sistemin temas halinde olduğu veya temas edebilecek durumda olduğu dayanakların konumlarına ve bu dayanaklarla yapılması istenen temas açılarına göre, $t = t_0$ anında

kontrol algoritmasının ürettiği açı verileri θ_{i_0} olarak gösterilebilir. Buna sistemin başlangıç durumunun konfigürasyonu denebilir.

Bu aşamadan sonra sistem hareket etmek için bahsedilen ilerleme algoritmasını kullanarak yeni motor açı değerleri üretmektedir. Sistem harekete başladığı andan itibaren baş uzvu, bir dayanakla temas halinde ise bu dayanaktan tepki kuvveti alacak biçimde dayanağa teması sürdürecek, eğer temas halinde değil ise yeni bir dayanak aramak için doğru yönlerde dönme hareketi yaparak bazı açı değerleri alacaktır. Sistemin kontrol çevrimine sürekli olarak beslenen yeni açı değerleri baş uzvunun bu işlemleri yaparken kullandığı açı değerleridir. Diğer eklemlerin tamamı öndeki eklem açısını takip etme hareketi yaptıkları için, tüm açı değerleri bir $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ hareket aralığında öndeki eklemlerden arkadaki eklemlere doğru kayar. Bu durumu tablo 4.4 de gösterebiliriz. $t = t_0$ anında 1. eklemin açı verisi olan θ_{1_0} değeri, $t = t_3$ anında 4. eklemin açı verisi olmuştur.

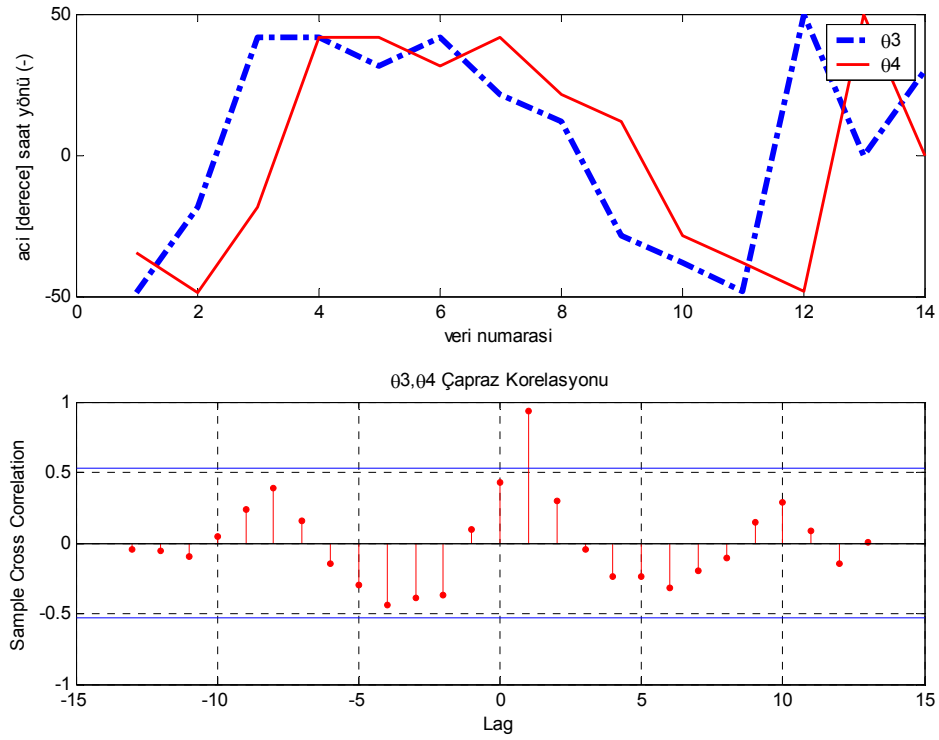


Şekil 4.17: Ardışık Dört Eklemin Açılarındaki Değişimin Karşılaştırılması

Şekil 4.17 de örnek olarak, sırasıyla 6, 7, 8, 9. motorlara (9 uzuvlu ikinci prototipin verisinden alınmıştır) verilen açı değerleri çizdirilmiştir. Burada düşey eksen açının

derece cinsinden değerini, yatay eksen ise motorlara hareketin başından sonuna kadar verilen açı verilerinin numarasını göstermektedir. Bu senaryo da 9 motor için toplam 14 er açı verisi üretilmiştir.

Ardışık açı verilerinin birbirine benzerliğinin bir ölçüsü olarak, verilerin birbirleri arasındaki çapraz korelasyonlarına bakabiliriz. Örneğin 3. ve 4. motor açılarının çapraz korelasyonu şu şekilde sonuç vermektedir (Şekil 4.18):



Şekil 4.18: Ardışık İki Eklem Açılarının Çapraz İlgileşimi

Ardışık eklemler, bir ilerleme adımı fark ile birbirlerini korelasyonları 1 olacak şekilde takip etmektedirler. Sonuçta bir eklem açısının bir ilerleme adımı sonunda, bir önceki eklem açısının değerine geldiğini söyleyebiliriz.

4.2.4 Eğri Uydurma

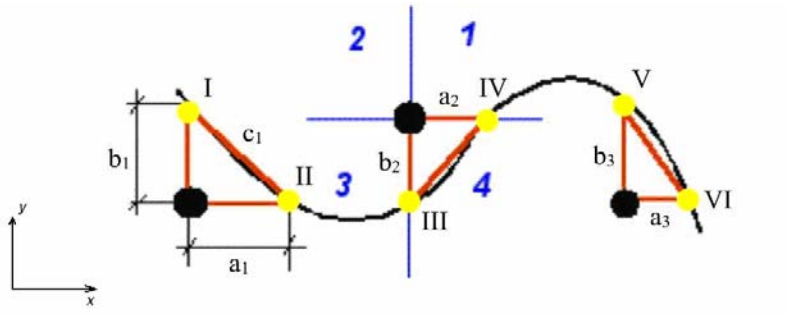
Doğadaki yılanlar hareketleri sırasında bazı kıvrılma biçimleri sergilerler. Bu kıvrılma biçimleri, eğer hareket düzgün bir yüzeyde gerçekleşiyorsa kafadan arkaya doğru ilerledikçe genişleyen bir sinüs dalgasını andırır. Bu şekilde kafa gövdeye göre daha az salınım yaparken, gövde de yaptığı salınımlar sayesinde sürtünme farklarını kullanarak hareket edebilmektedir **(Hirose, 1993)**. Bu tez çalışmasında incelenen

hareket, yüzeyle olan bu sürtünmeler sayesinde oluşan, çalışma ortamındaki dayanaklardan gelen tepki kuvvetlerine dayanmaktadır.

Sisteme dayanakların durumlarına göre başlangıçta ve hareket sırasında verilen eklem açılarının belirlenmesinde eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Doğadaki yılanların her koşulda sürekli uyguladıkları sabit bir eğrilerinin olmayışı, bu çalışmada dayanakların durumuna göre değişebilen eğrilerle robot üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır.

4.2.5 Eğri Uydurma Noktalarının ve Yönteminin Belirlenmesi

Dayanak verilerine göre, kullanılacak olan eğri uydurma yöntemi ve uydurulan eğrinin geçeceği noktaların tespiti yılanın hareketi bakımından oldukça önemlidir. Çünkü yılanın istenilen doğrultuda kuvvet bileşeni oluşturması ve harekete geçmesi için kullanılacak olan tüm eklem açılarının tespiti eğri uydurma sırasında kullanılacak olan yöntemler ve kurallarla belirlenmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19: Eğri uydurma Noktalarının Tespit Edilmesi

Şekildeki siyah eğri, yılanın orta noktalar eğrisini (robotun iki yanından da eşit mesafede olan eğri) göstermektedir. Siyah noktalar mevcut dayanakların konumlarını belirtmektedir. Yılanın başlangıçta siyah dayanaklar arasında doğrusal olarak durduğunu farz edebiliriz. Bu durumda dayanakların konumlarına göre bir eğri uydurulması gerekmektedir. Eğri uydurma işleminden sonra elde edilen yılan biçiminin bazı gereksinimleri karşılaması gerekmektedir.

- Yılanın eğrisinin, dayanaklarla yaptığı temas açısı: Bu temas açılarının, dayanaklardan gelen reaksiyon kuvvetlerine direkt olarak etkisi bulunmaktadır.

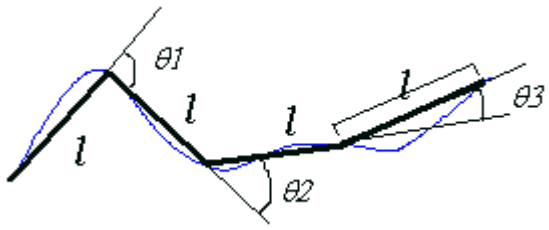
- Yılanın istenilen hareket yönüne göre konumlanması: Burada a_1, a_2, a_3 uzunluklarının yönleri hareketin oluşturulacağı yön ile aynı olmalıdır. Bu sayede eklem verileri "dayanaklara yaklaşma" amacıyla verildiğinde, daima istenen reaksiyon kuvveti yönünün *x* bileşeni elde edilir.

- b_1, b_2, b_3 yönlerinin belirlenmesi: bu yönlerin seçiminde gözetilen kriter, dayanaklardan gelen reaksiyon kuvvetlerinin dikey yöndeki bileşenlerinin, tüm robot üzerinde bir moment oluşturmayacak şekilde dengelenmesidir. Bunun için 1. ve 3. dayanaktan gelen reaksiyon kuvveti dikey bileşenleri aynı yönde, 2. dayanaktan gelen reaksiyon kuvveti bileşeni ise bunlarla ters yönde seçilebilir. Bu şekilde b_i değerleri seçildikten sonra, oluşacak olan a_i b_i c_i, dik üçgeninin oluşacağı bölge belirlenebilir.

- Dik üçgenlerin (a_i / b_i) oranlarının ayarlanması: Bu oranın ayarlanmasıyla, robotun dayanaklarla olan temas açıları belirlenmiş olmaktadır.

Sonuçta oluşan üçgenlerin köşe koordinatlarından geçen eğri robotun eğrisi olarak alınmıştır. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra çalıştırılan ilerleme algoritmasıyla, sistemin ileri yönde hareket etmesi sağlanmıştır.

Sisteme eğri uydurma işlemi uygulandıktan sonra, bu eğri üzerine parçalı doğrulardan oluşan yılan giydirilerek, eklem açıları tespit edilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: Eğriye Parçalı Yapının Giydirilmesi ve Eklem Açılarının Tayini

Burada mavi çizgi uydurulan eğriyi, l bir uzvun boyunu ve θ_i değerleri de bağıl eklem açılarını göstermektedir.

Eğri uydurmada kullanılan noktaların belirlenmesinden sonra, uygun bir yöntemle eğri uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan yöntem, genel olarak eğrinin biçimini belirlemektedir.

4.2.6 Polinom Tipi Eğri Uydurma

Birinci prototipte, sisteme öncelikle üç dayanak için üretilen 6 noktadan geçen bir 5. dereceden polinom uydurulmuştur. Polinom uydurma işleminde şu yolu izlenmiştir: $f_j(x) = x^{j-1}$ fonksiyonunu $j = 1$ den $j = M + 1$ e kadar hesaplanarak *M. d*ereceden bir polinom elde edilmiştir.

$$f(x) = c_1 + c_2(x) + c_3 x^2 + ... + c_{M+1} x^M \qquad \textbf{(4.8)}$$

Bu polinom $\{x_k, y_k\}_{k=1...n}$ noktalarından geçen polinomdur.

Bunun en basit haliyle 2. dereceden bir polinom olduğu kabul edilirse;

$y = f(x) = Ax^2 + Bx + C$ parabolü elde edilir. Katsayıların elde edilmesi için en küçük kareler yaklaşımı kullanılır.

Bir (x_k, y_k) koordinatı için hata fonksiyonu:

$$E(A,B,C) = \sum_{i=1}^{n} \left(Ax_k^2 + Bx_k + C - y_k \right)^2 \qquad \textbf{(4.9)}$$

olur.

Buradaki $\frac{\partial E}{\partial A}$, $\frac{\partial E}{\partial B}$, $\frac{\partial E}{\partial C}$ kısmi türevlerinin tamamı 0 yapılarak, en küçük *E* hata fonksiyonunu verecek A, B, C katsayıları için şu üç denklem elde edilir;

$$\frac{\partial E(A,B,C)}{\partial A} = 2\sum_{k=1}^{N} \left(Ax_k^2 + Bx_k + C - y_k \right)(x_k^2) = 0 \qquad \textbf{(4.10)}$$

$$\frac{\partial E(A,B,C)}{\partial B} = 2\sum_{k=1}^{N}\left(Ax_k^2 + Bx_k + C - y_k\right)(x_k) = 0 \qquad \textbf{(4.11)}$$

$$\frac{\partial E(A,B,C)}{\partial C} = 2\sum_{k=1}^{N}\left(Ax_k^2 + Bx_k + C - y_k\right)(1) = 0 \qquad \textbf{(4.12)}$$

Eşitliklerin düzenlenmesiyle;

$$\left(\sum_{k=1}^{N} x_k^4\right)A + \left(\sum_{k=1}^{N} x_k^3\right)B + \left(\sum_{k=1}^{N} x_k^2\right)C = \sum_{k=1}^{N} y_k x_k^2 \qquad \textbf{(4.13)}$$

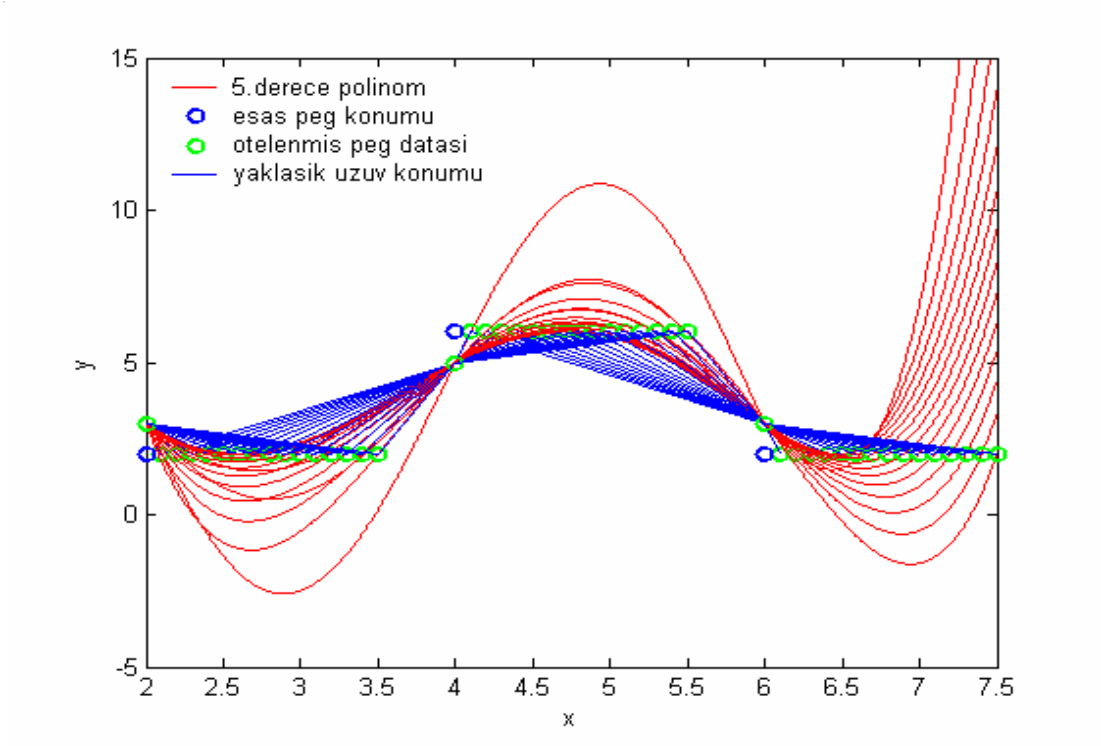
$$\left(\sum_{k=1}^{N} x_k^3\right)A + \left(\sum_{k=1}^{N} x_k^2\right)B + \left(\sum_{k=1}^{N} x_k\right)C = \sum_{k=1}^{N} y_k x_k \qquad \textbf{(4.14)}$$

$$\left(\sum_{k=1}^{N} x_k^2\right)A + \left(\sum_{k=1}^{N} x_k\right)B + NC = \sum_{k=1}^{N} y_k \qquad \textbf{(4.15)}$$

üç bilinmeyenli üç denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü hata fonksiyonunu en küçülten A, B, C, katsayılarını verir. Bu çalışmada dayanakların koordinatlarına göre belirlenen 6 bilinmeyenli 6 denklem oluşturulup çözüm yoluna gidilmiştir.

Fakat *M*. dereceden bir polinomun, *M–1* kadar en büyük ve en küçük değer içermesi beklendiğinden, oluşan eğride dayanak noktalarının değişimine göre büyük salınımlar görülmüştür **(Mathews ve Fink, 1999)**.

Sonuçta 6 nokta için 5. dereceden bir polinom uydurulduktan sonra, veri noktalarının değişimine göre, oluşan polinom salınımları şekil 4.21 de gösterilmiştir. Buradaki mavi noktalar esas dayanak konumlarını, yeşil noktalar esas dayanak koordinatlarından üretilen ve eğri uydurma işleminden sonra sisteme doğru yönlerde reaksiyon kuvvetlerinin oluşmasını sağlayacak noktaları göstermektedir. Yeşil noktaların farklı durumları için birbirinden çok farklı eğriler elde edildiği görülmektedir (kırmızı eğriler).



Şekil 4.21: Polinom Tipi Eğri Uydurma İşlemine Değişik Dayanak Verileri İçin Oluşan Eğriler

Bu nedenle farklı bir eğri uydurma metodu kullanılmıştır. Sonuçta parçalı polinom (spline) türü eğriler kullanılarak, verilen dayanak verilerine çok uygun eğriler elde edilmiştir.

4.2.7 Parçalı Polinom (Spline) Türü Eğri Uydurma

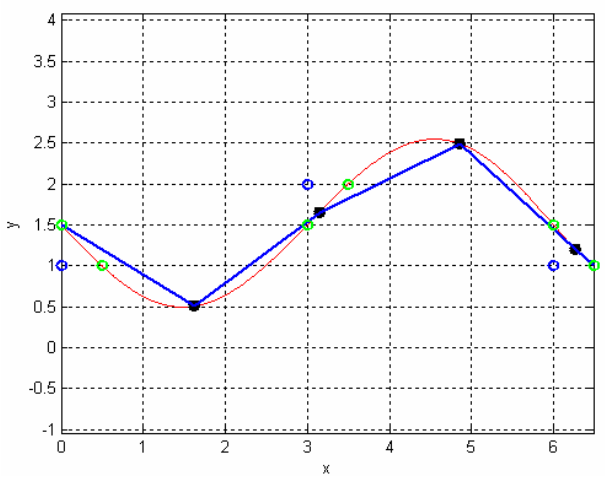
Parçalı polinom türü eğri uydurmada, veri noktaları düşük dereceli polinomlarla birleştirildiğinden, daha sürekli eğriler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada kübik parçalı polinom metodu kullanılmıştır.

Kübik bir parçalı polinom, veri noktalarını birleştiren bir seri kübik polinomdan oluşmaktadır. *n-1* polinom tarafından birleştirilen *n* tane veri noktası bulunduğunu varsayabiliriz. Her kübik polinomun dört tane bilinmeyen katsayısı olacaktır. Dolayısıyla belirlenmesi gereken *4(n-1)* tane katsayı ortaya çıkmaktadır. Her polinomun birleştirdiği iki veri noktasından geçmesi gerektiğinden, buradan da 2(n-1) tane belirlenmesi gereken denklem ortaya çıkar. Bitişik polinomların *n-2* veri noktasında, yumuşak bir eğri oluşturması için hem (y') eğimi hem de (y'') eğriliğinin sürekli olması gerekmektedir. Bu da *2(n-2)* tane fazladan denklem

vermektedir ve toplamda *4n-6* denklem oluşur. Bu şekilde, tüm katsayıların belirlenebilmesi için iki tane daha denkleme ihtiyaç duyulur. Gerekli olan bu iki durum rasgele seçilebilir ama genellikle şu durumlardan biri kullanılır **(Penny ve Lindfield, 1995)**.

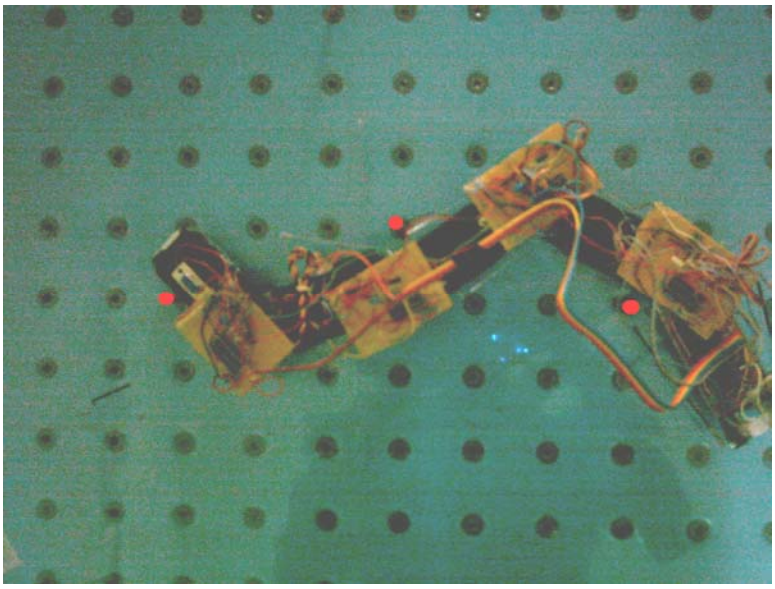
- Eğer gereken eğrinin eğimi, uçlarda biliniyorsa, bu iki sınır koşulu kullanılabilir. Fakat genelde bu eğimler bilinmez.
- Uçlardaki eğimi sıfır yapılabilir ($y_1'' = y_n'' = 0$). Fakat bunların kayda değer bir avantajları yoktur.
- x_1 ve x_n deki eğrilikler sırasıyla x_2 ve x_{n-1} deki eğriliklere eşitlenebilir.
- x_1 deki eğrilik x_2 ve x_3 deki eğriliğin doğrusal ekstrapolasyonu olarak alınabilir. Aynı şekilde x_n eğriliği de x_{n-1} ve x_{n-2}'nin doğrusal ekstrapolasyonu olarak alınabilir.
- y''', x_2 ve x_{n-1} de sürekli yapılabilir. y', y'', y''' nün her noktada sürekli olması, iki dış noktada da aynı polinomu kullanmak anlamına gelmektedir.

Eğri uydurma işlemlerinde Matlab, Eğri Uydurma araç kutusu kullanılmıştır ve bu araç kutusunda kullanılan yöntem son yöntemdir.



Şekil 4.22: Parçalı Polinom Tipi Eğri Uydurmada Elde Edilen Eğri

Şekil 4.22 de Matlab in eğri uydurma araç kutusu kullanılarak oluşturulan eğri ve bu eğrinin üzerine giydirilen 5 uzuvlu yılanı temsil eden parçalı zincir görülmektedir. Mavi daireler dayanakları, yeşil daireler bu dayanaklardan üretilen verileri, kırmızı eğri uydurulan eğriyi ve mavi parçalı yapı da yılanı temsil etmektedir.

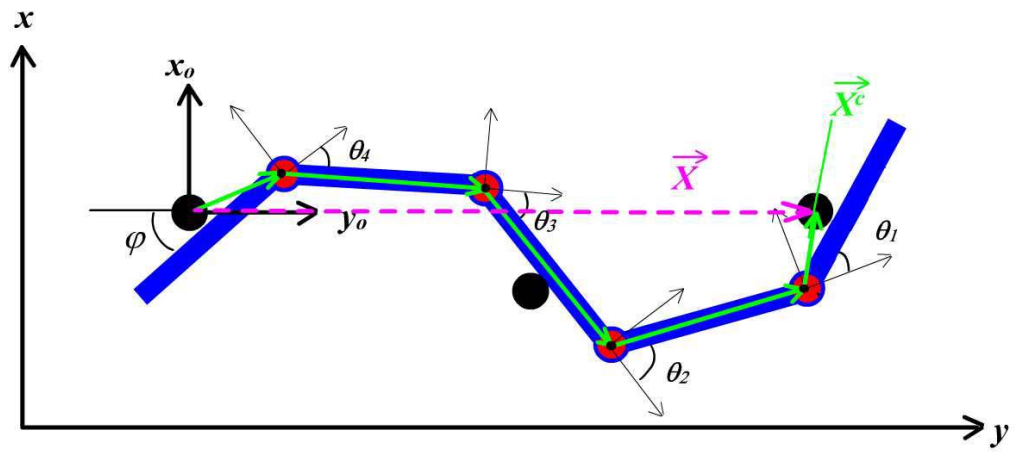


Şekil 4.23: Robotun Uydurulan Eğriyi Almış Hali

Şekil 4.23 de, robotun parçalı polinom tipi eğri uydurma işleminden sonra aldığı konfigürasyon görülmektedir.

Sisteme bir eğri uydurmak ve buradan açı verilerini elde etmek için, sistemin o anda temas ettiği dayanakların konumlarının bilinmesi (hangi uzva temas ettiğinin bilinmesi) gerekmektedir. Bunun için, sistemin her bir uzvunun yanlarına yerleştirilmiş olan dokunma algılayıcıları kullanılır. Sistem harekete başlangıç aşamasında iken, bütün uzuvların hareket edemeyişinden dolayı, yakınında olan bazı dayanakların yerlerinin tespiti mümkün olmamaktadır. Çünkü burada kullanılan dokunma algılayıcıları açık/kapalı (1/0) olarak çalışmaktadır.

Bu nedenle sistem henüz harekete başlamadan önce (senaryolara göre başlangıçta dayanakların arasında düz, kıvrılmamış biçimde dururken) çevresinde temas etmesi muhtemel olan dayanakların koordinatları, hareket algoritmasına verilmektedir.



Şekil 4.24: Dayanak Verilerine Göre Yılanın Konfigürasyonunun Hesaplanması

Yılanın konumunun da dayanaklara göre bilinmesi gerekmektedir. Bunun için yılanın en sonuna yakın olan dayanak referans eksen takımı (x_0, y_0) olarak alınmakta ve yılanın en son (arka) noktasının bu dayanağa göre olan konumu da hareket algoritmasına bir parametre olarak girilmektedir. Yılanın, eklem açıları ve son noktanın (x_0, y_0) eksen takımına göre olan dönmesi (φ) bilindiğine göre sistemin her noktasının ve baş uzvunun temas ettiği dayanağın koordinatı hesaplanabilmektedir.

(x_0, y_0) eksen takımından baş uzvunun temas ettiği dayanağa kadar olan homojen dönüşüm matrisi:

$$A = A_1^0 . A_2^1 . A_3^2 . A_4^3 \qquad \textbf{(4.16)}$$

şeklinde bulunur. Burada

$$A_i^{i-1} = \left[\begin{array}{c|c} R_i^{i-1} & r_i^{i-1} \\ \hline 0\ 0\ 0 & 1 \end{array}\right] \quad (i=1..4) \qquad \textbf{(4.17)}$$

olur. Burada R_i^{i-1}, (*i*) eksen takımının *(i-1)* eksen takımına göre dönme matrisi, r_i^{i-1} ise (*i*) eksen takımının *(i-1)* eksen takımına göre öteleme vektörüdür. Son dayanağın (x_0, y_0) eksen takımına göre konumu:

$$\overrightarrow{X} = A.X^{c} \quad \textbf{(4.18)}$$

ifadesiyle bulunur (Şekil 4.24).

4.2.8 Algılayıcılar

Robot, hareketi sırasında arka taraftan bir dayanak ile teması kaybederken, baş kısmı da harekette devam edebilmesi için yeni bir dayanak bulmaktadır. İlk deneylerde bu durum kullanıcı tarafından dayanakların koordinatlarının bildirilmesi şeklinde uygulanmıştır. Fakat tamamen mobil, kapalı çevrim bir uygulamada, bu dayanakları robotun kendisi bulmalıdır. Bu amaçla gövde boyunca her uzvun iki yanına yerleştirilmek suretiyle dokunma algılayıcıları kullanılmıştır.

Bu algılayıcılar birer uzaklık algılayıcısı olmayıp, yalnızca temasın var olup olmadığını kontrol algoritmasına geri bildirirler. Uygulanan temas kuvveti bilgilerini de ölçmezler. Açık/kapalı çalışan düğme işlevi görmektedirler.

Buna göre sistemin tüm eklemlerinden 1 ve 0'lardan oluşan bir matris şeklinde algılayıcı bilgileri toplanmaktadır. 1 temasın varlığını, 0 ise temasın var olmadığını sisteme bildirir.

Algılayıcı bilgilerini kontrol algoritmasına geri bildirmek için bir PIC 16F877 mikro kontrolör kullanan algılayıcı devresi oluşturulmuştur. Bu devrenin yapısı Ek-F' de verilmiştir.

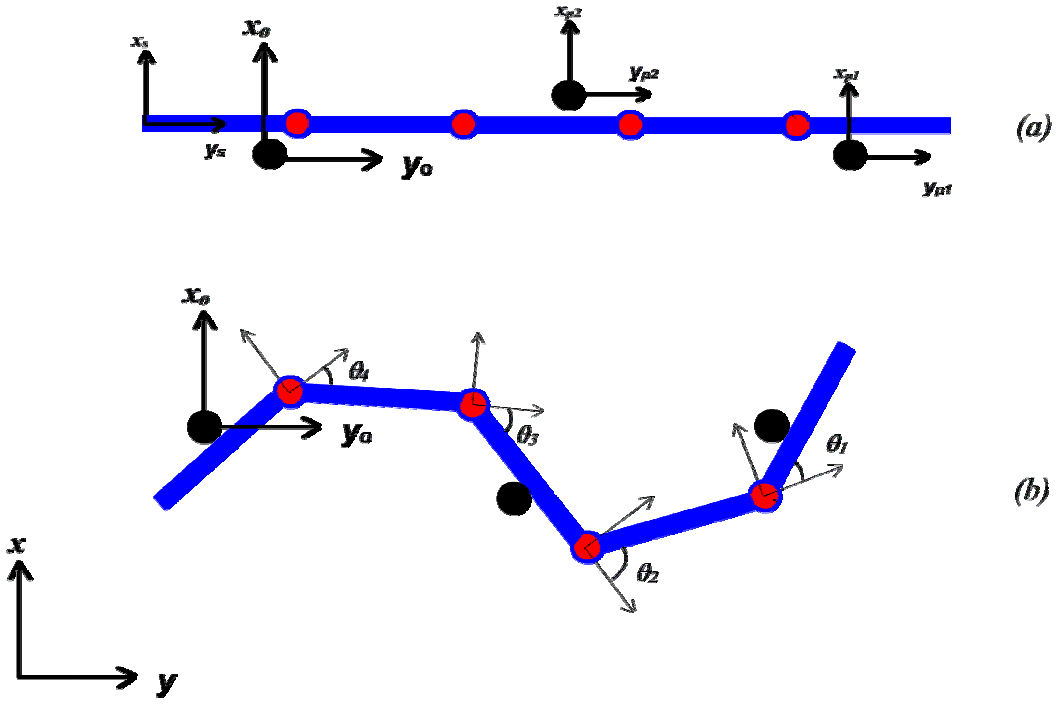
PIC mikro kontrolörün ilgili uçlarının lojik 1 değeri yapılmasıyla, bir temasın varlığı anlaşılmaktadır.

4.2.9 Kontrol Algoritması

En genel haliyle robotun hareket algoritması, robotun dayanaklara göre konfigürasyonu, eklem açılarının referans değerleri, uzuvların dayanaklarla temas açıları, kafanın yeni dayanaklarla teması ve ilerleme hareketinden oluşmaktadır. Robotun kontrol algoritmasında işleyen genel kontrol akışı Ek-G' de verilmiştir.

Bu hareketin elde edilmesinde kullanılan kontrol akışının ayrıntıları şöyle uygulanmıştır:

- Robotun ilk durum bilgileri: senaryoların başlangıcında robotun tüm eklem açıları sıfırdır yani sistem, dayanaklar arasında bir doğru oluşturacak şekilde durmaktadır ($\overrightarrow{\theta_{i-0}}$). Sistemin temasta bulunduğu en gerideki dayanak, referans eksen takımı olarak alınmıştır ($\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$). Robotun tüm eklemlerinde birer eksen takımı oluşturulduğunda, tüm konfigürasyonun bu eksen takımları yardımıyla belirlenebilmesi için, sistemin referans eksen takımına göre dönmesinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla yılanın en geri noktasının koordinatları referans eksen takımına göre $\overrightarrow{P_s} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix}$ ve bu noktanın yatay eksen ile dönmesi de φ_s olarak alınmıştır. Sistemdeki algılayıcıların birer uzaklık algılama algılayıcısı olmayışından dolayı, başlangıçta sistemin temas edebileceği veya ettiği dayanakların koordinatları da kontrol algoritmasına bildirilir ($\overrightarrow{P_p} = \begin{bmatrix} x_{p-i} \\ y_{p-i} \end{bmatrix}$) (Şekil 4.25).



Şekil 4.25: Yılan Eklemlerindeki Koordinat Sistemleri ve Eklem Açıları

- Bu verilerin kullanılması ile sistemin eklem açılarının tespiti için eğri uydurma işlemi kullanılmıştır. Bu işlemin uygulanışında uzuvların dayanaklar ile yapması istenen temas açıları algoritmaya veri olarak girilmiştir. Bu açılar hem eğrinin biçimini hem de dayanaklardan alınan tepki kuvvetlerinin değerini değiştirmektedir.
- Oluşturulan eğri, ayrıklaştırılarak yılanın eklem açıları tespit edilmektedir.
- Oluşturulan eklem açıları, seri çıkış üzerinden robotun mikro kontrolörlerine iletilerek robotun oluşturulan eğrinin biçimi alması sağlanmaktadır.
- Buradan sonra ilerleme algoritması kullanılmıştır. Her uzvun eklemine, öndeki uzvu takip edecek şekilde açı değerleri verilmektedir ($\theta_n(i) = \theta_{n+1}(i+1)$).
- İkinci ve daha sonraki eklemlerin açıları bu şekilde üretilirken, hareket sırasında kontrol algoritmasına yeni açı değerleri verilmektedir. Bu açı değerleri baş uzvunun yaptığı hareketlerde, baş ekleminin aldığı açı değerleridir. Baş uzvu eğer hareketin bir anında bir dayanak ile temas halinde ise, o dayanaktan reaksiyon kuvveti alacak şekilde dayanak yönüne kuvvet uygulamaktadır. Dayanak ile teması kesildikten sonra kafa yeni bir dayanak bulmak için son dayanak ile temas eden yüzeyin tersi yönünde bir dayanak aramaktadır. Bu yollarla elde edilen yeni referans açı değerleri sisteme beslenmekte ve bu değerler kafa ekleminden robotun ardışık eklemlerine arka arkaya aktarılarak hareketin sürekliliği sağlanmaktadır.

4.2.10 Senaryo ve Deneyler

İyileştirme çalışmaları yapılan ilk prototipte, eklemlerdeki dönme momentleri kullanılarak yapılan hareket için, üç farklı senaryo hazırlanmıştır. Her bir senaryo, farklı birçok dayanak konfigürasyonunun birleşiminden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, düzgün dağılımlı dayanaklarla yapılan ve hareket tablası üzerinde doğrusal bir yörünge izleyen "I-Senaryo" ikincisi, tabla üzerinde U-tipi bir yörünge izleyen "U-Senaryo" üçüncüsü ise tabla üzerinde V- tipi bir yörünge izleyen "V-Senaryo" dur.

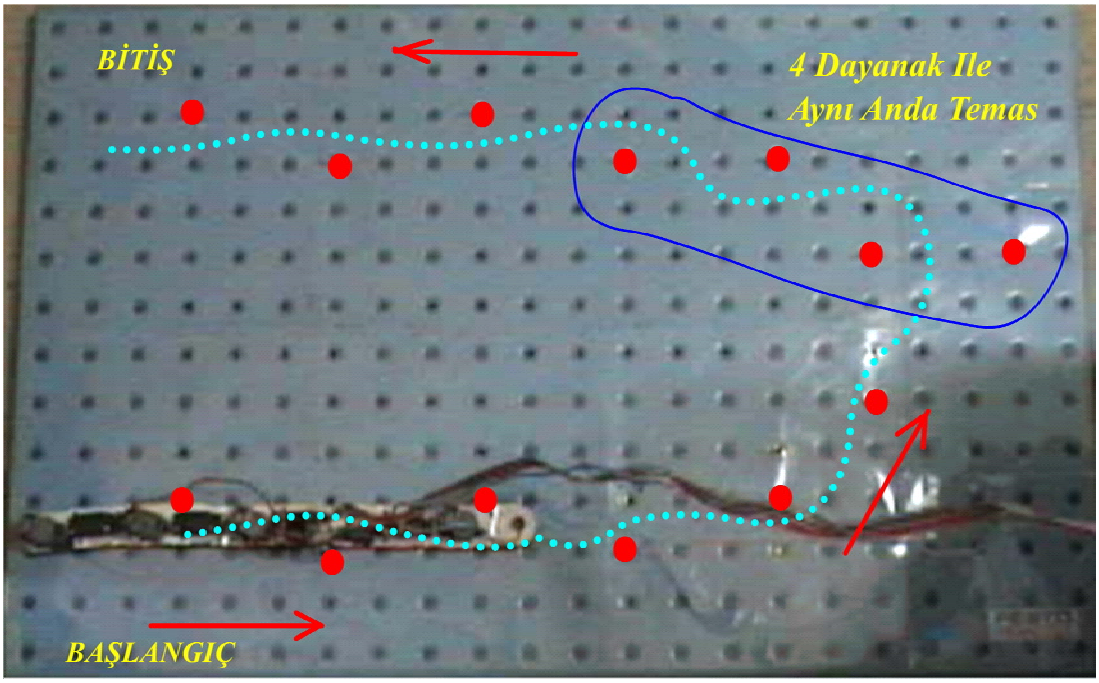
4.2.11 I-Senaryo

Bu tip senaryoda, dayanaklar arasındaki mesafeler eşit alınmıştır. Sistem birinci, ikinci ve üçüncü dayanak için kullandığı eklem açı değerlerini, ikinci, üçüncü ve

dördüncü dayanaklar için simetriğini alarak kullanmaktadır. Ağırlık merkezinin tabla üzerinde izlediği yörünge, hemen hemen doğrusal bir yörüngedir. Bu senaryo da gözlenen hareket biçimi, U-senaryo içerisinde tekrar gerçekleştirildiğinden, sistemin ve dayanakların tabla üzerindeki konumu U-senaryo bölümünde görülmektedir.

4.2.12 U-Senaryo

Bu senaryo da kullanılan dayanak konumları ve sistemin konfigürasyonları şekil 4.26 da gösterilmiştir.



Şekil 4.26: U-Senaryo

Burada kırmızı noktalar dayanakların konumlarını, mavi kesikli çizgi ise, robotun ağılık merkezinin yaklaşık yörüngesini göstermektedir.

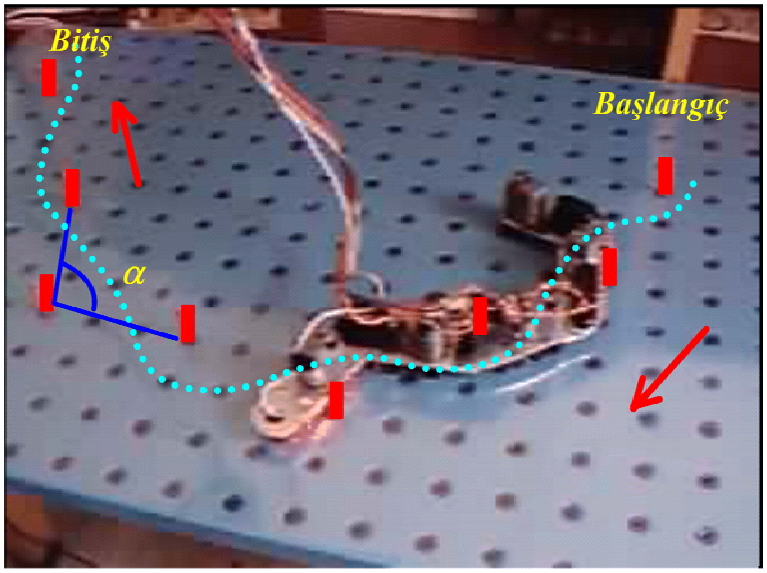
Bu senaryoda, başlangıç kısmındaki ilk dört dayanak ve bitiş kısmındaki son dört dayanak, I-senaryoda kullanılan dayanak konfigürasyonlarıdır. Aradaki diğer dayanaklar da birçok farklı açı konfigürasyonları oluşturacak şekilde seçilmişlerdir. Dayanakların konfigürasyonlarının seçiminde, herhangi bir limit açı kriteri gözetilmemiştir. Fakat üretilen ilk prototipin uzuv boylarının oldukça uzun olması ve az sayıdaki eklemleri nedeniyle, dayanakların birbirlerinden 15cm den fazla

uzaklıklara konulmamasına özen gösterilmiştir, aksi takdirde sistem bir dayanağı bıraktığında, baş uzvuna en yakın dayanak ile teması mümkün olamamaktadır.

Senaryoların tamamında sistem en fazla üç dayanak kullanarak hareketini gerçekleştirmektedir. Fakat bu senaryonun bir bölümünde dört dayanak ile aynı anda temas kullanılarak, üç ten fazla dayanak ile hareketin mümkün olduğu gösterilmeye çalışılmıştır.

4.2.13 V-Senaryo

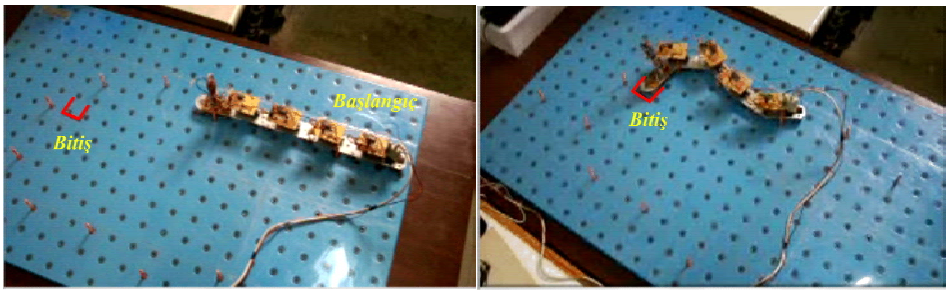
Bu senaryodaki dayanaklar genel olarak bir V şekli oluşturmaktadırlar. Robot V şeklinin bazı kısımlarından geçerken birbirleri ile yaklaşık $\alpha = 90^o$ açı yapan dayanakları kullanarak hareket edebilmektedir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27: V-Senaryo

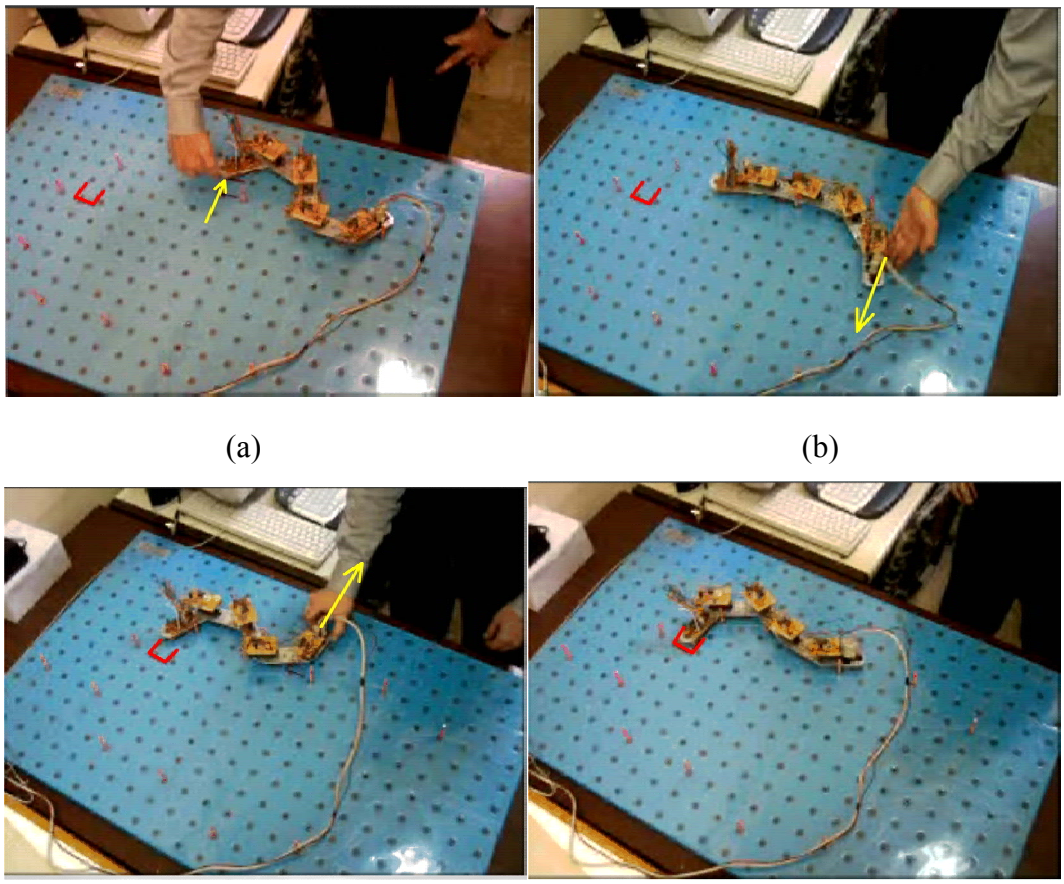
4.2.14 Deneyler

Yapılan bir deneyde, robot hareketinin dışarıdan gelen bozucu etkilere karşı ne kadar dayanıklı olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. U tipi senaryonun yaklaşık olarak üçte birlik bir bölümü alınarak robotun kafa noktasının bu süre zarfında gittiği koordinatlar tabla üzerine işaretlenerek belirlenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28: Bozucu Etki Olmaksızın Senaryonun Başlangıç ve Bitiş Konfigürasyonu

Bu nokta, dışarıdan bir zorlanma gelmeksizin yapılan hareketin sonucunca kafanın geldiği noktadır. Deneyin birçok defa tekrarlanması durumunda sistem sürekli olarak bu noktada durmaktadır. Daha sonra dışarıdan gelen bozucu etkilere karşı sistemin izlediği yörüngenin kararlılığı araştırılmıştır. Burada dışarıdan el ile uygulanan çekme, itme, döndürme hareketlerinde sistemin yine aynı noktada konumlandığı görülmüştür (Şekil 4.29).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.29: Sisteme Dışarıdan Verilen Bozucu Etkiler (a,b,c). Sistemin Bozucu Etkiler Sonrasındaki Konfigürasyonu (d)

Robotun dayanaklar ile temasının bir geometrik sınır yaratması ve sistem konfigürasyonlarının hareketin yalnızca bir yönde oluşmasına izin verecek şekilde seçilmesinin, robotun birtakım dış bozuculara maruz kaldığında yörüngesini korumasını sağladığı düşünülmektedir.

4.2.15 Sonuçlar

Birinci prototipin üretilmesi için yapılan ilk çalışmalarda, öncelikle dayanaklara dayalı yılansı hareketin tasarlanan modül yapısı ile mümkün olup olmadığı ve prototip üretildikten sonra kullanılacak olan kontrol algoritmalarının işe yarayıp yaramayacağı bazı benzetimlerle denenmiştir. Buradan çıkarılan sonuçlarla, modüller üretildikten sonra kullanılacak olan kontrol algoritmaları belirlenmiştir. Gözlenen diğer bir önemli sonuçta hareketin sürekli olabilmesi için bazı kriterlerin gerekli oluşudur. Burada hareketin sürekliliğinden kastedilen, robotun bir dayanağı terk edip bunun yerine, hareket yönünde bulunan diğer bir dayanağı kullanarak hareketine devam edebilmesidir. Bunu gerçekleştirmek için yanal itki mekanizmalarının dayanaklar ile temas eden bölümlerinin bir uzuvdan diğerine geçerken teması kaybetmeyecek şekilde iç içe geçen yapılar şeklinde üretilmesinin gerekliliği görülmüştür (Şekil 4.10). Bu durum da bir benzetim ile gösterilmiş ve sürekli hareket bu tip bir mekanizma ile sağlanmıştır (Şekil 4.11). Daha sonra birinci prototip imal edilerek benzetimlerde gerçekleştirilen hareket laboratuvar ortamında da gerçekleştirilmiştir. Birinci prototip ile, çevrede bulunan dayanaklara önce çekmece mekanizmaları yardımıyla, daha sonra da çekmece mekanizmaları kullanılmadan, eklem motorlarının uygun açısal konum değişimleri ile yanal kuvvetler uygulanarak ilerleme gerçekleştirilmiştir.

5. İYİLEŞTİRİLMİŞ YENİ PROTOTİP

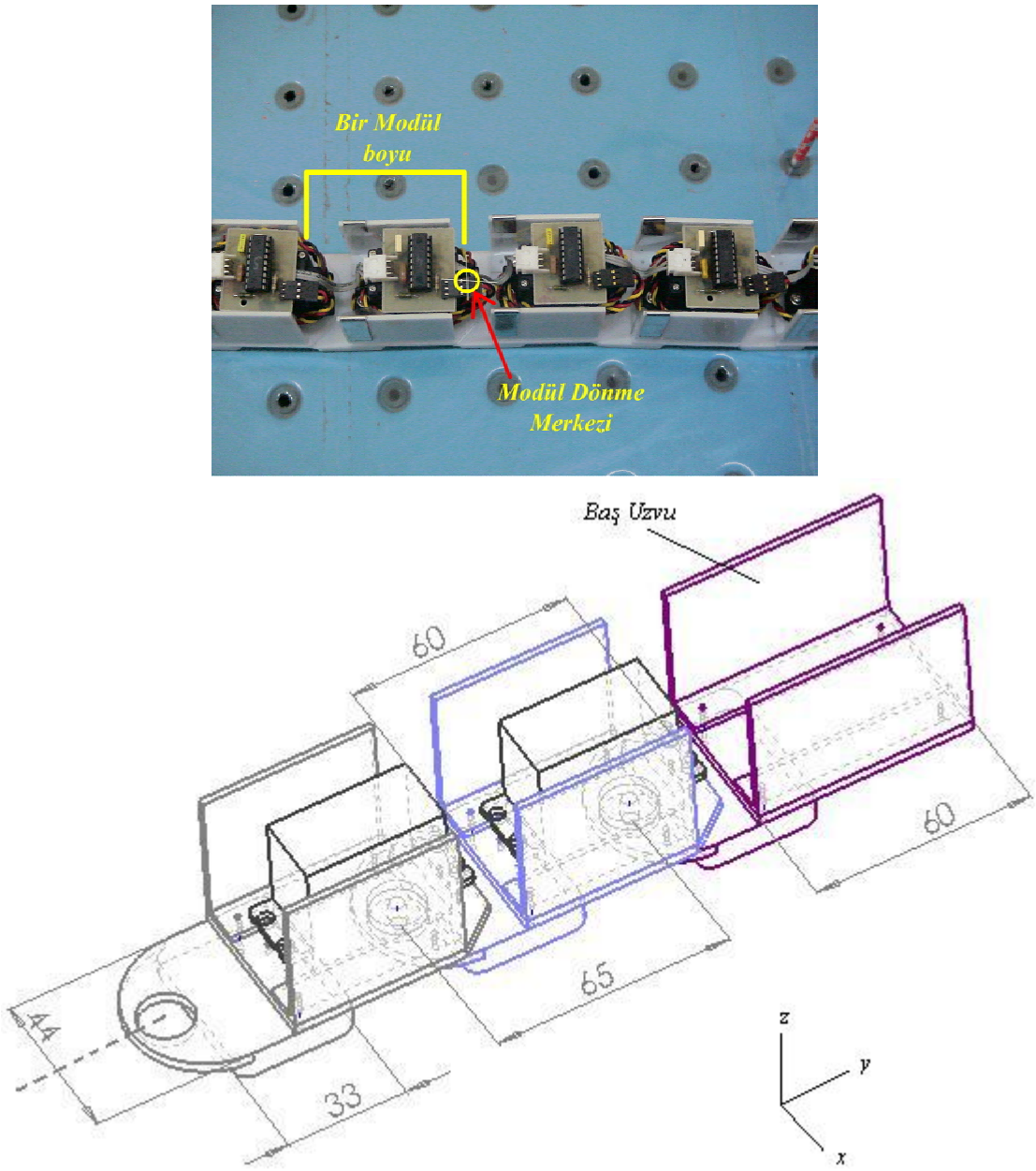
5.1 Yönlendirici İlkeler

Üretilen birinci prototip, yanal itki mekanizması kullanarak yapılan hareketin deneysel bir düzenek ile laboratuar ortamında gösterilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu nedenle modül tasarımları da bu amaca uygun şekilde düzenlenmiştir. Modüllerde başta bulunması istenen yanal itki mekanizması (eksantrik ve çekmece mekanizmaları), bu mekanizmaya hareket vermek için kullanılan doğru akım motorların ve bu motorları sürmek için kullanılan elektronik devreler, ikinci tip hareketin (eklem açısal dönmeleri ile hareket) mümkün olduğunun gösterilmesi ile kullanılmamıştır. Yeni prototipte başarımın arttırılması için aşağıdaki iyileştirmeler yapılmıştır.

- Uzuv boyları kısaltılmıştır.
- Eklem sayısı 4' ten 9' a çıkarılmıştır.
- Gövde malzemesi değiştirilerek ağırlığı azaltılmıştır (birinci prototipin bir modülü 300 gr iken, ikincisinde bu değer 88 gr dır).
- Her bir modülün yan yüzey alanları arttırılarak algılayıcı yerleştirilmesi kolaylaştırılmıştır.

5.2 Yeni Tasarım

Yeni modül tasarımında hafiflik ve kolay işlenebilirliği nedeniyle, gövde malzemesi olarak pleksiglas malzeme kullanılmıştır. Bir modül, sadece bir eklem motorunu içine alacak büyüklükte tasarlanarak boyutlar mümkün olduğu kadar düşürülmüştür. Bunun sonucunda, sistemin hareketinin hassasiyetinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: İyileştirilmiş Yeni Prototip Modülleri ve Ölçüleri

Modüllerin yan yüzey alanları genişletilerek dokunma algılayıcılarının yerleştirilmesi için yeterince geniş bir yüzey sağlanmıştır. Robotun uzuv sayısı 5 ten 10'a çıkarılarak dayanakların olası konfigürasyonlarının sayısı arttırılmış ve daha hassas hareket sağlanmıştır. Yeni tip prototip ile aynı anda üçten fazla dayanak kullanılarak yapılan hareket çok daha rahat sağlanabilmektedir. Yeni tasarımın özellikleri tablo 5.1 de özetlenmiştir.

Tablo 5.1: Yeni Prototipin Bir Modülünün Özellikleri

Modül Ağırlığı	88 gr
Boyutlar (en, boy, yükseklik)	44, 65, 52 mm
Gövde Malzemesi	Pleksiglas
Eklem Motorları	Servo motor (HITEC HS-475HB)

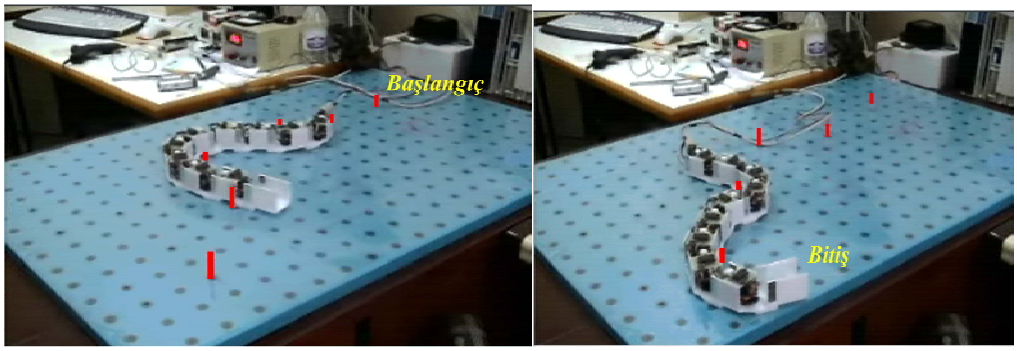
Robot üzerindeki motor kontrol ve algılayıcı devreleri baskı devre olarak imal ettirilip her bir uzvun üzerine monte edilmiştir.

5.3 Hareket ve Senaryolar

Yeni tasarımın uyguladığı hareket tipi, ilk prototipin uyguladığı ikinci hareket olan, eklemlerdeki açısal dönmeleri kullanarak oluşturulan harekettir. Sistemdeki hareket ve kontrol algoritmaları güncellenerek yeni prototipe uygulanmıştır. Fakat burada çevresel dayanaklara dayalı hareketin yanı sıra, yeni bir hareket biçimi olan düşey düzlemde harekette uygulanabilmiştir.

5.3.1 Dayanaklara Temas ile Hareket

Bu hareket biçimi, ilk prototipin uyguladığı prensiplere dayanmaktadır. Dayanaklardan alınan reaksiyon kuvveti bileşenleri sayesinde sistem ileri yönde hareket edebilmektedir. Bu hareketin sonuçları şekil 5.2 de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Yeni Prototipin Engele Dayalı Hareket Senaryosu

Üretilen yeni prototip ile robotun aldığı eğrilerin hassaslaştığı ve öndeki eklemi takip etme hareketinin de daha hassas biçimde uygulandığı görülmektedir.

5.3.2 Düşey Düzlemde Hareket

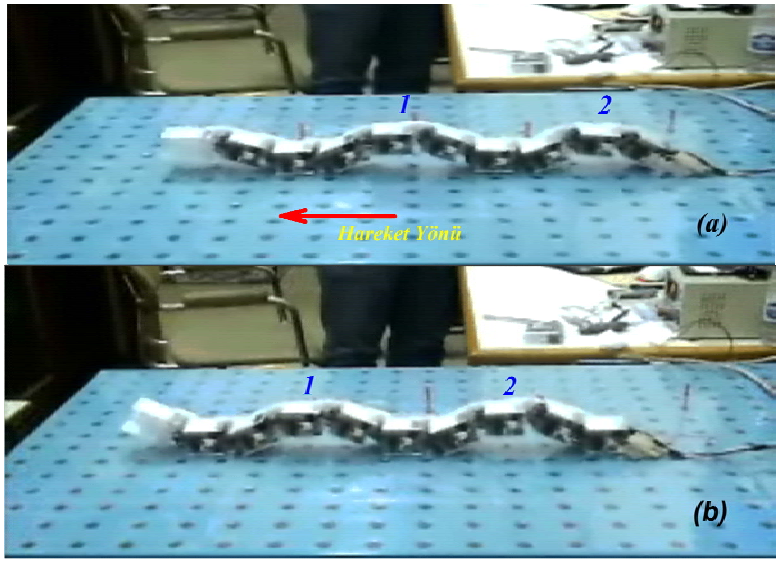
Bu tip hareketi, yerçekimine karşı yapılan düzlemsel hareket olarak tanımlayabiliriz. Üretilen prototiplerle yapılan hareketler yer düzlemindeki kuru sürtünmeler ve dayanaklardan gelen tepki kuvvetlerinin yardımıyla yapılmaktaydı. Düşey düzlemde harekette ise, robot bu düzlemde sinüs eğrisini andıran bir konfigürasyon oluşturmakta ve bu eğrinin tepe ve çukurlarını hareket yönüne doğru yayarak ileri yönde hareket oluşturmaktadır. Bu hareketin hızı, dalganın yayılış hızına bağlı olarak ayarlanabilmektedir.

Yılanların yatay düzlemde yaptıkları bu tip hareketler, yanal dalgalanma hareketi olarak adlandırılmaktadır. Burada yanal dalgalanma hareketi düşey düzleme uyarlanarak hareket yönünde kayan dalgalar oluşturulmuştur. Bu tip bir hareket doğada görülen en temel hareketlerden biridir.

Tablo 5.2: Kayan Dalga Hareketinde Eklem Açılarının Ötelenmesi

t	t_0	t_1	t_2	t_3
θ_1		θ_{1_1}	θ_{1_2}	θ_{1_3}
θ_2	θ_{2_0}	θ_{1_0}	θ_{1_1}	θ_{1_2}
θ_3		θ_{2_0}	θ_{1_0}	θ_{1_1}
θ_4	θ_{4_0}	θ_{3_0}	θ_{2_0}	θ_{1_0}
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\ddots$	$\ddots$
θ_{n-1}		θ_{n-2_0}	θ_{n-2_1}	θ_{n-2_2}
θ_n	θ_{n_0}	θ_{n-1_0}	θ_{n-2_0}	θ_{n-2_1}

Hareketin oluşumu sırasında verilerin ardışık eklemler arasında ötelenmesi tablo 5.2 de gösterilmiştir. Burada θ_{1_i} değerleri robotun baş uzvuna bir sinüs eğrisi çizdirilecek şekilde verilmiştir. Hareketin oluşumu ve sonuçları şekil 5.3 de gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Düşey Düzlemde Kayan Dalga Hareketi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, vücut yapıları ve hareket tipleri nedeniyle çok farklı doğal ortamlarda yaşama olanağı bulmuş olan yılanların hareketleri incelenerek, yaptıkları en temel hareketler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Bu amaçla iki farklı robot yılan prototipi üretilmiş ve bu prototiplerle, dayanaklara bağlı yanal itme hareketi ile düşey düzlemde kayan dalga hareketleri uygulanmıştır.

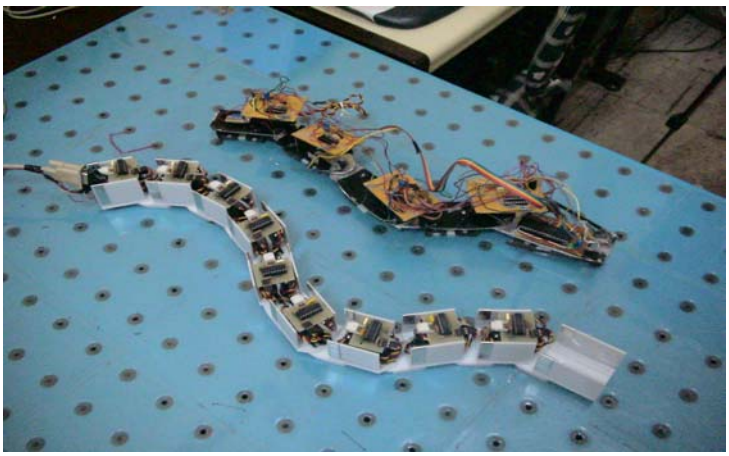
Üretilen yılan tipi robot prototiplerinin, literatürde bulunan çalışmalardan temel farkı daha önce yapılmış olan çalışmalarda yatay düzlemde hareketi gerçekleştirebilmek için robotlarda bulunan pasif tekerlek mekanizmalarının bu prototiplerde kullanılmamasıdır. Her iki sistem de yüzey ile aralarında kuru sürtünmeye sahip alan teması yapmaktadırlar. Ancak hareket, çevredeki dayanaklara uygulanan itme kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Bu haliyle elde edilen hareketin bir sürünme hareketi olduğu söylenebilir. Tekerlekli mekanizmalarda, çevre koşulları (taş, çimen gibi yükseltiler) hareketin sağlanmasını zorlaştırırken, bu çalışmada üretilen prototiplerde bunlar hareketin oluşması için gerek şart olarak ortaya çıkmaktadırlar. Üretilen iki prototip arasındaki fark ve benzerlikler tablo 6.1 de özetlenmiştir.

Tablo 6.1: İki Prototipin Karşılaştırılması

	1. PROTOTİP	**2. PROTOTİP**
Hareket Tipleri	• Yanal itki mekanizması ile hareket. • Eklem açısal konumları ile hareket.	• Eklem açısal konumları ile hareket. • Düşey düzlemde kayan dalga hareketi.
Eklem sayısı	4	9
Toplam Uzunluk [mm]	550	650
Toplam Ağırlık [gr]	600	880

Eklem açısal konumları ile yapılan hareket, yanal itki mekanizması ile harekette olması gereken çekmece mekanizmasına, doğru akım motorlarına, bunların kontrolü için gerekli olan yazılım ve donanımlara ihtiyaç duymamaktadır. Çünkü yanal itme kuvvetinin eklem motorlarına uygulanan döndürme momentleri ile elde edilebileceği gösterilmiştir. Maliyetin düşürülmesi, hareketin kolay ve hassas bir biçimde uygulanması, modül tasarımlarının basitleştirilmesi gibi etkenlerden dolayı bu hareket daha cazip bir hareket olarak görülmektedir. İkinci prototipin üretilme amacı da bu hareketin en iyi şekilde gözlenmesidir.

Yılansı hareketin daha hassas biçimde gözlenebilmesi bakımından ikinci prototipte uygulandığı gibi modül boylarının kısa oluşunun büyük önem taşıdığı görülmüştür (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Birinci (5 Uzuvlu) ve İkinci (10 Uzuvlu) Prototipler

Yapılan deneysel çalışmalarda, ikinci prototipin birincisine oranla daha hassas bir yörüngede hareket ettiği görülmüştür. Ayrıca "eklemlerin açısal konum değişimleri ile hareket" yönetiminin, yanal itki sistemine göre çok daha basit bir metotla uygulanması ve yılansı harekete daha yakın olması bakımından daha uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Sistemin yörüngesinin kararlılığı üzerine yapılan bir deneyde, dışarıdan el ile uygulanan bozucu etkilerin (itme, çekme, döndürme) sistemin yörüngesini ve baş kısmının senaryo sonundaki konumunu etkilemediği, sistemin kendini düzelterek normal hareket yörüngesine girdiği gözlenmiştir (Bölüm 4.2.14).

6.2 Öneriler

Eklem sayısının artmasıyla, kullanılan mikro kontrolörlere daha fazla seri veri gidecektir. Mevcut mikro kontrolörler en fazla 2400 Baud (bir saniyede gönderilen bit sayısı) seri iletişim hızını destekledikleri̇nden, daha hızlı bir iletimin gerektiği durumlarda bu mikro kontrolörler yetersiz kalabilir. Bu nedenle yeni yapılacak olan prototipin tasarımında bu konunun incelenmesi ve gerekirse daha hızlı seri iletişimi destekleyen mikro kontrolörlerin kullanılması gerekmektedir.

Tüm algoritmalar, Matlab ortamında hazırlanmıştır. İletişim arayüzü olarak yine Matlab' in seri iletişim komutları kullanılmıştır. Daha fazla eklemli sistemlerde, verilen referans eklem açısı bilgileri ve toplanan algılayıcı bilgilerinin yükü artacağından, daha hızlı işlem yapabilen derleyici arayüzlerinin kullanılması gerekebilir.

İletişimin bir veri toplama kartı üzerinden yapılmaması, seri iletişimin ileride kullanılabilecek ve piyasada kolayca bulunabilen kablosuz seri iletişim modülleri tarafından yapılmasına olanak sağlayabilir. Bu durum kablosuz uygulamalar için oldukça önemlidir. Seri portu bulunan herhangi bir bilgisayar ile sistemin kontrolü yapılabilir.

Yeni tasarımda güç üniteleri her bir uzvun üzerine monte edilerek kablosuz mobil hareket sağlanabilir. Bunun için hareketlerde gerekli olan toplam gücün bir analizi yapılmalıdır.

Yeni uygulanacak olan prototipin eklemleri iki serbestlik dereceli olacak şekilde tasarlanarak, hareket üçüncü boyutta da gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada yer düzlemindeki eklem konumlarının değişimlerinin, dayanaklardan tepki kuvvetleri elde etme potansiyelleri incelenmeye çalışılmıştır. Üçüncü boyutta harekette de aynı kuvvet elde etme biçimi kullanılarak hareket sağlanabilir.

İkinci prototipte kullanılan eklem boyları oldukça küçültülmesine karşın, hala algılayıcı verilerinin toplanmasına engel teşkil edebilmektedir. Bir eklemin yan yüzeylerine birer adet dokunma algılayıcısı yerleştirilmiştir. Bu nedenle eklemler ile dayanaklar arasındaki temas bilinebilmesine karşın, bu temasın bir eklemin tam olarak neresinden olduğunun bilinmemesi, tüm gövde konfigürasyonunun

hesaplanmasında hareket ilerledikçe artan hatalara neden olabilir. Bu nedenle ya her uzva sık aralıklarla birden fazla algılayıcı yerleştirilmeli veya uzuv boyları daha da küçültülmelidir.

Dayanaklar ile uzuvların temas açıları, hareketin oluşması için elde edilen tepki kuvvetlerinin bileşenlerine direkt olarak etki ettiklerinden, ileriki bir çalışma olarak bu temas açılarının optimizasyonu incelenmelidir.

KAYNAKLAR

Gray, J., 1946. The Mechanism of Locomotion in Snakes, *Journal of Experimental Biology, **23**, 2.*

Moon, B. R. and Gans, C., 1998. Kinematics, Muscular Activity and Propulsion in Gopher Snakes, *Journal of Experimental Biology,* **201**, 2669-2684.

Gasc, J. P., Cattaert, D., Chasserat, C. and Clarac, F., 1989. Propulsive Action of a Snake Pushing Against a Single Site: Its Combined Analysis, *Journal of Morphology*, **201**, 315-329.

Ijspeert, A., 2001. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander, *Biological Cybernetics,* **85**(5), 331-348.

Gray, J. and Lissmann, H. W., 1949. The Kinetics of Locomotion of the Grass Snake, *Journal of Experimental Biology,***26**, 354-367.

Greene, H. **W.,** 1997. Snakes: The Evolution of Mystery in Nature, University of California Press, London.

Hirose, S., 1993. Biologically Inspired Robots. Oxford University Pres. Oxford.

Hirose, S. and Umetani, Y., 1976. Biomechanical Study of Active Cord-Mechanism with Tactile Sensors, *Proc. 6th Int. Symp. on Industrial Robots*, C1, 1-10.

Chirikjian, G. S. and Burdick, J. W., 1993. Design and Experiments With a 30 DOF Robot, *Journal of Robotics and Automation,* **1060**-4729/93.

Shan, Y. and Koren, Y., 1993. Design and motion Planning of a Mechanical Snake, *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics,* **(23)**, 1091-1100.

Ikeda, H. and Takanashi, N. 1987. Joint Assembly Movable Like a Human Arm, *US Patent,* No: 4683406 dated: 7.28.1987. Assignee: NEC Corporation.

NEC Corporation, 1996. Orochi: 12 DOF Snake Like Robot, NEC Corp. Press, New York.

Paap, K. N., Dehlwish, M., Klaassen, B., 1996. GMD-Snake: A Semi-Autonomous Snake-Like Robot, *3rd International Symposium on Distributed Autonomous Robot Systems,* **(29)**-31.

Desai, R. S., CRosenberg, C. J. and Jones, J. N., 1995. Kaa : An Autonomous Serpentine Robot Utilizes Behavior Control, *IROS'95 Proc.,* **3**, 250-255

Miller, G. S. P., 1989. Goal-Directed Snake Motion Over Uneven Terrain. Computer Graphics, Blenheim Online Publications.

Bayraktaroglu, Z. Y., Butel, F., Pasqui, V., Blazevic, P., 2000. Snake-Like Locomotion: Integration of Geometry and Kinetostatics, *Advanced Robotics,* **14**(6), 447-458.

Bayraktaroglu, Z. Y., Blazevic, P., 2004. A Controllability Criterion Based on a Physical Analogy: Limbless Locomotion and Object Grasping in Robotics, *Robotica,* **22**, 493-503.

Choset, H., and Burdick, J. W. 1995. Sensor Based Planning, Part I: The Generalized Voronoi Graph., *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.*

Mathews, J. H. and Fink, K. D. 1999. Numerical Methods Using Matlab. Prentice Hall. N.J.

Penny, J and Lindfield, G. 1995. Numerical Methods Using Matlab. Ellis Horwood. New York.

EK-A

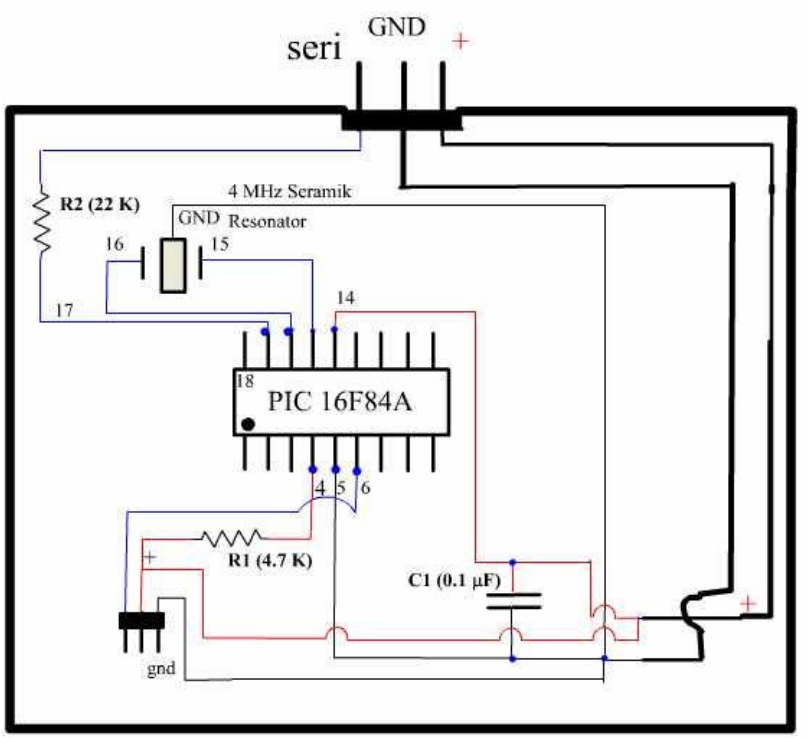
BİLGİSAYAR SERİ ÇIKIŞININ YAPISI (RS-232)

Tablo A.1: RS-232 Seri Çıkış Özellikleri

	9 Uçlu Bilgisayar Seri Çıkışı
Erkek RS232 DB9	
Uç Numarası	**Sinyalin Yönü:**
1	Modemden Gelen Sinyal
2	Veri Al
3	Veri Ver
4	Veri Terminali Hazır
5	Toprak
6	Veri Seti Hazır
7	Çıkış Akış Kontrol Sinyali
8	Giriş Akış Kontrol Sinyali
9	Modemden gelen Sinyal

EK-B

SERVO MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİ VE DEVRE ELEMENLARI



Şekil B.1 : Servo motor Sürücü Devresi

Devre üzerinde mikro kontrolörlerin çalışması için, 4Mhz'lik seramik resonatör, $22K\Omega$ ve $4,7K\Omega$ luk dirençler, $0,1\mu F$ lık bir kondansatör ve mikro kontrolör olarak ta bir PIC 16F84A bulunmaktadır.

EK-C

PIC 16F84A TİPİ MİKRO KONTROLÖRLER

High Performance RISC CPU Features:

- Only 35 single word instructions to learn
- All instructions single-cycle except for program branches which are two-cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
  DC - 200 ns instruction cycle
- 1024 words of program memory
- 68 bytes of Data RAM
- 64 bytes of Data EEPROM
- 14-bit wide instruction words
- 8-bit wide data bytes
- 15 Special Function Hardware registers
- Eight-level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Four interrupt sources:
  - External RB0/INT pin
  - TMR0 timer overflow
  - PORTB<7:4> interrupt-on-change
  - Data EEPROM write complete

Peripheral Features:

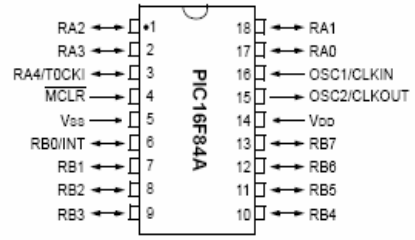
- 13 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
  - 25 mA sink max. per pin
  - 25 mA source max. per pin
- TMR0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler

Special Microcontroller Features:

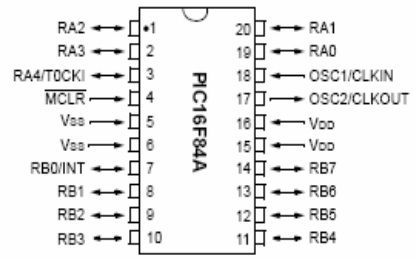
- 10,000 erase/write cycles *Enhanced* FLASH Program memory typical
- 10,000,000 typical erase/write cycles EEPROM Data memory typical
- EEPROM Data Retention > 40 years
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) - via two pins
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT), Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own On-Chip RC Oscillator for reliable operation
- Code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options

Pin Diagrams

PDIP, SOIC



SSOP

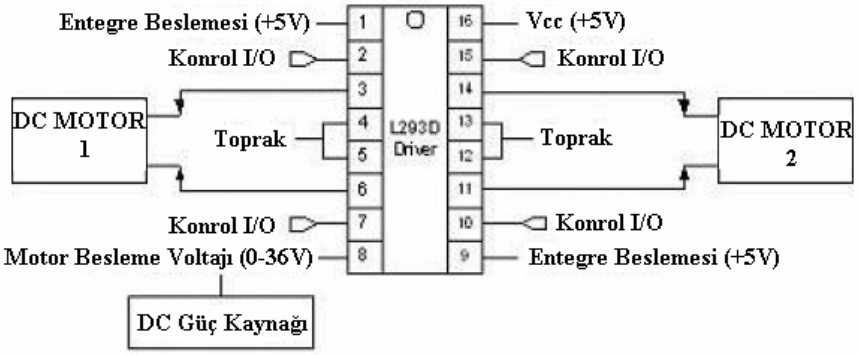


CMOS Enhanced FLASH/EEPROM Technology:

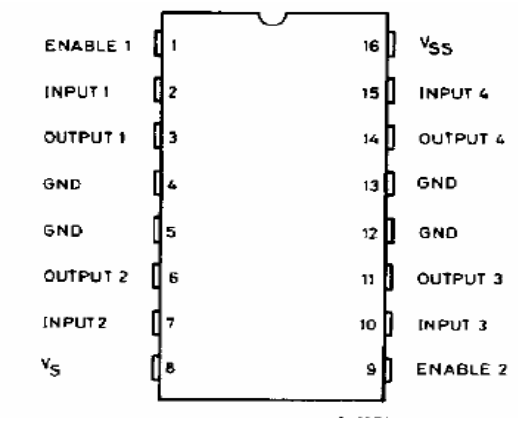
- Low power, high speed technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range:
  - Commercial: 2.0V to 5.5V
  - Industrial: 2.0V to 5.5V
- Low power consumption:
  - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
  - 15 µA typical @ 2V, 32 kHz
  - < 0.5 µA typical standby current @ 2V

EK-D

DOĞRU AKIM MOTORU SÜRÜCÜSÜ



Şekil D.1 : Doğru Akım Motor Sürücüsü Bağlantıları



Şekil D.2 : Doğru Akım Motor Sürücüsü Uç Dizilimi

[VS] Besleme Voltajı: 36 V
[VSS] Lojik Besleme Voltajı: 36 V
[Vi] Giriş Voltajı: 7 V
[Ven] Enable Voltajı: 7 V
[Io] En Fazla Çıkış Akımı: 1.2 A

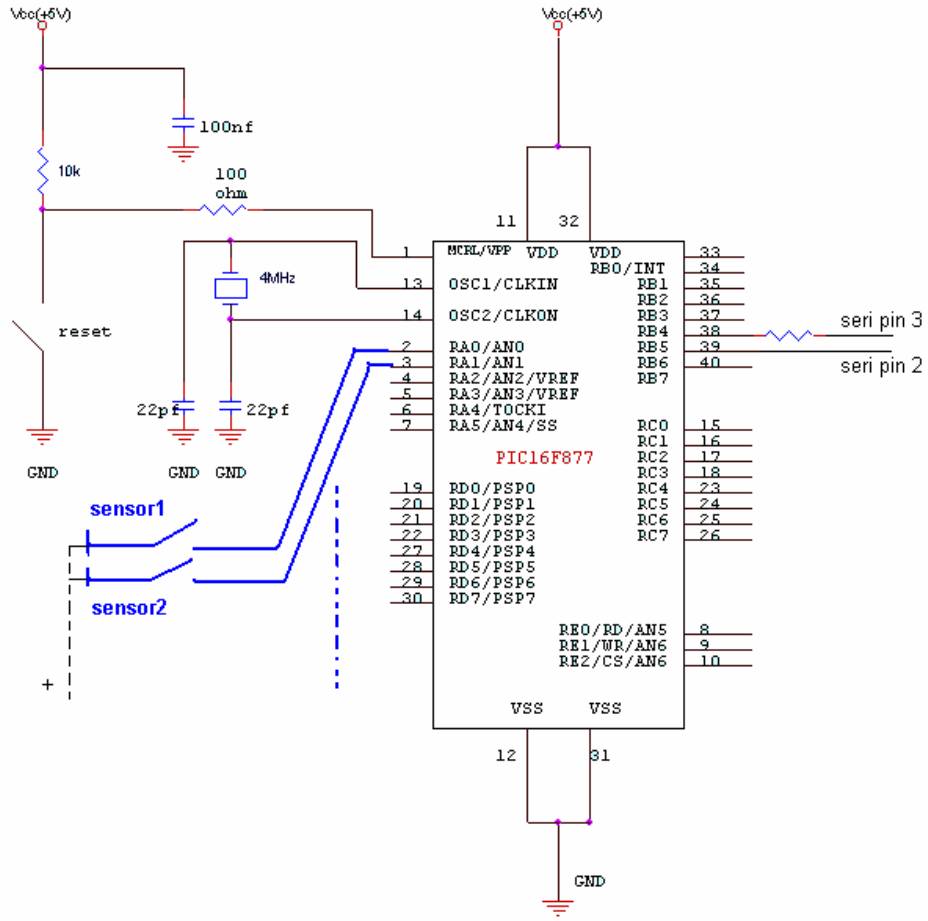
EK-E

MATLAB SERİ PORT ARAYÜZ KOMUTLARI

clear (serial):	Matlab çalışma ortamından seri port nesnesini sil.
delete (serial):	Hafızadan ortamından seri port nesnesini sil.
disp (serial):	Seri port nesnesinin özelliklerini göster.
fclose (serial):	Seri port nesnesinin cihazla bağlantısını kes.
fgetl (serial):	Cihazdan veri oku ve terminatorü devre dışı bırak
fgets (serial):	cihazdan veri oku ve terminatorü devreye sok.
fopen (serial):	Seri port objesinin cihazla bağlantısını kur.
fprintf (serial):	Cihaza Metin verisi yaz.
fread (serial):	Cihazdan binary formatta veri oku.
freeserial:	Seri portu serbest bırak.
fscanf (serial):	Cihazdan veri oku ve metin formatına çevir.
fwrite (serial):	Cihaza binary veri yaz.
get (serial):	Seri port nesnesinin özelliklerini çağırır.
instrcallback:	Gerçekleşen olayın bilgisini görüntüle.
instrfind:	Bağlı olan seri port nesnesinin özelliklerini çalışma ortamına al.
isvalid:	Seri port nesnesinin geçerliliğini sına
length (serial):	seri port nesnesi dizisinin uzunluğunu görüntüle
load (serial):	Seri port objesini ve değişkenlerini Matlab çalışma ortamına yükle.
readasync:	Cihazdan asenkronize formatta veri oku.
record:	Veri ve olay bilgilerini bir dosyaya kaydet.
save (serial):	Seri port nesnelerini ve verilerini MAT dosyası olarak kaydet.
serial:	Seri port nesnesi oluştur.
serialbreak:	Seri porta bağlı cihaza bir ara yolla.
set (serial):	Seri port özelliklerini görüntüle veya ayarla.
size (serial):	Seri port nesnesi dizisinin boyutlarını göster.
stopasync:	Asenkronize yazma ve okuma işlemlerini durdur.

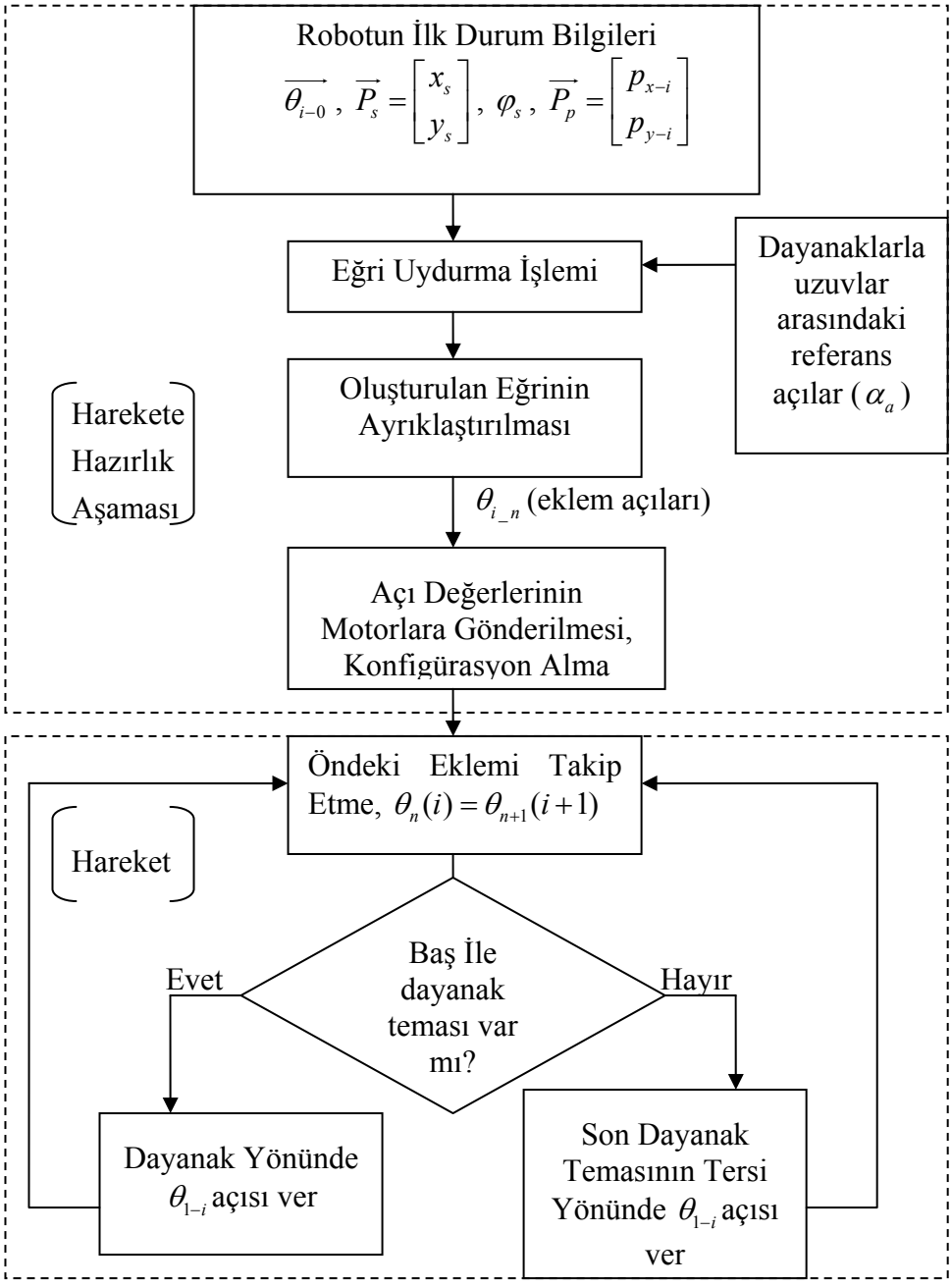
EK-F

ALGILAYICI DEVRESİ



EK-G

YANAL İTKİ MEKANİZMASIZ PROTOTİPİN KONTROL AKIŞI



ÖZGEÇMİŞ

1980 Yılında Almanya'nın Paderborn şehrinde doğdu. Lise öğrenimini 1998 yılında Şişli Yunus Emre Lisesi'nde (Yabancı Dil Ağırlıklı Program) tamamladı. 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünden, Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sistem Dinamiği ve Kontrol Programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2005 yılında bu programı başarı ile tamamladı.