



**HİPOTERAPİ İÇİN KİNEMATİK ANALİZE DAYALI 3 BOYUTLU
MODELLEME VE SİMÜLASYON**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal ADOUM OURADA

**Danışman
Doç. Dr. Uğur FİDAN**

BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİPOTERAPİ İÇİN KİNEMATİK ANALİZE DAYALI 3 BOYUTLU
MODELLEME VE SİMÜLASYON**

Bilal ADOUM OURADA

Danışman

Doç. Dr. Uğur FİDAN

BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Bilal ADOUM OURADA tarafından hazırlanan “Hipoterapi İçin Kinematik Analize Dayalı 3 Boyutlu Modelleme Ve Simülasyon” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 23 / 06 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Uğur FİDAN

Başkan : Doç. Dr. Kubilay TAŞDELEN
Isparta Uyg. Bilimler Üniv., Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Uğur FİDAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Fatih YURAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... / / tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 / 06 / 2023

Bilal ADOUM OURADA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİPOTERAPİ İÇİN KİNEMATİK ANALİZE DAYALI 3 BOYUTLU MODELLEME VE SİMULASYON

Bilal ADOUM OURADA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Uğur FİDAN

Bu tez çalışmasında anatomisi insan anatomisine benzeyen atların doğal yürüyüşlerinin (Normal, Kenter ve Tırıs), Kinovea ortamında görüntü işleme teknikleri ile kinematik analizlerinin belirlenip Solidworks ortamında 3B katı modelleri çıkartılmıştır. Çıkarılan katı modellere hareket yeteneğinin kazandırılması Matlab-SimMechanic platformunda hazırlanmış olan simülasyon yazılımı ile sağlanmıştır. Görüntü işleme ve simülasyon sonucunda elde edilen bulgular kıyaslanarak hareketlerin geliştirilen bir sisteme aktarma başarımı değerlendirilmiştir. Ulusal ve uluslararası yapılan literatür çalışmalarında katı modellerin modellenmesi, simülasyonu ve analizinin bilgisayar destekli ortamlarda gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Geliştirilen katı modellerin biyomimetik analizleri için Matlab-SimMechanics aracı literatürde tercih edilmiş ve sistemlerin kontrolü sağlamak için kinematik analizler yapılmıştır. Geliştirilen sistemlerin performans değerlendirilmesi için görüntü analizi yöntemi kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda biyomimetik analizlerinin başarımları oranları verilmediği gibi matematiksel denklemleri de belirtilmemektedir.

Bu çalışmada tasarım ve yapım aşaması maliyetli olan biyomimetik sistemleri, fiziksel olarak gerçekleştirilmeden önce denenmesine olanak sağlayan bir sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Biyomimetik analizlerinin Matlab ortamında matematiksel denklemleri çıkarıldıktan gerçek sistemde denenmiş ve başarımları oranları hesaplanmıştır. Geliştirilen sistem ile eklem açıları, doğru konuma ulaşma becerileri ve hareket yapabilme yeteneğini

analiz edilmiş olup hareketlerin gerçekleştirilmesi için gereken matematiksel denklemlerin nasıl çıkarılabileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen sistemden edinen bilgiler formülize edilerek elde edilen denklemler ile farklı canlı gruplarının hareket analizi, simülasyonu ve kontrolü için bir tasarım süreç modeli sunulmuştur.

2023, xii + 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyomimetik Robotlar, Denativ Hartenberg Yöntemi, Dönüşüm Matrisi, Hipoterapi, Robot Kinematığı.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

3D MODELING AND SIMULATION BASED KINEMATICS ANALYSIS FOR HIPPO THERAPY

Bilal ADOUM OURADA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biomedical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Uğur FİDAN

In this thesis study, natural gait (Normal, Kenter and Trot) of horses whose anatomy is similar to human anatomy were determined using image processing techniques and kinematic analysis in Kinovea environment and then 3D solid models were extracted in Solidworks environment. Gaining the motion capability to the extracted solid models is provided by the simulation software prepared on the Matlab-SimMechanic platform. The performance of transferring movements to a developed system was evaluated by comparing the findings obtained as results of image processing and simulation. From the national and international literature studies, it has been observed that modeling, simulation, and analysis of solid models are carried out in computer-aided environments. Matlab-SimMechanics tool was preferred in the literature for biomimetic analysis of the developed solid models and kinematic analyzes were performed to control the systems. The performance evaluation of the developed systems was performed using image analysis method. However, in these studies, the performance rates of biomimetic analyzes are not given and their mathematical equations are not specified.

This study aims to develop a system that enables testing of biomimetic systems, which are costly in the design and construction stages, before being physically implemented. Biomimetic analyzes were assessed on the real system after mathematical equations were derived in the MATLAB environment and performance rates were calculated. With the developed system, joint angles, the ability to reach the correct position, and the ability to move were analyzed, and it was demonstrated how mathematical equations required for

the execution of movements could be derived. As a result, a design process model for motion analysis, simulation and control of different living groups was presented with the equations obtained by formulating the information obtained from the developed system.

2023, xii + 75 pages

Keywords: Biomimetic Robots, Denavit Hartenberg Method, Hyppotherapy, kinematics of Robot, Transformation Matrix.



TEŐEKKÖR

Bu çalışmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Uğur FİDAN, yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Fatih YURAN, araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı Adoum Ourada ailesine, Abdioğulları ailesine ve Ako ailesine teşekkür ederim.

Bilal ADOUM OURADA

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Robotik Sistemler	4
2.2 Robotların Sınıflandırılması	5
2.2.1 Sabit Robotlar	5
2.2.1.1 Kartezyen Robotlar	6
2.2.1.2 Silindirik Robotlar	7
2.2.1.3 Küresel Robotlar.....	7
2.2.1.4 SCARA Tip Robotlar	8
2.2.1.5 Mafsallı Robotlar	9
2.2.2 Mobil Robotlar	9
2.2.2.1 İnsansı Robotlar	10
2.2.2.2 Mikro-Nano Robotlar	11
2.2.2.3 Biyo İlhamlı Robotlar	12
2.2.3 Haptik Sistemler.....	12
2.3 Biyomimetik	13
2.3.1 Mimarlık Alanında Biyomimetik.....	14
2.3.2 Ulaşım Alanında Biyomimetik	16
2.3.3 Askeri Alanında Biyomimetik	17
2.3.4 Sağlık Alanında Biyomimetik.....	17
2.3.4.1 Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Alanında.....	19
2.5 Literatür Taraması.....	20
2.5.1 Ulusal Çalışmalar.....	20
2.5.2 Uluslararası Çalışmalar	24
2.5.3 Literatürün Genel Değerlendirilmesi	28
3.MATERYAL ve METOT	29
3.1 İnsan ve At Anatomisi	29
3.1.1 İnsan ve At Anatomisinin Benzerlikleri ve Farklılıkları.....	29

3.2 Atların Doğal Yürüyüşleri	30
3.2.1 Normal Yürüyüş.....	30
3.2.2 Kenter Yürüyüş	31
3.2.3 Tırıs Yürüyüş	31
3.2.4 Dörtnala Yürüyüş	31
3.2.5 Rahvan Yürüyüş.....	31
3.3 Kinematik.....	32
3.3.1 Denavit-Hartenberg Yöntemi.....	32
3.3.1.1 İleri Yön Kinematiğin Hesaplanması	34
3.3.1.2 Ters Kinematiğin Hesaplanması.....	36
3.4 Görüntü Tabanlı Hareket Analizi	40
3.5 Bilgisayar Destekli Katı Modelleme.....	41
3.5.1 Matlab –Simmechanic.....	42
3.6 Kinematik Analizine Dayalı 3B Modelleme Simülasyon ve Uygulama Sistemi	43
3.6.1 Uygulama Sistemine ait Temel Donanımlar	46
3.6.1.1 Mikro Denetleyici	46
3.6.1.2 Motor Sürücü	47
3.6.1.3 Futaba S3003 Servo Motor	48
3.6.2 Sistemin Başarım Testi	48
4.BULGULAR	50
4.1 Kinovea Ortamında Canlı Görüntü Üzerinde Kinematik Analiz.....	50
4.2 Katı Modelin Solidworks Ortamında Tasarlanması	51
4.3 Katı Modelin Simülasyon Sistemi ve Sistemin Test Edilmesi	52
4.4 Uygulama Sisteminin Oluşturulması	57
4.5 Uygulama Sisteminin Görüntü Üzerinden Kinematik Analizi	59
4.6 Simülasyon Sistemi ve Gerçek Sistemin Karşılaştırılması.....	61
5.TARTIŞMA ve SONUÇ	63
6.KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EKLER	74

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

3B/3D	Üç boyutlu
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CAD	Computer Aided Design / Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Computer Aided Engineering / Bilgisayar Destekli Mühendislik
CATIA	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée /Eşgüdümlü Üç Boyutlu Etkileşimli Uygulama
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency / Defansif İleri Araştırma Projeleri Ajansı
DHM	Digital Human Modeling / Dijital İnsan Modelleme
DOF	Depth of Field / Alan derinliği
EMG	Elektromiyografi
FTR	fizik tedavi ve rehabilitasyon
GUI	Graphical User Interface / Grafiksel Kullanıcı Arayüzü
I2C	Inter-Integrated Circuit
KMFÖ-88	Kaba Motor Fonksiyon Ölçeği-88
MATLAB	Matrix Laboratory
PD	Proportional Derivative / oransal-türevsel
PID	Proportional Integral Derivative / oransal-integral-türevsel
PLA	Polilaktik Asit
PWM	Pulse-Width Modulation / Sinyal Genişlik Modülasyonu
REBA	Rapid Entire Body Assesment /Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi
RULA	Rapid Upper Limb Assessment / Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirmesi
RUR	Rossum's Universal Robots
SCARA	Selective Compliance Assembly Robotic Arm
STL	Standart Triangle Language
TPA	Zaman-tepe ivmesi
UV	Ultraviyole / Morötesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Eklem çeşitleri (Çengelci ve Çimen 2005).	6
Şekil 2.2 Kartezyen robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).	6
Şekil 2.3 Silindirik robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).	7
Şekil 2.4 Küresel robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).	8
Şekil 2.5 SCARA robot kolu ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005, Çırak 2014).	8
Şekil 2.6 Lola insansı robotu (Anonim 2020).	11
Şekil 2.7 “Walktrainer” konsepti (Bouri vd. 2007).	25
Şekil 3.1 At ve insanın anatomik olarak benzer bölgeleri (Nina 2016).	30
Şekil 3.2 Genel homojen matrisi (Küçük ve Bingöl 2004).	33
Şekil 3.3 D-H tablosu.	33
Şekil 3.4 Eklemlere koordinat yerleştirme.	34
Şekil 3.5 Robot kolunun iki boyutlu düzlemde gösterimi.	35
Şekil 3.6 Denavit-hartenberg yöntemi ile uç işlevcisinin ileri kinematik hesaplanması.	35
Şekil 3.7 Denavit-hartenberg yöntemi ile uç ilevcisinin ileri kinematik hesaplanması (İnt.Kyn.17).	36
Şekil 3.8 Ters kinematik analizi (İnt.Kyn.17).	36
Şekil 3.9 Ters kinematik analizinde farklı çözüm denklem çözümlerinin tepkisi (İnt.Kyn.17).	37
Şekil 3.10 Ters kinematik analizinde farklı çözüm denklem çözümlerinin tepkisi (İnt.Kyn.17).	38
Şekil 3.11 Geliştirilen simülasyon sisteminin blok diyagramı.	44
Şekil 3.12 Geliştirilen uygulama sisteminin blok Diyagramı.	45
Şekil 3.13 Arduino nano devre şeması (Arduino Forum 2019).	46
Şekil 3.14 PCA9685 servo motor sürücü kartının devre şeması (Adafruit 2012).	47
Şekil 3.15 Futaba S3003 servo motor (Anonim).	48
Şekil 3.16 Geliştirilen sistemin kıyaslama akış diyagramı.	49
Şekil 4.1 Normal Yürüyüşün Kinovea Ortamında Kinematik Analizi.	50
Şekil 4.2 Kenter yürüyüşün kinovea ortamında kinematik analizi.	51
Şekil 4.3 Tırıs yürüyüşün kinovea ortamında kinematik analizi.	51
Şekil 4.4 Katı modelin simulink blok diyagramı.	53
Şekil 4.5 Kenter ön bacağın birinci çözüm uzayı sonuçları.	55
Şekil 4.6 Kenter ön bacağın ikinci çözüm uzayı sonuçları.	56
Şekil 4.7 Kenter ön bacağın üçüncü çözüm uzayı sonuçları.	56

Şekil 4.8 Kenter ön bacağın dördüncü çözüm uzayı sonuçları.	56
Şekil 4.9 Katı modelin normal yürüyüşünün kinovea ortamında kinematik analizi	60



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Arduino nano başlıca önemli özellikleri.	46
Çizelge 4.1 Kenter yürüyüş için Denklem 4.9'daki fonksiyonun katsayıları.	59
Çizelge 4.2 Normal yürüyüş korelasyon tablosu.	61
Çizelge 4.3 Kenter yürüyüş korelasyon tablosu.	61
Çizelge 4.4 Tırs yürüyüş korelasyon tablosu.	62
Çizelge 4.5 Katı modelin farklı yürüme modelleri arasındaki korelasyon.	62



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Kuka robot(Anonim).....	9
Resim 2.2 Boston dynamic mobil robot (Goode 2020).	10
Resim 2.3 Mikro robot (Bayrak 2018).....	11
Resim 2.4 Soft robotik yengeç (Anonim 2019).	12
Resim 2.5 Haptik cerrahi eğitim simulatörü (Anonim 2018).	13
Resim 2.6 Eastgate center (Fehrenbacher 2012).....	15
Resim 2.7 Shinkanzen treni (İnt.Kyn.4).	16
Resim 2.8 Askeri alanda biyomimetik katır (DARPA 2010).	17
Resim 2.9 Akıllı ilaç taşıma sistemi (Anonim).....	18
Resim 2.10 Hipoterapi simulatörü (Anonim).....	20
Resim 2.11 Uzunlar ile modelin eşleştirilmesi (Gelen ve Özcan 2018).	21
Resim 2.12 Tasarlan dış iskelet düzeneğinin üst ekstremiteye bağlanması (Baniqued vd. 2018).....	27
Resim 2.13 Ölçüm üniformasını giyen bir kullanıcının görüntüsü (Trusaji vd. 2022)..	28
Resim 3.1 Kinovea Programı.	41
Resim 3.2 SolidWorks arayüzü.....	42
Resim 3.3 SolidWorks Arayüzü.....	43
Resim 4.1 Katı modelin tasarımı.....	52
Resim 4.2 Katı modelin tasarımı.....	54
Resim 4.3 Katı modelin monte edilmiş insansı bacağı.	57
Resim 4.4 Gerçekleştirilen uygulama Sistemi.	58

1. GİRİŞ

Tabiatın doğal yaşam döngüsü insanların sağlık, sosyal ve fen bilimleri alanlarında yaptıkları keşiflere ilham kaynağı olmuştur. Bu yaşam döngüsünün gözlemlenmesi mekanizmalar, yönetim süreçleri, program algoritmaları vb. birçok sistemin geliştirilmesine yol açmıştır (Int. Kyn.1). Canlıların fizyolojisine ve anatomisine olan mühendislik bakış açısı biyomekanik biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Gelişen bilgisayar teknolojileri canlıların davranışlarını daha detaylı incelemeye, hareketlerin kinetik ve kinematik analizlerini yaparak gerçek uzuvları taklit etmeye olanak sağlayan teknolojilerin geliştirilmesini sağlamıştır. Literatürde biyomimetik veya biyomimikri olarak adlandırılan bu alan gelecek teknolojilerin geliştirilmesinde bilim insanları ve tasarımcılar için farklı bakış açıları geliştirmesine muazzam bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle biyomekanik ile robot teknolojilerinin birleşmesi sonucunda üretim, sağlık, askeri vb. alanlarda faaliyet icra eden biyomimetik robotlar yaygınlaşmaya başlamıştır. Biyomimetik robotların yapıları ve duyuları doğal seleksiyon sonucu yaşam koşullarına en iyi seviyede adapte olmuş kuş, böcek vb. farklı canlıları taklit edilmesi ile geliştirilmektedir.

Canlı organizmaların 3 boyutlu evren üzerindeki hareketlerinin bilimsel analizine dayalı ilk çalışmalar Giovanni Alfonso Borelli tarafından 1608-1679 yılları arasında başlatılmıştır (Int. Kyn.2). Özellikle 1830 ile 1904 arasında Eadweard Muybridge tarafından uzaydaki bir hareketin ardışık fotoğraflarının çekilmesiyle, canlıların hareketleri üzerinde yapılan araştırmalara olan ilgi artmıştır. Örneğin dörtnala koşan atın dört ayağının aynı anda havada olup olmayacağı konusundaki tartışma 1878'de Muybridge tarafından bir hat üzerine 12 kamera yerleştirmesi ve dörtnala koşan bir atın hat boyunca her bir kamerayı tetiklemesi ile kanıtlanabilmiştir. Muybridge, Bu deneyden elde ettiği ilk fotoğraf serisi ile dörtnala koşan atın dört ayağının aynı anda havada olduğunu ispatlamıştır (Int.Kyn.2) 1970'lerde Northeastern Üniversitesi'nde biyoloji profesörü olan Joseph Ayers tarafından ilk biyomimetik robot olarak bir ıstakoz geliştirilmiştir. Gerçek ıstakozların eylemleri tersine tasarlanmış ve robotik ıstakozla gerçek olanlarla benzer bir davranış veren bir eylem kütüphanesini programlanmıştır. Bu ilk çalışmalardan sonra literatüre giren birçok biyomimetik robot tasarlanmış ve

kullanılmaya başlanmıştır. Bu robotlar biyomedikal alanında teşhis, cerrahi, acil kurtarma vb. görevleri gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Sağlık alanında kullanımına örnek olarak atın karakteristik hareketlerini taklit ederek otizm gibi fiziksel ve/veya zihinsel problemi olan bireylere duyuşal ve motor girdi sağlayan hipoterapi yöntemi verilebilir.

Kinematik ve kinetik analizin daha detaylı yapılmasına olanak sağlayan yüksek hızlı kamera, yüksek torklu eyleyici, analog ve sayısal dönüştürücülerdeki gelişim biyomimetik robotların gelişimine hız kazandırmaktadır. Kinetik, hareketi ona neden olan ve o hareketten doğan kuvvetleri de göz önünde bulundurarak incelerken; kinematik, hareketi konum ve hız değişimine göre incelemektedir. Eklem değişkenleri ile robotun uç noktasının pozisyonu ve yönelmesi arasındaki ilişki robot kinematiğinde incelenmektedir. Robotun eklem açıları yardımıyla uç işlevcisinin pozisyon ve yönelimi ileri kinematik yöntemi ile belirlenebilmektedir. Robotun ters kinematiği ise robotun uç işlevcisinin pozisyon ve yönelimi bilinen durumlarda robotun sahip olması gereken eklem açılarına ulaşmayı amaçlamaktadır. İleri ve ters kinematik analizler için homojen dönüşüm yöntemi, Denavit-Hartenber yöntemi, üssel yöntem, sıfır referans yöntemi ve Pieper-Roth yöntemleri kullanılmaktadır. Denativ-Hartenberg yöntemi ileri ve ters kinematik hesaplamaları için basit ve sistematik bir yaklaşım sunduğu için literatürde daha fazla tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Küçük ve Bingöl 2004).

Bu tez çalışmasında anotomisi insan anatomisine benzeyen atların doğal yürüyüş çeşitlerinden normal yürüme, Kenter / Eşkin ve Tırıs yürüyüşleri, Kinovea ortamında görüntü işleme teknikleri ile kinematik analizlerinin belirlenip Solidworks ortamında 3B katı modelleri çıkartılmıştır. Çıkarılan katı modellere hareket yeteneğinin kazandırılması Matlab-SimMechanic platformunda hazırlanmış olan simülasyon yazılımı ile sağlanmıştır. Görüntü işleme ve simülasyon sonucunda elde edilen bulgular kıyaslanarak hareketlerin geliştirilen bir sisteme aktarma başarımı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma tasarım ve yapım aşaması maliyetli olan biyomimetik sistemleri, fiziksel olarak gerçekleştirmeden önce denenmesine olanak sağlayan bir sistemin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem ile eklem açıları, doğru konuma ulaşma becerileri ve hareket edebilme yeteneği analiz edilmiş olup hareketlerin gerçekleştirilmesi için gereken matematiksel denklemlerin nasıl çıkarılabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak,

geliştirilen sisteminden edinilen bilgiler formülize edilerek elde edilen denklemler sayesinde biyomimetik yöntemi kullanılarak farklı canlı gruplarının hareket analizi, simülasyonu ve kontrolü için bir tasarım süreç modeli oluşturulmuştur.

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır. Literatür bilgileri başlığı altında biyomimetik ve mekanik hipoterapi simülatörlerin fizik tedavi ve rehabilitasyon (FTR) alanında kullanımı ile ilgi yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar incelenmiştir. Materyal ve metot başlığı altında insan ve at anatomisi arasındaki benzer ve farklılıklar belirtildikten sonra doğal at yürüyüş şekilleri açıklanmıştır. Ayrıca robotik sistemlerin ileri ve ters kinematik denklemlerinin çıkarılması için kullanılan Denavit-Hartenberg yönteminin kullanımı da açıklanmıştır. Daha sonra biyomimetik sistemlerin görüntü analizlerinin nasıl yapıldığı belirtildikten sonra robotik sistemlerin katı modelleme ve simülasyon platformlarına aktarım yöntemi izah edilmiştir. Bölümün sonunda geliştirilen sistemin genel çalışma prensibi ve sistem başarısının nasıl ölçüleceği verilmiştir. Bulgular başlığı altında çalışma sonucunda elde edilen nicel ve nitel veriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Robotik Sistemler

Robot kavramı 1921’de Karel Čapek tarafından yazılan Rossum’un Evrensel Robotlar adlı bilim kurgu hikâyesinde ilk kez tanıtılmıştır. 1940’lı yıllarda Asimov ise robotu insan görünüşünün bir otomasyonu olarak betimlemiştir. Isaac Asimov’a göre robot programlanmış olduğu vazifeleri ve bunların dışındaki diğer davranışları belirli etik kuralları takip etmelidir. Buna göre Isaac Asimov tarafından robotik sistemlerin üç temel yasası belirlenmiştir (Asimov 2004).

1. Bir robot bir insana zarar veremez veya kayıtsız kalarak bir insanın zarar görmesine neden olamaz.
2. Birinci yasa ile çatışmamak şartı ile bir robot, insanlar tarafından verilen emirlere uymak zorundadır.
3. Birinci ve ikinci yasa ile çatışmamak şartı ile bir robot kendi varlığını korumalıdır.

Amerikan Robot Enstitüsü robotu “Malzemelerin, parçaların ve araçların hareket ettirilebilmesi için tasarlanmış olan çok fonksiyonlu ve programlanabilir manipülatör veya farklı görevleri yerine getirebilmek için değişken programlı hareketleri gerçekleştirebilen özel araç” olarak tanımlamaktadır (İnt.Kyn.3).

Yüksek hızlı kamera, yüksek torklu eyleyici, analog ve sayısal dönüştürücüler gibi donanım bileşenlerinin robotik sistemlere entegre edilmesi hareket kabiliyetinin artırılmasını sağlamıştır. Bu sayede uzay, askeri, tıbbi, arama kurtarma, hizmet sektörü ve ev uygulamaları gibi birçok alanda kullanılma imkânı ortaya çıkmıştır (Everett 1995, Jones vd. 1993). Donanım bileşenlerindeki gelişmelerle birlikte gömülü sistem yazılımlarındaki kontrol algoritmaları ve yöntemlerindeki gelişmeler robotik sistemlerin araştırılmasına, geliştirilmesine ve farklı uygulama örneklerinin oluşturulmasına olanak sağlamıştır (Gürgüze ve Türkoğlu 2019).

Canlıların yaşamsal aktivitelerini, eylemlerini ve davranışlarını inceleyerek onları taklit eden robot araştırmaları biyomimetik sürü robotların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu

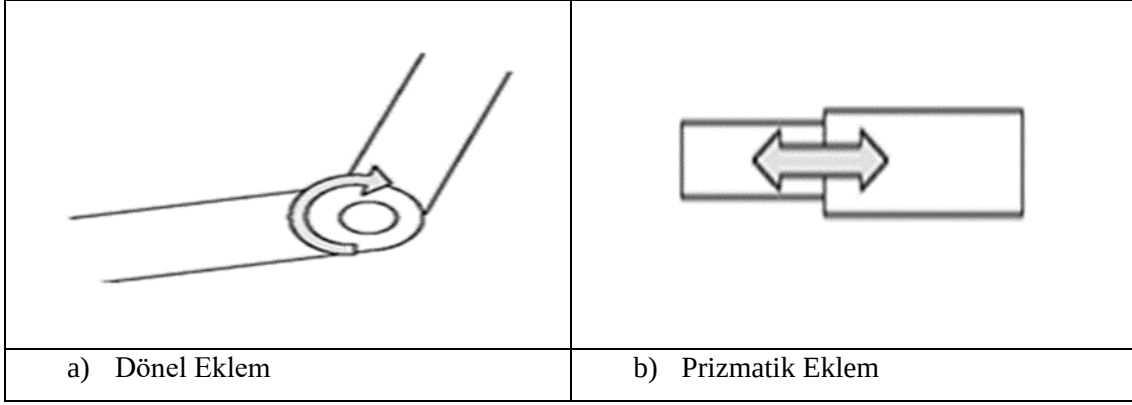
alandaki çalışmalarda doğal seleksiyon sonucu yaşam koşullarına en iyi seviyede adapte olmuş kuş, balık, arı, karınca sivrisinek, arı, su böceği gibi küçük canlılar üzerine odaklanılmıştır (Gürgüze ve Türkoğlu 2019). Donanımsal (Mekanik, elektronik devre elemanlar, dönüştürücüler) yapıların küçük boyutlarda üretilebilmesi insan ve hayvan vücudunda teşhis ve keşif amaçlı mikro ve nano boyutlu robotların geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Wnag vd. 2018). Bununla birlikte haptik sistemler kullanılarak otonom veya işbirlikçi robotlar ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir (Fankhauser vd. 2016, Rozo vd. 2016,).

2.2 Robotların Sınıflandırılması

Robotik sistemler eklem yapılarına, işlev özel noktalarına, çalışma prensibine, kullanım alanlarına ve kontrol yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel robotlar işlev özelliklerine ve eklem sayılarına, mobil robotlar ise kullanım alanlarına ve çalışma mekanizmalarına göre sınıflandırılmaktadır. Sabit robotlar eklem yapılarına göre kartezyen robotlar, silindirik robotlar, küresel robotlar, SCARA tip robotlar, dönel eklemlili robotlar ve mafsallı robotlar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Mobil robotlar ise insansı robotlar, sürü (biyomimetik) robotlar, mikro/nano robotlar, biyo ilhamlı robotlar, işbirlikçi robotlar olarak sınıflandırılmaktadır (Çengelci ve Çimen 2005).

2.2.1 Sabit Robotlar

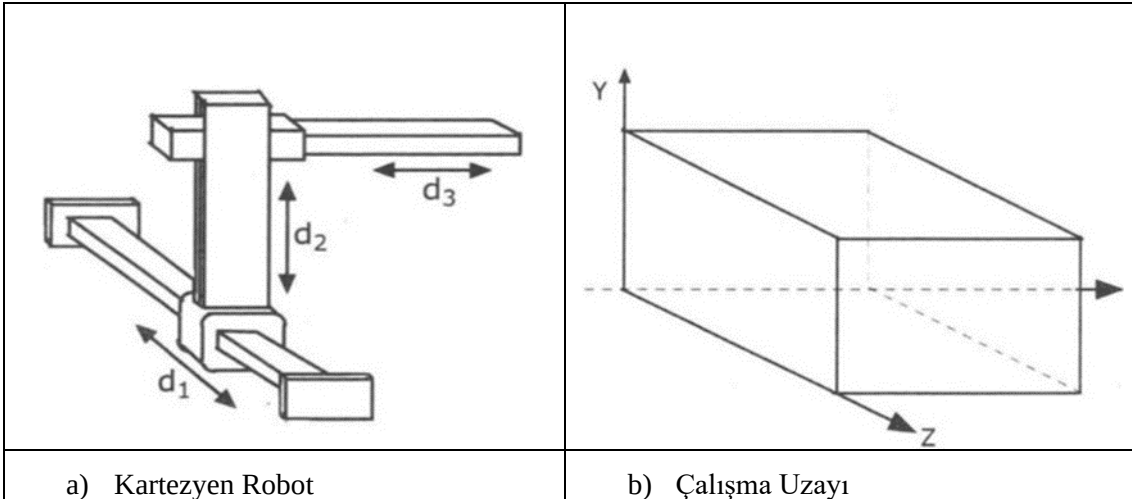
Sabit robotlar çoğunlukla robotlar için hazırlanmış iyi koşullu ortamlarda çalışan endüstriyel robot manipülatörleridir. Endüstriyel robotlar, araba üretim tesislerinde lehimleme, parça boyama, montaj, kesme gibi tekrarlayan görevleri gerçekleştirir. Eklemler bağlantılar arasında göreceli olan hareketin gerçekleştirilmesi için kullanılmaktadır. Sabit robotlar eklem yapılarına göre (Şekil 2.1) dönel veya prizmatik eklemleri kullanırlar. Sabit robotlar çalışma uzayına göre ise Kartezyen, silindirik, küresel, SCARA ve mafsallı robotlar olarak 5 kategoride incelenebilir.



Şekil 2.1 Eklem çeşitleri (Çengelci ve Çimen 2005).

2.2.1.1 Kartezyen Robotlar

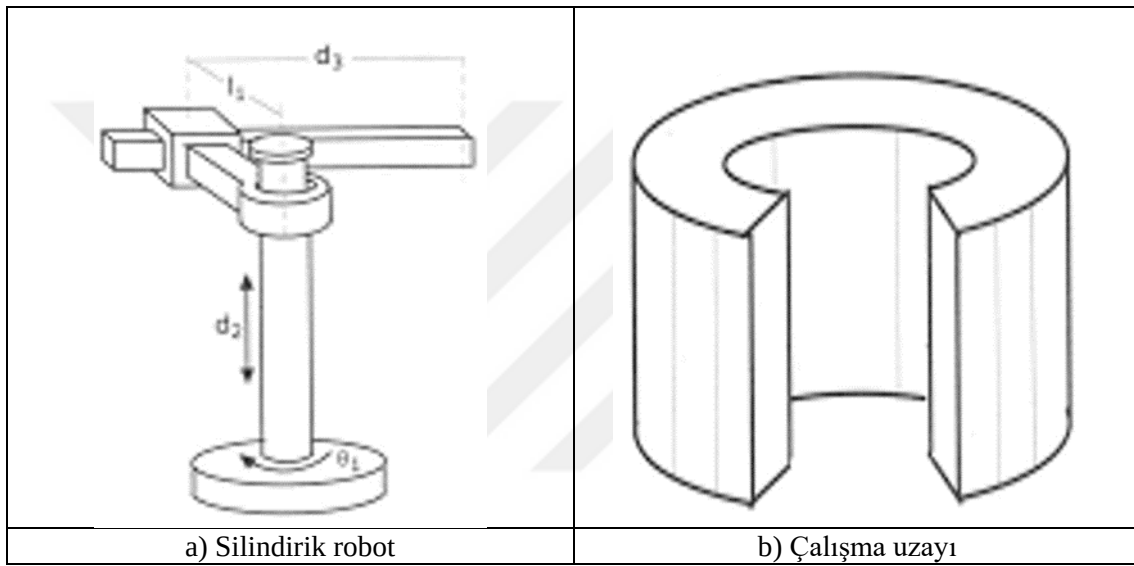
Kartezyen manipülatörleri (Şekil 2.2a) üç prizmatik tip eklem birbiri dik eksen olacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu sistem Kartezyen düzlemde doğrusal hareket eder ve sadece tutma ve taşıma hareketi yapma yeteneğine sahiptir. Çalışma uzayı (Şekil 2.2b)de görüldüğü gibi kare veya dikdörtgen prizma şeklinde olduğundan bükülme ve eğilme hareketleri yapılamamaktadır. Yük taşıma kapasitesi diğer robot tiplerine göre büyük olduğu için genellikle yük araçlarına yük yükleme ve boşaltma, imalat alanlarında ise ağır yükleri montaj alanına taşıma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Çengelci ve Çimen 2005).



Şekil 2.2 Kartezyen robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).

2.2.1.2 Silindirik Robotlar

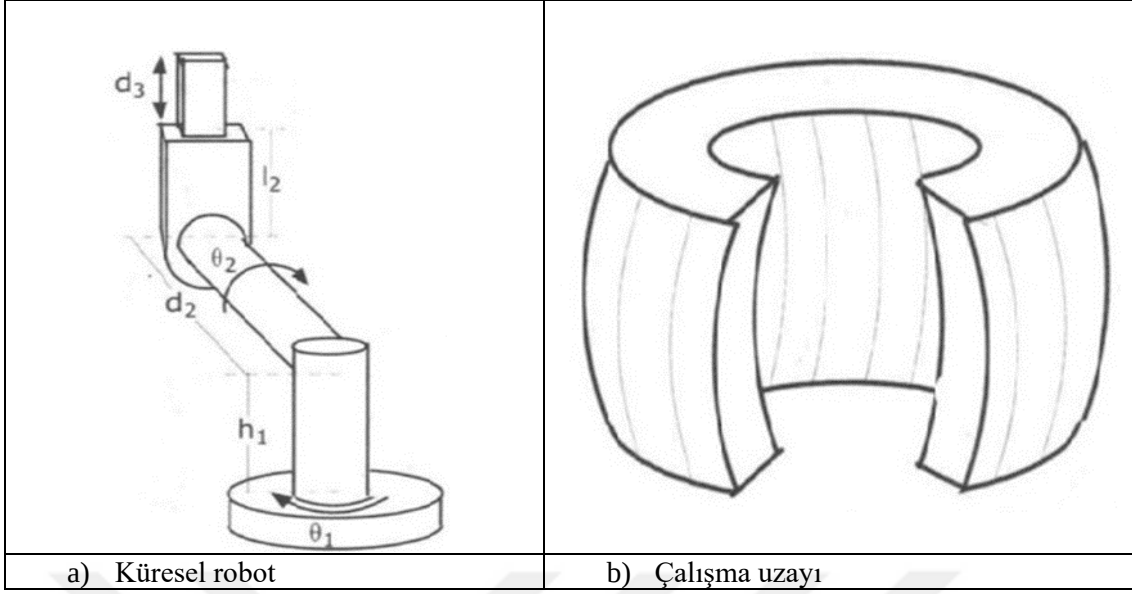
Silindirik robotlar (Şekil 2.3a) dönel bir eklem üzerine Kartezyen düzlemde doğrusal hareket edebilen prizmatik eklemler kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 2.3b’de görüldüğü üzere silindirik bir çalışma uzayına sahip olan silindirik robotlar Kartezyen robotlar göre daha geniş bir serbestlik derecesine sahiptirler. Silindirik robot kollar deniz altı, uzay gözlem araçları gibi ağır çalışma koşullarında veya endüstride nokta kaynağı gibi işlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Çengelci ve Çimen 2005).



Şekil 2.3 Silindirik robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).

2.2.1.3 Küresel Robotlar

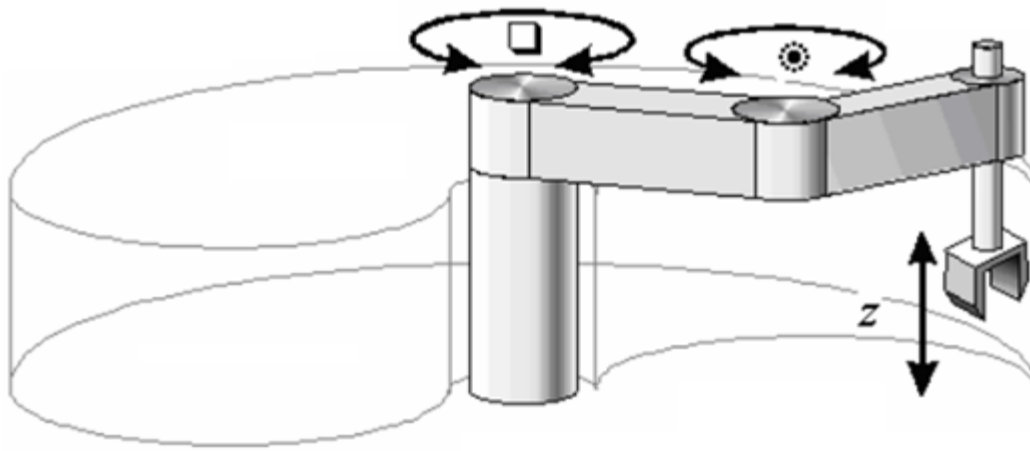
Küresel robotlar (Şekil 2.4a) insanın bel, omuz ve dirseğini andıran 2 dönel ve 1 prizmatik eklemden oluşmaktadır. Bel ve omuzdaki dönel eklemler sayesinde kendi ekseninde dönebilirken prizmatik eklemi dirseğe uzama ve kısaltma hareketi kazandırmaktadır. Bu eklemler sayesinde (Şekil 2.4b) deki çalışma uzayına sahiptir. Genellikle eğme, bükme işlerinde ve kameralı izleme işlerinde kullanılmaktadır (Çengelci ve Çimen 2005).



Şekil 2.4 Küresel robot ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005).

2.2.1.4 SCARA Tip Robotlar

Japon Endüstriyel Konsorsiyumu tarafından Seçici Uyumlu Montaj Robot Kolu (SCARA Selective Compliance Assembly Robotic Arm) Yamanashi Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Bu tip robot çok yüksek hıza ve en iyi tekrarlama kabiliyetine sahiptir. SCARA tipi robotların (Şekil 2.5) kinematik zincirlerinin ilk iki eklemi dönel, üçüncüsü kayar ekleme sahiptir. Dikey yüklerde yüksek rijitlik ve yatay yüklere uyum sağlama kabiliyeti vardır.



Şekil 2.5 SCARA robot kolu ve çalışma uzayı (Çengelci ve Çimen 2005, Çırak 2014).

2.2.1.5 Mafsallı Robotlar

Mafsallı robotların tasarımı (Resim 2.1) insan kolundan esinlenerek tasvir edilmiştir. Mafsallı robotlar insan kolunun yapabileceği hareketleri gerçekleştirebilmek için geliştirilmiştir. Mafsallı robotlar insan kollarındaki hassasiyete ve esnekliğe sahip olup değişik görevlerde insan kolunu taklit eder. Bu tip robotlar tüm eklemleri dönel olduğundan dolayısıyla en yetenekli manipülatörlerdir. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorlar tercih edilmektedir (Alp 2012). Kol eklemleri robotlar altı eksenle de rahatça hareket ederler. Bu altı eksenle ilk üç tanesi kol hareketini sağlarken, diğer üç tanesi ise bilek hareketini gerçekleştirmektedir (Güzel 2008). Endüstriyel uygulamalarda (Boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.) geniş kullanım alanına sahiptirler.



Resim 2.1 Kuka robot(Anonim).

2.2.2 Mobil Robotlar

Mobil robotlar (Resim 2.2) herhangi bir fiziksel konuma sabit olmamasına rağmen kendi ortamlarında hareket etme yeteneğine sahiptirler. Havada, su altında veya karada hareket ederek istenilen görevleri gerçekleştirmektedirler (Gürgüze ve Türkoğlu 2019). Mobil

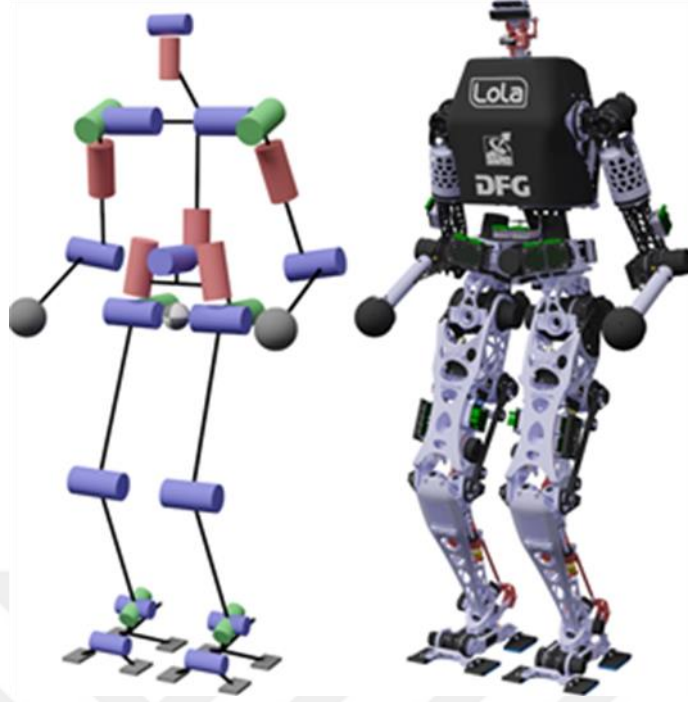
robotlar hareket sistemlerine göre tekerlekli, paletli ve ayaklı olabilmektedir. Mobil robotlar endüstriyel robotların aksine geniş, belirsiz ve kötü koşullu ortamlarda hareket ederek görevlerini yerine getirmektedir. Yüksek performansları, esnek ve pratik olmaları nedeniyle arama kurtarma çalışmasında, uzay projelerinde, insansız hava araçlarında, müdahalesi zor cerrahi operasyonlarda etkin ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Gürgüze ve Türkoğlu 2019).



Resim 2.2 Boston dynamic mobil robot (Goode 2020).

2.2.2.1 İnsansı Robotlar

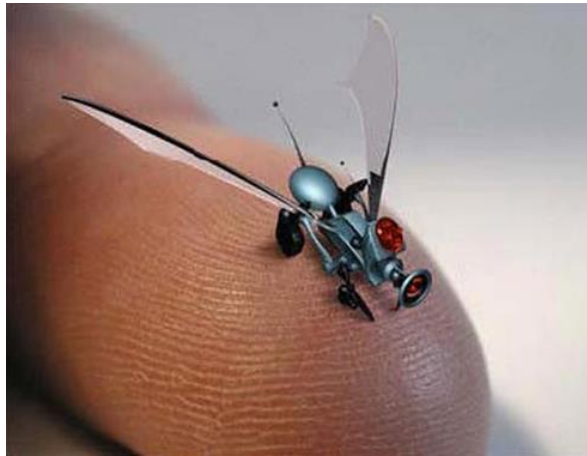
Araştırmacılar, insanların algısal ve motor becerileri kazanmak için duyuşal bilgilerden nasıl öğrendiği konularını araştırmak amacıyla insansı robotları (Şekil 2.6) geliştirmektedir. Bu bilgi, insan davranışının hesaplamalı modellerini geliştirerek fiziksel engelli bireylerin kayıp uzuvlarının yerini alabilecek karmaşık protezlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Choudhury vd. 2018). Bununla birlikte insansı robotlar resepsiyon yöneticileri, otomotiv üretim hattı çalışanları vb. fiziki olarak ağır koşullara sahip meslekler için de geliştirilmektedir. Bu robotlar insan formunda tasarlanmış olup uygun bir yazılıma sahip oldukları sürece teorik olarak bir insanın yapabileceği her görevi yerine getirebilmektedirler.



Şekil 2.6 Lola insansı robotu (Anonim 2020).

2.2.2.2 Mikro-Nano Robotlar

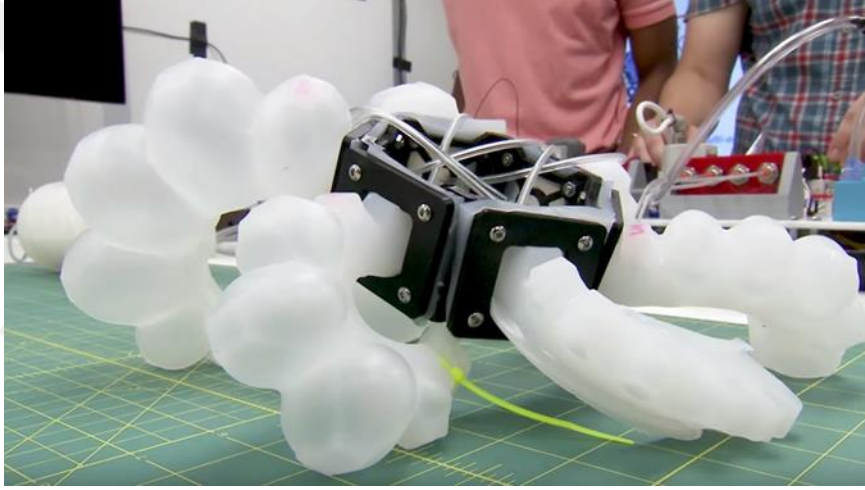
Mikro-Nano robotlar (Resim 2.3) temel olarak insanları koruma veya patojenlere karşı tedavi sağlamak için geliştirilmiş mikro ve nano (1nm-100nm) boyutlu cihazlardır. Hem tıp hem de endüstriyel alanlarda atomik, moleküler ve hücresel düzeydeki çalışmalar hedeflenmektedir. Ayrıca nano boyutlu yapılandırmalar tıp alanında robotik ilaç salınım sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Mazumder vd. 2020, Soto vd. 2020).



Resim 2.3 Mikro robot (Bayrak 2018).

2.2.2.3 Biyo İlhamlı Robotlar

Biyo-ilhamlı robotik sistemler, biyolojik sistemleri incelemeye ve mühendislik alanındaki bir sorunu çözebilecek mekanizmaları geliştirmeye yönelik sistemlerdir. Daha spesifik anlamda biyomimikri de dahil olmak üzere biyolojik sistemlerden ilham alan robotlardır. Biyomimikri doğadan kopyalarken, biyo-ilhamlı tasarımlar doğadan öğrenip sonrasında doğada gözlemlenen sistemden daha basit ve daha etkili bir mekanizma oluşturmaktadır. İlaveten biyomimikri, soft robotik (Resim 2.4) adı verilen farklı bir robotik dalının geliştirilmesine de yol açmıştır (Gürgüze ve Türkoğlu 2019).



Resim 2.4 Soft robotik yengeç (Anonim 2019).

2.2.3 Haptik Sistemler

Yunanca'dan gelen haptik kelimesi haptikos "dokunma duyusuna ilişkin, dokunsal" anlamına gelmektedir. Kinestetik iletişim veya 3D dokunma olarak da bilinen haptik teknolojisi, kullanıcıya kuvvetler, titreşimler veya hareketler uygulayarak dokunma hissiyatını yaratabilen bir teknolojiyi ifade etmektedir (Biswas ve Visell 2019). Bu teknoloji bir bilgisayar simülasyonunda sanal nesneler oluşturmak, sanal nesneleri kontrol etmek ve uzaktan kontrolünü geliştirmek için kullanılmaktadır. Dokunsal teknolojinin en eski uygulamalarından biri, kontrol yüzeylerini çalıştırmak için servo mekanizma sistemlerini kullanan büyük uçak simülatörleridir. Tıbbi simülasyon (Resim

2.5) için dokunsal arayüzler, laparoskopi ve girişimsel radyoloji gibi minimal invaziv prosedürlerde, eğitim ve diş hekimliği öğrencilerinin eğitimi içinde farklı uygulamaları geliştirilmiştir (Priplata vd. 2003, Sharma vd. 2011, Kapoor vd. 2014, Piggott vd. 2016, Pinzon vd. 2016, Rashid 2017, Towers vd. 2019).



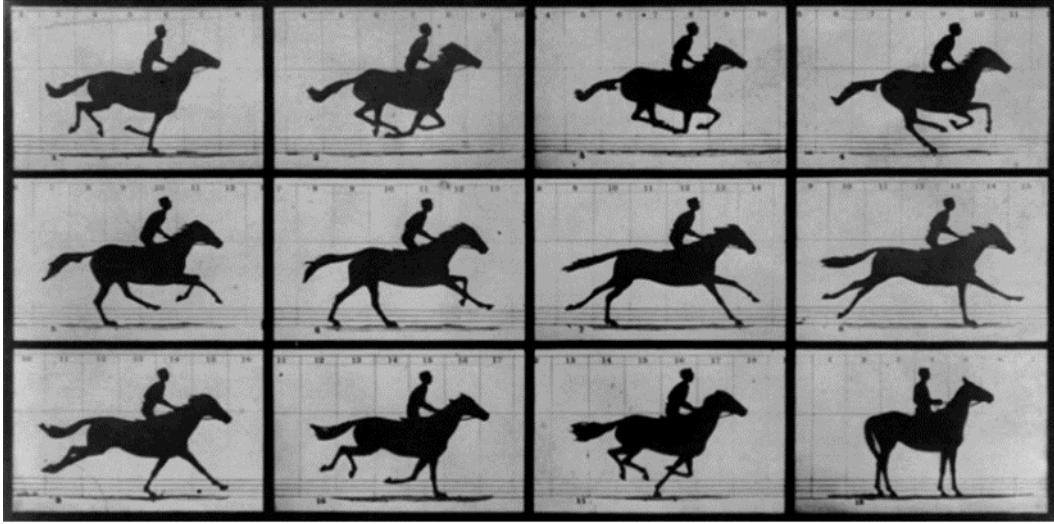
Resim 2.5 Haptik cerrahi eğitim simatörü (Anonim 2018).

2.3 Biyomimetik

Doğadan fikirler edinerek bilim, mühendislik, tıp alanlarında faydalı olabilecek yöntemleri geliştirmek için doğa ve doğal olguların incelenmesidir. Biyomimetik için doğadan daha iyi bir model olmadığı düşüncesine dayanarak üretkenlik ve fonksiyonda mükemmel sonuçlar elde edilebileceği fikrine odaklanılmaktadır (Hwang vd. 2015). Bu fikir ayrıca israfı ortadan kaldırarak bilim insanları ve tasarımcılar için farklı bakış açılarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Biyomimetik çalışmalara örnek olarak köpekbalığı derisinin yapısından esinlenerek geliştirilen sıvı akış sürtünmesini azaltan yüzme kıyafetleri, çapaklardan modellenen cırt cırt bağlantı elemanları, kuş görünümünden geliştirilen uçak modelleri ve deniz kabuklarının omurgasından kopyalanan sabit yapı malzemeleri verilebilir. Şu anda soyu tükenmiş hayvanların diş yapılarından esinlenen bıçaklardan ve baltalardan, son teknoloji

karbon nano malzemelere kadar birçok biyo-mühendislik ürünü insanlık tarihi boyunca kullanılmıştır. Örneğin Leonardo da Vinci 1452 ile 1519 yılları arasında kuştan esinlenerek uçan makine tasarlamıştır (Hwang vd. 2015). Giovanni Alfonso Borelli 1608-1679 yılları arasında canlı organizmaların 3 boyutlu evren üzerindeki hareketlerini bilimsel analizine dayalı yapmıştır (Int. Kyn.2). Eadweard Muybridge ise 1878 yılında yaş kolodyum tekniğiyle, dörtlü giden bir atın bütün hareketlerini kayıt altına alarak “Bir at dörtlü koşarken dört ayağı birden aynı anda yerden kesilir mi” sorusuna cevap bulmuştur. Muybridge bu cevabı bir hat üzerine 12 kamera yerleştirerek dörtlü koşan bir atın hat boyunca her bir kamerayı tetiklemesi ile elde ettiği ilk fotoğraf serisi (Resim 2.6) ile ispatlamıştır (Int. Kyn.2).



Resim 2.6 Eadweard Muybridge hareket halindeki çekmiş olduğu At fotoğraf serisi (Eadweard Muybridge 1818).

Biyomimetik, yeni ürünlerin inovasyon temeli olarak doğal özellikleri kullanmanın ötesine geçerek kimya, biyoloji, mimarlık, mühendislik, tıp, askeri, ulaşım, biyomedikal vb. mühendislik alanlarında insana kolaylık sağlamanın yanı sıra genel endüstriye de katkı sağlamaktadır.

2.3.1 Mimarlık Alanında Biyomimetik

Biyomimetik mimarisinin en önemli örneklerinde biri Afrika çayırlarındaki 6m yüksekliğindeki termit yuvalarıdır. Bu yuvalar toprak, ağaç kabuğu, kum ve termit

tükürüğünden yapılmıştır (Emerson 1938, Bonabeau ve Theraulaz 1998, Noirot ve Darlington 2000). Termitler ısıya karşı son derece hassas canlılardır. Dış sıcaklık 40°C'ye kadar yükselse bile yuvalarının iç sıcaklığı 30°C' de sabit kalmaktadır. Termitlerin yuvaları yapma şekli insan tarafından yapılan herhangi bir havalandırma, ısıtma ve soğutma sisteminden daha etkilidir (Turner ve Soar 2008). Mimar Pearce termit yuvalarının bu özelliklerinden esinlenerek Zimbabve'nin başkenti Harare'de dünyanın ilk doğal soğutma yapısı olan Eastgate Center'ı (Resim 2.7) inşa etmiştir. Bu binanın çatısında ve alt katlarında termit yuvasına benzer şekilde doğal havalandırmaya izin veren delikler açılmıştır. Bu sayede sıcak hava çatıdan dışarı çıkar ve alttan gelen soğuk hava akışı ise binayı havalandırmaktadır. Bu tasarım binanın enerji tüketimini emsallerine göre %90 daha verimli tutarken dış sıcaklık 38°C'nin üzerinde olsa bile bina iç sıcaklığını 24°C'de tutmayı başaramıştır (Hwang vd. 2015).



Resim 2.6 Eastgate center (Fehrenbacher 2012).

Freiburg, Almanya'daki binalarda doğal aydınlatmayı optimize etmek için kediotunun fototropik fonksiyonunu kullanmıştır (Yuan vd.2017). Fototropizm, bitkinin sürgün büyümesini bir ışık kaynağı yönüne doğru yeniden yönlendirme yeteneğidir. Mercan

resifleri ve bitkilerin yapıları ise binaları daha güçlü, daha hafif ve daha kolay inşa etmek amacıyla taklit edilmiştir (Zhou vd. 2013, Chen vd. 2015, Mirzaali vd. 2017).

2.3.2 Ulaşım Alanında Biyomimetik

Doğal seleksiyon, türlerin evrimine yol açarak yaşamın kilit mekanizmalarından birini oluşturmuştur. Zorlukla karşı doğanın bu adaptasyon yeteneği insan zekâsı için ilham ve öğretim kaynağı olmuştur. Ulaşım alanında da yenilik yapmak için bu doğal başarılarından etkilenilmiştir. Yalıçapkını kuşu yaşamını sürdürmek için mümkün olduğunca az hız kaybedip az sıçrama yaparak suda balık avlamaktadır. Bu küçük kuş maksimum hızını korurken kıpırdamadan suya nüfuz etmesini sağlayan aerodinamik bir gagaya sahiptir. Japonya'nın Osaka ve Hakata şehirlerini birbirine bağlayan Shinkansen hızlı treni birçok tünelden geçmektedir. Tren bir tünelden geçtiğinde hava aniden sıkıştırılarak hız kaybına ve fazla gürültü yapmasına neden olmaktadır. Japon mühendisler avını suda yakalamak için dalmayı başaran yalıçapkının yaşamını inceleyerek iki olguyu karşılaştırmıştır. Bir tren tünelden geçtiğinde hava basıncından dolayı aniden güçlü bir dirençle karşılaşır tıpkı yalıçapkının suya dalış sırasında ortamı değiştirdiğinde karşı karşıya kaldığı durum gibidir. Yapılan bilgisayar simülasyonları trenin Shinkansen'in tünellere sorunsuz bir şekilde nüfuz edebilmesi için Resim 2.8'de görüldüğü gibi yalıçapkının silüetini referans alan bir tasarım geliştirmiştir. Bu tasarım sonucu %10 hız kazancı ile birlikte % 15'lik elektrik tüketim verimi elde edilmiştir (İnt.Kyn.4).



Resim 2.7 Shinkansen treni (İnt.Kyn.4).

2.3.3 Askeri Alanında Biyomimetik

Biyomimetğin askeri alanda ilk uygulamalarına örnek olarak Güney Koreli General Yi Sun-Sin'nin Japon askerleri ile savaşmak için kaplumbağadan esinlenerek üretmiş olduğu savaş gemisi (Şekil 2.14) verilebilir. Bu tasarım savaş gemisine zırh özelliği kazandırmakla birlikte yüksek kamuflaj yeteneğini de kazandırmıştır. Askeri alanda mühimmat ve/veya kumanya taşıma için eşek, katır vb. yük hayvanlarından (Resim 2.9a) yararlanılmaktadır. 2010 yılında ABD savunma bakanlığına bağlı DARPA (Defansif İleri Araştırma Projeleri Ajansı) tarafından katırların anatomik ve fizyolojik özellikleri incelenmiş ve (Resim 2.9b)de görülen mekanik mobil robotlar üretilmiştir. Bu robotlar hem taşıma kapasitesi hem de zorlu çevresel koşullara adaptasyon özellikleri ile biyolojik sistemlere göre büyük avantajlar sunmaktadır (İnt.Kyn.5). Bunlara benzer şekilde robot askerler, yunus balığından esinlenerek donanma robotları ve güvercinlerden esinlenerek üretilmiş hava savunma sistemlerinin askeri alanda kullanılmaya başladığı görülmektedir (İnt.Kyn.4).

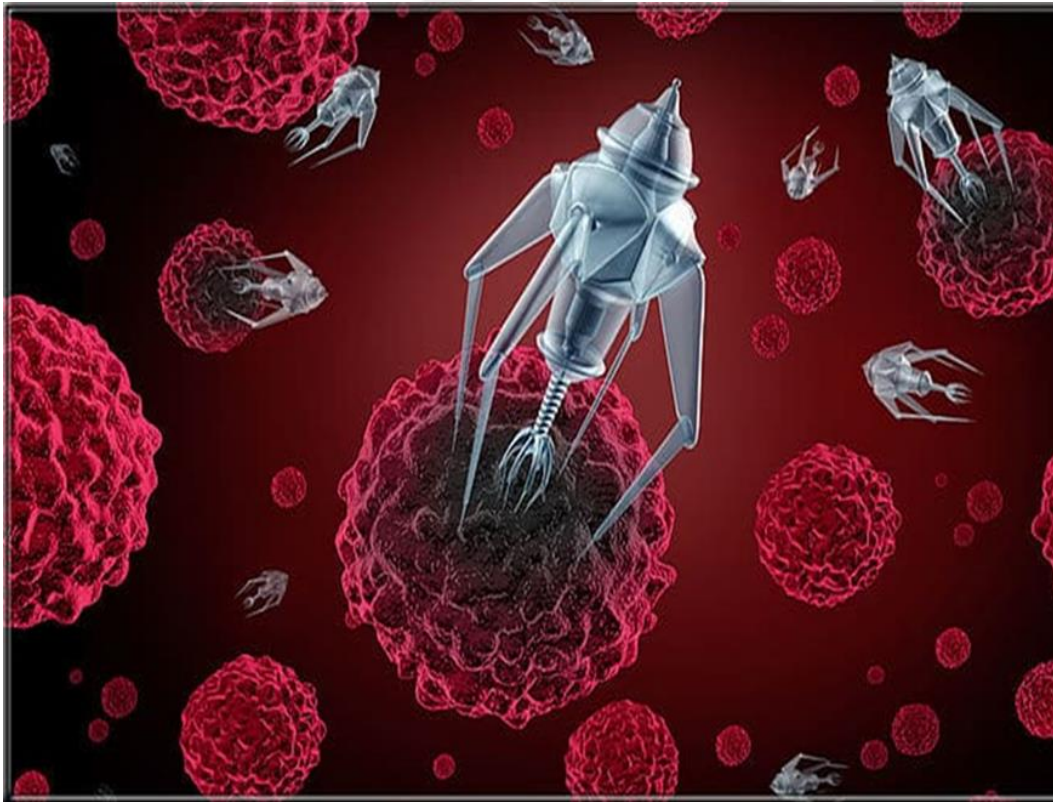


Resim 2.8 Askeri alanda biyomimetik katır (DARPA 2010).

2.3.4 Sağlık Alanında Biyomimetik

Doku mühendisliği sayesinde kalp ve beyin dâhil olmak üzere dokuların dejenerasyonunu daha iyi teşhis etmek, aynı zamanda onları yeni biyoteknolojik ve biyomimetik araçlarla tedavi etmek mümkün hale gelmiştir (Int. Kyn.5). Tovar vd. (2018)'nin “3D baskılı biyoaktif iskeleler kullanarak uzun kemiğin şekli ve fonksiyonel onarımı” adlı

alışmalarında, biyoaktif bir kalsiyum-fosfat yapı iskelesiyle in vivo olarak bir kemik oluşturmuşlardır. Bazen aşı, kan testi, kan bağışı, infüzyon vb. işlemler için enjeksiyon olmak zorunda kalınmaktadır. Bu işlemler her ne kadar zorunlu sağık girişimleri olmakla birlikte birçok insan için korkutucu bir işlemdir. Bunun için Ohio Üniversitesi'nden araştırmacılar iğıne olmanın daha kolay ve rahatsız edici olmayan bir yöntemini bulmak için sivrisineklerin ısırıklarını incelemiştir. Bildiğı üzere sivrisinek ısırıkları neredeyse hissedilemez. Bu özellikten ilham alınarak "Isırmadan sokmak" prensibi ile şırıngalar geliştirilmiştir. Fransız Tissium şirketi deniz solucanından esinlenerek biyolojik bir yapıştırıcı geliştirmiştir. Bu canlı kum kümeleri oluşturabilmek için bağlayıcı görevi gören ve kumun şeklini koruyan proteinleri kullanmaktadır. Tissium bu sentezi ultraviyole (UV) ışına maruz bırakarak birkaç saniye içinde polimerize olan biyolojik bir yapıştırıcı icat etmiştir. Bunların yanı sıra doğı vücuttaki ilaçların dağılımı için ipuçları vermektedir. Resim 2.10'de görüldüğü gibi nanoteknoloji üzerindeki araştırmalarda ilaçların vücutun hedeflenen bölge, organ ve hücrelerine doğrudan ulaşması için çalışılmaktadır (İnt.Kyn.6).



Resim 2.9 Akıllı ilaç taşıma sistemi (Anonim).

2.3.4.1 Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Alanında

Hastalık veya kaza sonucu bireylerin bacak, diz, kalça, omurga vb. bölgelerinde ortopedik rahatsızlıklar meydana gelebilmektedir. Bu hastalıkların tedavisinde, hastanın optimum sürede iyileşebilmesi ve ayrıca ileri yaştaki bireylerin, kas ve iskelet sisteminin gücünü yitirmesi sonucu gelişen denge sorununu tedavi etmek için fiziksel aktivitelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu fiziksel aktivitelerin gerçekleşmesinde baston, değnek ve yürüteç gibi araçlar kullanılmaktadır. Buna dayanarak Top vd. (2021)'nin, "Biyomimetik Tabanlı Fonksiyonel Yürüteç Tasarımı ve Dijital İnsan Modelleme ile Ergonomik Analizi" başlıklı çalışmalarında biyomimetik yönteminden yararlanılan modüler özellikte, işlevsel bir yürüteç tasarlamışlardır. Mevcut olan endüstride kullanılan manipülatörler ve endüstriyel robotlar insana benzemese de yapılan çalışmalar robotların insansı özellikler veya insan yetenekleri kazandırılması yönünde ilerlemektedir. Robot kollar, fonksiyonunu yitirmiş olan uzuvların kabiliyetlerinin geri kazandırılmasında veya uzvun iyileştirilmesi için yapılan fizik tedavi egzersizlerinde kullanılmaktadır. Buna dayanarak Gelen ve Özcan (2019)'ın "İnsan-robot etkileşiminin biyomimetik yaklaşımla sağlanması" adlı çalışmalarında biyomimetik yöntemini kullanarak bir insanın kol hareketleri ile robot kolun kontrolünü sağlamayı başarmışlardır. Yine benzer bir araştırmada inme hastalarının tedavi sürecinde kullanılmak üzere biyomimetik yöntemini kullanarak sekiz derecelik alt ekstremitte rehabilitasyon robotunun tasarım ve simülasyon çalışması yapılmıştır (Zhang vd. 2010).

Fizik tedavi ve rehabilitasyon sürecinde biyolojik, canlı veya bunların mekanik (Resim 2.11) versiyonlarının kullanıldığı ve hipoterapi olarak adlandırılan yöntemler kullanılmaktadır. Hipoterapi yöntemi atın karakteristik hareketlerini kullanarak otizm gibi fiziksel ve/veya zihinsel problemi olan bireylere derecelendirilmiş duygusal ve motor girdi sağlamaktadır. Hipoterapi yöntemi ile;

- Ambulasyon esnasında meydana gelen ritmik hareketlerin kullanılması,
- Atın hareketleri ile kişinin denge ve postürünün düzenlenmesi,
- Kişiye geniş bir motor ve duygusal girdi sağlanması

hedeflenmektedir (Kim vd. 2014).



Resim 2.10 Hipoterapi simalatörü (Anonim).

Ancak at ve atın bakım maliyeti, binecek kişinin at kullanma eğitiminin olması ihtiyacı bu sistemlerin yaygınlaştırılmasını engellemektedir. Her ne kadar bu yöntem imkân ve olanakları olanlar için uzun bir süre kullanmakla birlikte günümüzde yerini gelişen teknolojilere paralel olarak geliştirilmiş ve gerçek atın hareketlerini yapabilen robotik sistemlere bırakmaya başlamıştır. Robotik atların yanı sıra ata binme simülasyon makineleri fizik tedavi ve rehabilitasyon alanında yer almayı başarmıştır (Kim vd. 2014).

2.5 Literatür Taraması

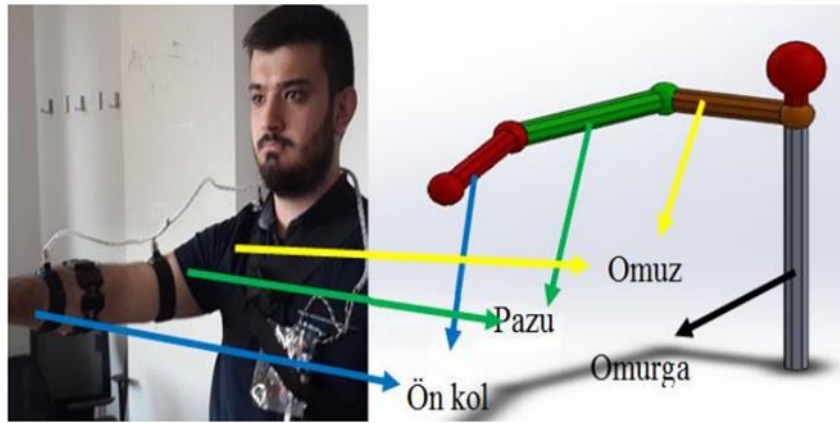
Bu bölümde biyomimetik ve mekanik hipoterapi simulatörlerinin fizik tedavi ve rehabilitasyon (FTR) alanında kullanımı ile ilgili yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar incelenmiştir.

2.5.1 Ulusal Çalışmalar

Serbest (2012)'in, yapmış olduğu yüksek lisans tezinde insan vücudunun ayak, bacak, gövde, kol ve ön kol uzuvlarının kalkış, çömelme, kalkma, yerden kaldırma ve farklı

yükseklikteki basamakları çıkma hareketlerini MATLAB yazılımıyla modellenerek analizi gerçekleştirmiştir. Uzunların kinematik bilgileri çıkarıldıktan sonra SimMechanics simülasyon ortamında ters dinamik modelleri oluşturularak yer tepki kuvvetleri hesaplanmıştır. SimMechanics ortamında edinen yer tepki kuvveti analiz sonuçları ile kuvvet platformunda ölçülen yer tepki kuvveti kıyaslanmış ve sonuçların aynı çıktığı ifade edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon bilgilerinin hareketlerin kinetik davranışlarını izah etmede faydalı olduğu belirtilmiştir (Serbest 2012).

Gelen ve Özcan (2018)'ın “İnsan-robot etkileşiminin biyometrik yaklaşımla sağlanması” başlıklı çalışmada insan kol ve el hareketlerini taklit ederek 6 eksenli endüstriyel robotun ve uç işlevcisinin kontrolünü sağlamışlardır. Robot hareketini sağlamak için elinin başlangıç noktası orijin noktası belirlenerek konum bilgisini almak üzere kinematik modeli oluşturulmuştur. Modellemenin kinematik bilgilerini elde etmek üzere insan kolunun ön kol, pazı ve omuzuna algılayıcılar yerleştirilmiştir. Algılayıcılardan alınan bilgiler ile rotasyon ve yönelme matrisleri kullanılarak modelin matematiksel hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Robotun uç işlevcisine, kol bandı tabanlı EMG sensörleri ile kol kaslarındaki parmak hareketleri algılanarak biyometrik hareketler aktarılmış olup kontrolü (Resim 2.12) sağlanmıştır (Gelen ve Özcan 2018).



Resim 2.11 Uzunlar ile modelin eşleştirilmesi (Gelen ve Özcan 2018).

Başer vd. (2018), 2 nöromüsküler boyutlu modeli temel alarak Matlab-Simmechanics simülasyon ortamında 3 boyutlu nöromüsküler insan modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen 3B insan modeli referans alınarak insanın biyomekanik özelliklerine benzer bir dış iskelet

oluşturulmuştur. Oluşturulan dış iskelet sistemi 3B insan modeline giydirilerek geri beslemeli bir yük taşıma algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile 3B insan modeli ve dış iskelet sisteminin yük taşıma esnasında eklemlerindeki tork değerleri simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Sonuç olarak yürüyen insan modeline dış iskelet sistemi giydirildiğinde insan modelinde denge bozukluğu olduğu fakat geliştirilen kontrol algoritması uygulandığında denge bozukluğunun oluşmadığı gibi eklemlerde oluşan tork değerlerinin de azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın askeri uygulamalarda askerlerin görev esnasında, taşıyabilecekleri yük sınırını belirlemek için bir alt taban olabileceği ifade edilmiştir.

Bir doktora tezinde inmeli hastalarda mekanik hippoterapi cihazı yapılan fizik tedavi ve rehabilitasyonun denge ve postural kontrol üzerindeki etkisi incelemiştir. Otuz hasta rastgele iki gruba ayrılmıştır. Her iki gruba 45 dk'lık geleneksel tedavi uygulandıktan sonra hippoterapi grubuna 15 dk'lık mekanik hippoterapi cihazı ile egzersiz yaptırılmış kontrol grubuna ise 15 dk'lık oturma pozisyonunda denge ve postural kontrol egzersizleri uygulanmıştır. Çalışmada Gövde Bozukluk Ölçeği, Berg denge ölçeği, Fonksiyonel Bağımsızlık Ölçeği, BIODEx cihazı ölçümleri, Zamanlı Klak Yürü Testi, Ful-meyer Ölçeği, Fonksiyonel Uzama Testi ve SF-36 kısa form değerlendirmeleri yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda mekanik cihazı ile yapılan egzersizlerin denge ve duruş kontrolünün geliştirilmesinde geleneksel yöntemlerden daha etkin olduğu tespit edilmiştir (Çoban 2019).

Başer vd. (2020)'nin "Sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun çeşitli kontrolcüler ile pozisyon takibi kontrol performansının değerlendirilmesi" başlıklı çalışmasında ayak bileği dış iskelet robotu ile biyomimetik hareketlerin gerçekleştirilmesi için bir kontrolcü tasarlamışlardır. Çalışmada insan-robot uygulamalarında esneklik, güvenlik ve biyomimetik kabiliyet kazandıran ya da sertliği değiştirilebilen VS-AnkleExo adlı eklem robotu kullanılmıştır. VS-AnkleExo, rehabilitasyon ve yürüme destek uygulamaları gibi pozisyon tabanlı ve tekrarlı hareket egzersizleri gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Başer ve arkadaşları tekrarlı hareket egzersizleri için kullanılan robotun pozisyon takibini değerlendirmek için insan yürüme çevrimi yapabilen bir deney düzeneği oluşturmuştur. Oluşturulan deney düzeneğine bulanık mantık tabanlı

kontrolcüler uygulayarak VS-AnkleExo eklem robotun yüksek, orta ve düşük sertlik değerleri için kontrol deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney bulguları doğrultusunda VS-AnkleExo için en uygun kontrolcünün Bulanık PD+PID olduğu belirtilmiştir (Başer vd. 2020).

Çakıcı ve Kök (2020)'e göre hayvan destekli tedavi ile ilgi yurtdışında yapılan çalışmalar daha yaygınken yurt içinde yapılan çalışmaların ise daha kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Hayvan destekli tedavinin birçok hastalıkta ve ruhsal rahatsızlıkta etkisinin pozitif olacağı gibi tedavide kullanılan hayvan türlerinin çoğaltılması, denenmesi ve uygulanmasının ülkemiz açısından yararlı olacağı belirtilmiştir.

Top vd. (2021)'nin “Biyomimetik Tabanlı Fonksiyonel Yürüteç Tasarımı ve Dijital İnsan Modelleme ile Ergonomik Analizi” başlıklı çalışmalarında armidon ve tespih böceklerinin anatomik özelliklerinden esinlenerek ortopedik rahatsızlığı olan bireylere fonksiyonel bir yürüteç geliştirmişlerdir. Geliştirilen yürüteç, esinlenilen canlıların anatomik özelliklerine sahip olması ile hem farklı açılarda katlanabilme özelliğine sahip olup hem de yürüyüş sırasında bireylere farklı duruş ve oturuş pozisyonlarını yapabilmeye imkân sağlamaktadır. Bu tasarım bireylerin yürüyüşlerini hem konforlu kılmakta hem de kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte geliştirilen yürütecin üç boyutlu (3B) modeli CAD ortamında oluşturulmuştur. Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirmesi (RULA- Rapid Upper Limb Assessment) ve CATIA V5 programının Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA - Rapid Entire Body Assesment) araçları kullanılarak Dijital İnsan Modelleme (DHM-Digital Human Modeling) ile tasarımın ergonomik risk analizi gerçekleştirilmiştir.

Gül (2021), sağlık çalışanlarının yükünü azaltmak amacıyla endüstriyel bir robot kol geliştirilmiştir. Geliştirilen robot kolun çalışma uzayındaki kontrolünü sağlamak ve konum bilgilerini elde etmek üzere ileri ve ters kinematik analizleri homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca robot kolun 3B modelinin analizi ise MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

Uzunçayır ve İlhan (2021)'in yaptığı araştırmada fenomenoloji nitel araştırma modeli kullanılarak hippoterapi eğitimine yönelik bakış açıları incelenmiştir. Araştırmada elde

edinen bulgular ebeveynlerin hippoterapi konusunda bilgi sahip olmadıklarını, doktor, kurum ve öğretmen yönlendirmesi ile çocukların hippoterapiye başladıklarını belirlemişlerdir. Hippoterapinin olumlu yönde etkileri olduğunu belirterek önerilmesiyle birlikte mevcut çalışmalardaki at üzerinde yapılan aktivitelerin çeşitliliğinin az olduğu, eğitim süresinin ve seansların artırılması gerektiği tespit edilmiştir.

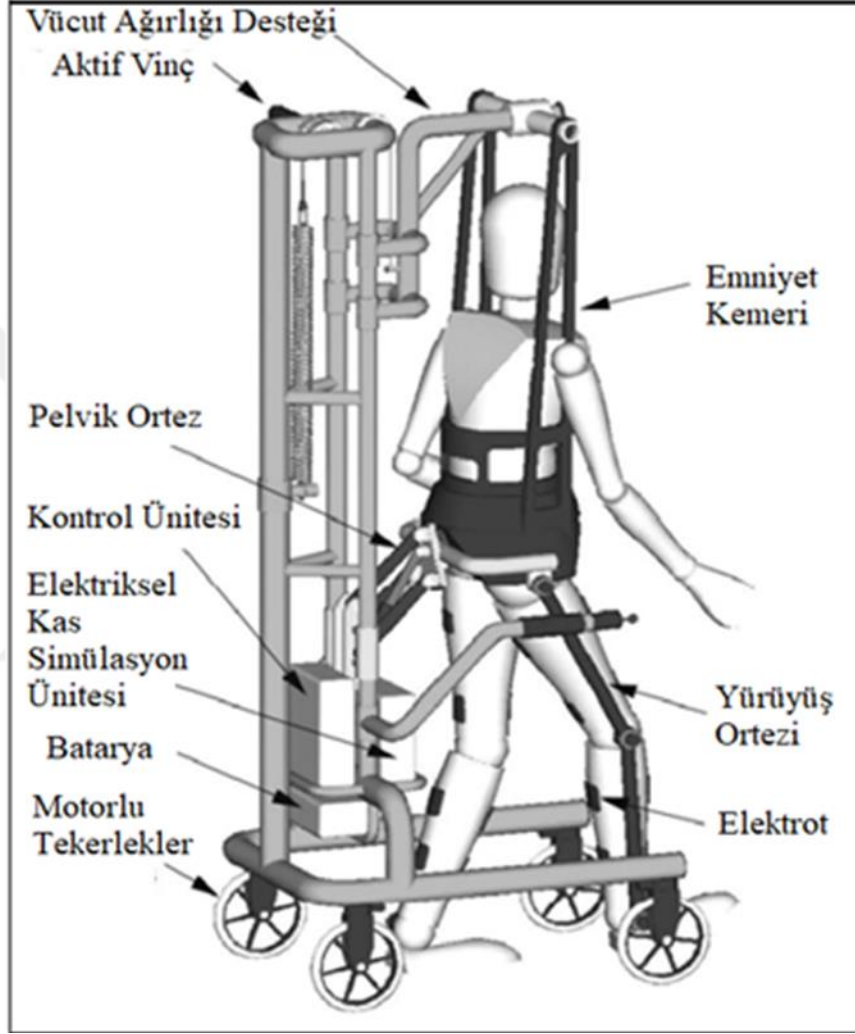
İlaveten hippoterapinin serebral palsili çocuk hastalara olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada tedavi öncesi ve sonrasında Berg Denge Ölçeği uygulanarak on iki haftalık terapi süreci sonunda KMFÖ-88, Kaba Motor Fonksiyon Ölçeği-88 (KMFÖ-88) ve Berg Denge ölçeği skorlarında istatistiksel olarak anlamlı artış gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada farklı kişilerin at binme simülasyon cihazı kullanarak yaptıkları 12 haftalık terapi sonrasında KMFÖ-88 skorlarında sadece geleneksel fizik tedavi yöntemleri uygulanan çocuklara nazaran artış saptadıkları belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmanın sınırlılıkları; olgu sayısının az olması, motor fonksiyonlar için eşit grup dağılımının eksikliği ve çalışmanın COVID-19 döneminde gerçekleştirilmesidir. Bu sınırlılıklara rağmen 12 haftalık klinik ön çalışmanın sonrasında elde edilen olumlu gelişmelerin hippoterapi alanında yapılacak araştırmalara ışık tutacağı belirtilmiştir (Yücel Şen vd. 2022).

2.5.2 Uluslararası Çalışmalar

Bouri vd. (2007)'nin yaptığı çalışmada belden aşağısı felçli ve hemiplejik hastaların rehabilitasyonu için robotik bir sistem (Şekil 2.7) geliştirilmiştir. Walktrainer adı verilen bu robotik sistemin bir deambülör, bir pelvik ortez, bir vücut ağırlığı desteği, bir elektrostimülatör ve iki bacak ortezinden oluştuğu ifade edilmiştir. Bu cihazın araştırma yapmak için yüksek verimli bir kontrolör ile donatıldığı ve sonuçlarının uygun bir rehabilitasyon prosedürü ile klinik testlerinin planlandığı belirtilmiştir.

Park vd. (2014) de robotik hipoterapi sisteminin geçerlilik ve güvenilirliğini, gerçek at hareketleriyle karşılaştırarak araştırmışlardır. Sistemin geçerliliği ve güvenilirliğini ölçmek için robotik sistem ve gerçek at eyerlerine takılı 3 eksenli akselerometre algılayıcıları, tercih edilen yürüme hızında 3 boyutlu hızlanma verilerini toplamak için kullanılmıştır. Toplanan veriler doğrusal regresyon metodu ile analiz edilmiştir. Doğrusal

regresyon analizi, zaman-tepe ivmesi (TPA) ($R^2=0.997$) ile mükemmel bir ilişki göstermiş ancak gerçek ve robotik atlar ($R^2=0.177$) arasında x eksenini ivmesinde çok az korelasyon ilişkisi tespit edilmiştir. Böylece zaman kontrolünün tutarlı olduğu, robot ve gerçek at hareketleri arasında belirli bir derecede değişkenlik olduğu teyit edilmiştir.



Şekil 2.7 “Walktrainer” konsepti (Bouri vd. 2007).

2015 yılındaki bir çalışmada hipoterapi için atın temel hareketlerini elde etmeye yönelik bir yöntem ön sürülmüştür. Atın farklı vücut bölümlerinden alınan ve tedavi için istenen etkileri sağlayan gerçek ölçümlerden bir yöntem belirlendiği ifade edilmiştir. At üzerinde birkaç noktaya akselerometreler yerleştirildiği, atın normal yürüyüşü ve tırıs yürüyüşü sırasında gerçek bir at sürücüsünün hareketinin ölçümleri kaydedilmiştir. Binek sürücüsünün hareketinin düzlemsel yörüngesi ve ana eğilmeleri elde edilerek projenin ana

hedefinin 4-DOF paralel mekanizma aracılığıyla en yakın hareketin oluşturulmasına olanak sağlanmıştır (López-Cajún vd. 2015).

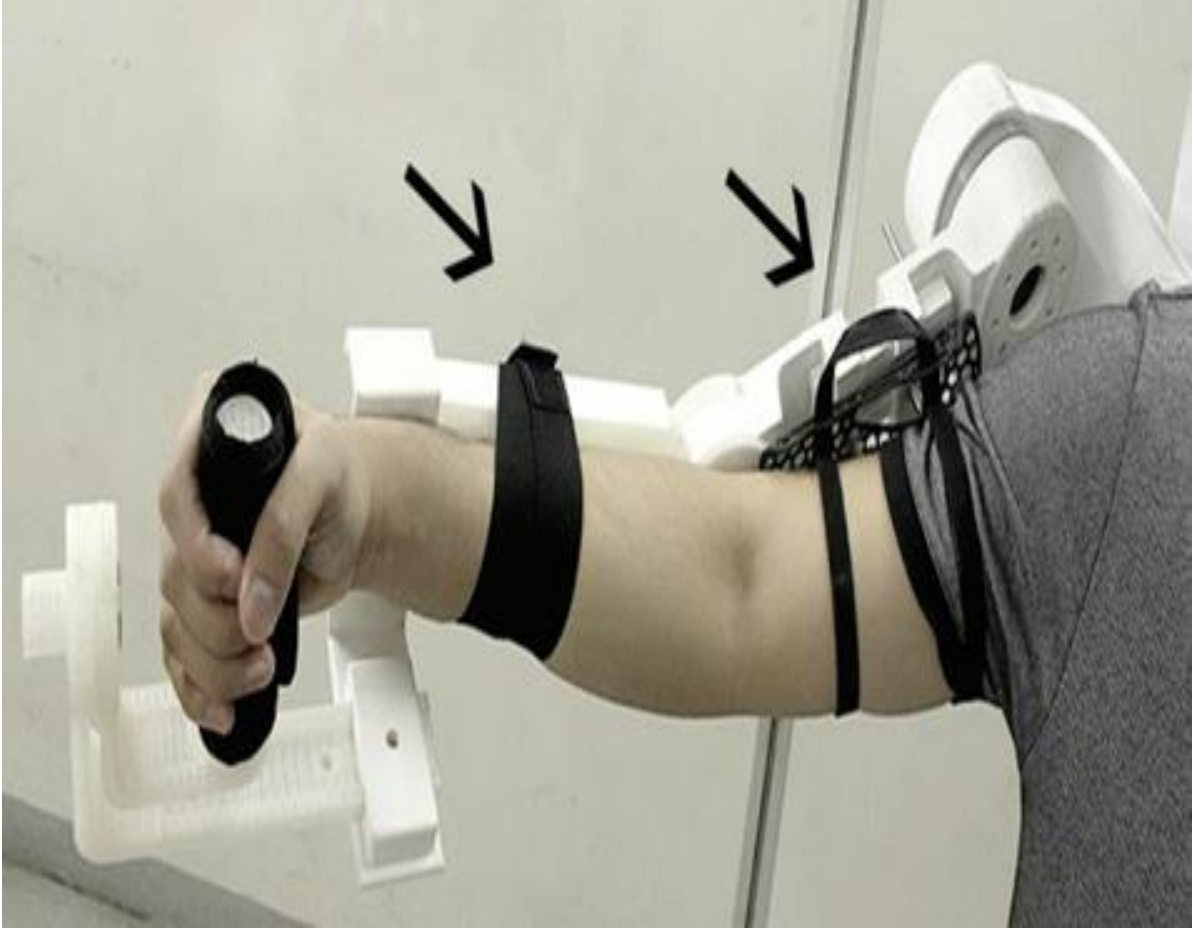
Nasyuha vd. (2017), at destekli terapi için mekanik at simülatöründe kinect sensörünü değerlendirmişlerdir. At destekli terapi sırasında binicinin attaki hareketini, hızını, konumunu veya duruşunu izlemek için kullanılan otomatik izleme araçlarının eksikliği ifade edilmiştir. Bu çalışmada, mekanik bir at simülatöründe binici hızının otomatik olarak izlenmesi için sensör olarak Kinect'in potansiyel kullanımı değerlendirilmiştir. Bu sensör ile mekanik at simülatörüne binen sürücünün iskelet verileri yakalanmış ve boxplot yaklaşımı ile verilerin analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda boyun, baş, sol omuz ve sağ omuz eklemlerinin hızı temsil eden sabit ve en önemli eklemler olduğu tespit edilmiştir.

Baylor Üniversitesi'nde geliştirilen mekanik at sürüş simülatörü insan vücut hareket tepkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Sürüşün etkilerini karşılaştırmak için ön test ve son test ölçümleri analiz edilerek sürüş sırasında sağlıklı sürücülerin gövde hareketleri üç anatomik düzlemin hepsinde mekanik at hareketiyle yakından takip edildiği belirtilmiştir. Denge testleri sürücülerin sürüş sonrasında ön ve sagittal düzlemlerde sapmanın azaldığını fakat yatay düzlemde sapmanın artırdığını göstermiştir (Barrett 2018).

Baniqued vd. (2018), biyomimetik yaklaşımı uygulayarak üst ekstremitte tedavisi için 5 serbestlik dereceli robotik dış iskelet (Resim 2.13) tasarlamışlardır. Robotik bağlantıların tasarımı, süngerimsi ve kortikal kemiklerin doğal morfolojisinden ve mekanik strese cevap verme yeteneklerinden ilham alınmıştır. Tasarımın katı modellemesi CAD programı olan CATIA ortamında gerçekleştirilmiştir. Rehabilitasyon için robotik dış iskeletin tasarımında ve geliştirilmesinde biyomimetik bir yaklaşımın kullanılması, cihazın güvenliğini ve biyouyumluluğunu teşvik etmede büyük umut vaat ettiğini vurgulamışlardır.

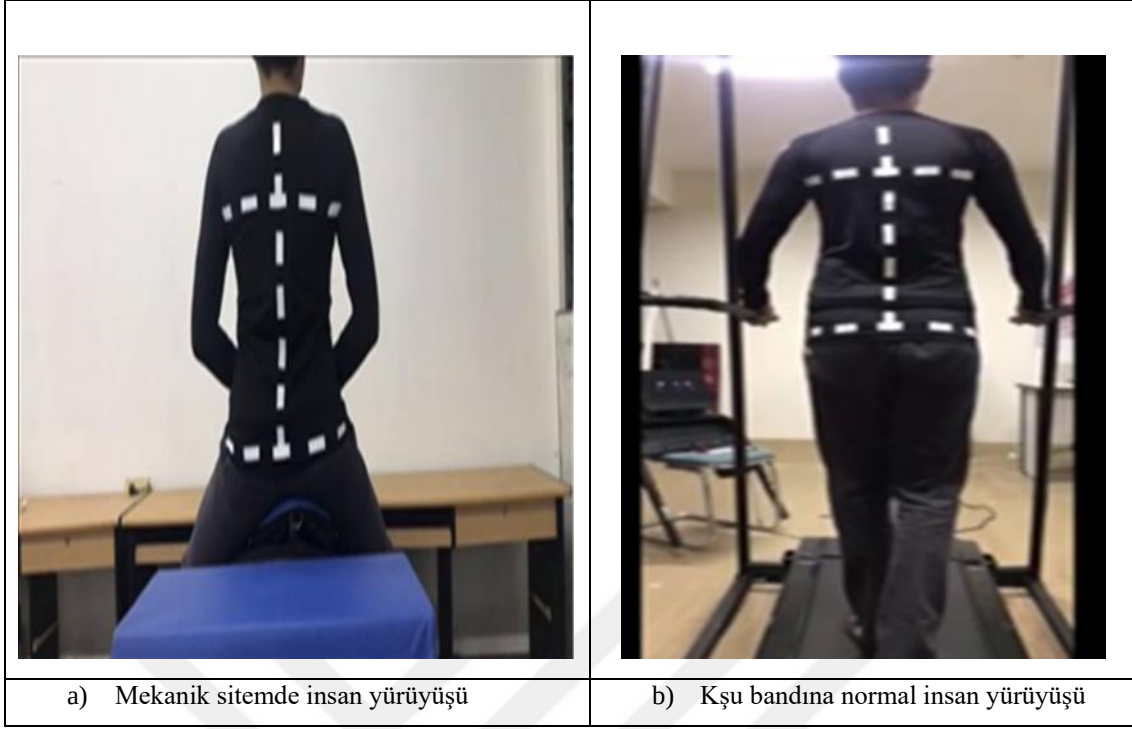
Ziegler vd. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada hippoterapide kullanılan robotik sistemlerin gerçekçi yörüngeler oluşturabilmesi için 3B hareket yakalama verilerine dayalı hareket sentezine odaklanılmıştır. At sırtının rijit cisim hareketini tanımlayan

verileri çıkarmak için bir işaretleyici seçim yaklaşımı geliştirildiği belirtilmiştir. Hareketin konum ve yön bileşenleri, en küçük kareler nokta eşleştirme algoritması ile belirlendiği ve robotik sistemler tarafından etkin bir şekilde yürütülebilen, düzgün, dögüsel ve gerçekçi yörüngeler oluşturmak için Fourier seriler metodu kullanılmıştır.



Resim 2.12 Tasarlan dış iskelet düzeneğinin üst ekstremiteye bağlanması (Baniqued vd. 2018).

Trusaji vd. (2022)'nin yapmış olduğu bir çalışmada ise serebral palsi rehabilitasyonunda hipoterapi için insan yürüyüşünü kopyalayacak at binme simülatörü (Resim 2.14) tasarlanmıştır. Çalışmada çoğu mekanik at simülatörlerinin rehabilitasyon cihazı olarak değil egzersiz cihazı olarak tasarlandığını belirtmişlerdir. Tasarımı gerçekleştirmeden önce de atın yürüyüş dögüsünün incelendiğini ve ardından yürüyüşün matematiksel modelinin türetilerek yürüyüşü simülatöre aktarmak üzere bir elektrik motoru kullanıldığı belirtilmiştir.



Resim 2.13 Ölçüm üniformasını giyen bir kullanıcının görüntüsü (Trusaji vd. 2022).

2.5.3 Literatürün Genel Değerlendirilmesi

Literatür incelemeleri sonucunda ulusal ve uluslararası yapılan çalışmalarda katı modellerin modellenmesi, simülasyonu ve analizinin bilgisayar destekli ortamlarda gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Geliştirilen katı modellerin biyomimetik analizleri için Matlab-SimMechanics aracı literatürde tercih edilmiş ve sistemlerin kontrolünü sağlamak için kinematik analizler yapılmıştır. Geliştirilen sistemlerin performans değerlendirilmesi için Kinect sensörü, görüntü analizi ve farklı algoritmalar kullanılmıştır. Ancak çalışmalarda biyomimetik analizlerinin başarımları oranları verilmediği gibi matematiksel denklemleri de belirtilmemektedir. Bu çalışmada biyomimetik analizlerinin Matlab ortamında matematiksel denklemleri çıkarıldıktan sonra gerçek sistemde denenmiş ve başarımları oranları hesaplanmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde insan ve at anatomisi arasındaki benzerlikler ve farklılıklar belirtildikten sonra doğal at yürüyüş şekilleri açıklanmıştır. Ayrıca robotik sistemlerin ileri ve ters kinematik denklemlerinin çıkarılması için kullanılan Denavit-Hartenberg yönteminin kullanımı da açıklanmıştır. Daha sonra biyomimetik sistemlerin görüntü analizlerinin nasıl yapıldığı belirtildikten sonra robotik sistemlerin katı modelleme ve simülasyon platformlarına aktarım yöntemi izah edilmiştir. Bölümün sonunda geliştirilen sistemin genel çalışma prensibi ve sistem başarısının nasıl ölçüleceği verilmiştir.

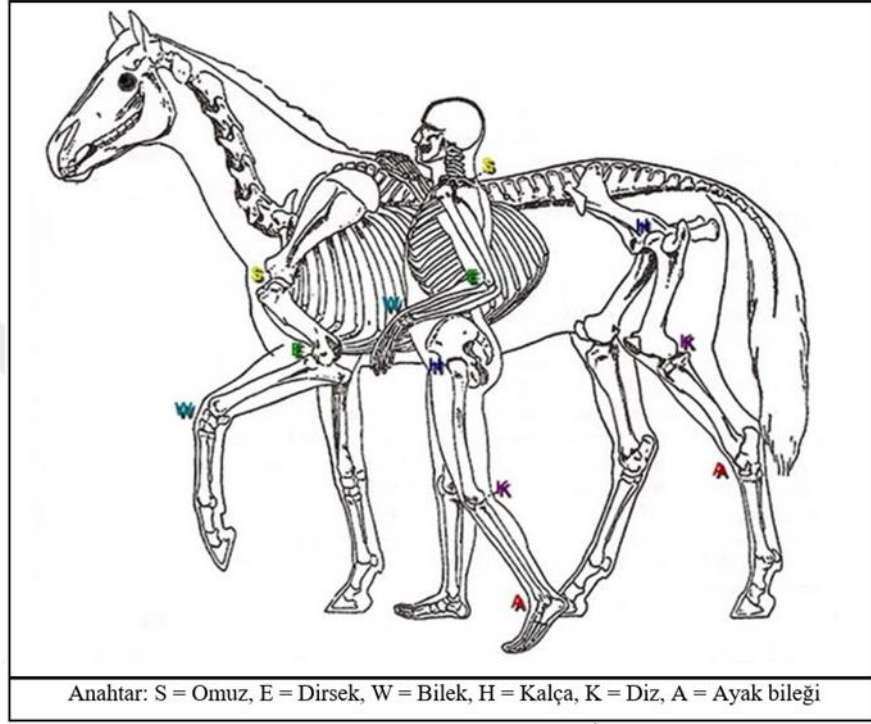
3.1 İnsan ve At Anatomisi

Canlıların yapısını ve düzenini inceleyen anatomi bilimi insan anatomisi, bitki anatomisi (fitonomi) ve hayvan anatomisi (zootomi) olmak üzere 3 alt daldan oluşmaktadır. Anatomi, vücut yapılarını ele alış biçimlerine göre karşılaştırmalı, klinik ve topografik anatomi olarak sınıflandırılmaktadır (İnt.Kyn.7).

3.1.1 İnsan ve At Anatomisinin Benzerlikleri ve Farklılıkları

İnsanların ve atların fizyolojik sistemleri, anatomik yapısı ve kas-iskelet sistemi karşılaştırıldığında (Şekil 3.1) bazı benzerlikler bulunmaktadır. Her iki türün de dik tutacak kemikleri, hareket etmeyi sağlayan eklemleri, eklemleri hareket ettiren kasları ve tüm süreci kontrol eden karmaşık bir sinir sistemi vardır. Atların fiziksel gelişimi tamamlandığında ortalama 205 kemiğe sahip iken insanların fiziksel gelişimi tamamlandığında ortalama 206 kemiğe sahiptirler. Hem atlarda hem de insanlarda dört uzuv mevcuttur ancak insanlar üst uzuvlarını el becerisi için kullanarak adapte olmuştur. Fakat atlarda bu durum farklıdır, onların ön ayaklarının görevi vücut ağırlıklarını büyük çoğunluğunu taşımaktadır. Atların omuzları da insan omuzuna çok benzer fakat köprücük kemikleri olmaması temel bir fark oluşturmaktadır. Bu temel fark atın ön ayağını iskeletin geri kalanına kemikli bir bağ ile değil kas ve yumuşak doku ile tutulmasını sağlar. Bu nedenle atlar, omuzca geniş hareket aralığı potansiyeline sahiptir (İnt.Kyn.8).

İnsan bacakları ve atın arka uzuvları da birbirine çok benzer; her iki türün de kalça, diz ve ayak bileği eklemi vardır. Atlarda kalça eklemi koksofemoral eklem, diz eklemi boğma, ayak bileği eklemi tarsus olarak adlandırılmaktadır. Atın ön ayağında karpus adı verilen yapı anatomik açıdan insan bileğine benzemektedir (İnt.Kyn.8).



Şekil 3.1 At ve insanın anatomik olarak benzer bölgeleri (Nina 2016).

3.2 Atların Doğal Yürüyüşleri

Atların morfolojik, fizyolojik, anatomik, biyomekanik, duyuşal, duygusal, bilişsel ve sosyal özelliklerinden dolayı son yıllarda sağlık alanında terapötik amaçla kullanımı yaygınlaşmıştır. Atların çeşitli yürüme ve koşma çeşitleri vardır. Birçok at ırkı doğuştan gelen yetenek ile normal, kenter, tırıs, rahvan ve dörtnal olarak isimlendirilen yürüyüş çeşitlerine sahiptir. (Int.Kyn.9, Int.Kyn.10).

3.2.1 Normal Yürüyüş

Normal yürüyüş, dört vuruşlu simetrik bir yürüyüştür. Normal yürüyüşün video teknolojisi olmadan takip edilmesi zordur. Yüksek hızlı kamera görüntüleri analiz

edildiğinde normal yürüyüş için itmenin arka ayaklardan başladığı ve ön bacakların onu takip ettiği (Önce sağ arka, sağ ön sonra sol arka, sol ön) görülmektedir.

3.2.2 Kenter Yürüyüş

Kenter, hareket halinde çapraz bacakları eşleştirilmiş 3 vuruşlu yürüyüş türüdür. Örneğin, at sola doğru ilerliyorsa, sağ arka bacağı itme gücü yaratır. Sol arka ve sağ ön ayak denge için birlikte hareket eder, ardından sol ön ayak ve bir süspansiyon (atın ayakları yerden kesilme anı) anı gelmektedir. Kenter yürüyüşü yavaş bir dörtlale yürüme şekline benzemektedir.

3.2.3 Tırıs Yürüyüş

Tırıs, 2 vuruşlu doğal bir yürüyüştür. Bacaklar çapraz çiftler halinde birlikte hareket eder. Örneğin, sağ arka ayak sol ön ayağı takip ederek ileriye doğru hareket ederken sol arka ayak sağ ön ayağı takip ederek ileriye doğru hareket eder. Tırıs, adım uzunluğuna ve hız oranına göre değişiklik gösterir. Tırıs atın koşmadan hızlı tempoda sekerek yürüyüş şeklidir. Bu yürüyüş şekli, normal yürüyüşünden daha hızlı, dörtlale yürüyüşünden daha yavaştır.

3.2.4 Dörtlale Yürüyüş

Dörtlale, üç vuruşlu bir sıçrama temposu ve ardından bir süspansiyon aşaması barındırır. Sağ ve sol olarak iki çeşit dörtlale yürüyüş olduğu için asimetrik bir tempodur. Aynı zamanda stabil olmayan bir tempodur, çünkü atın vücudu, adım sırasında dönüşümlü olarak yükselen, düşen kalça ve omuzlara sahiptir. Dörtlale yürüyüş şu şekilde gerçekleşir: sol arka, sol çapraz, sağ ön, ardından süspansiyon zamanı gelir ve döngü tekrar başlar.

3.2.5 Rahvan Yürüyüş

Rahvan yürüyüş, sağ veya sol ayakların aynı anda yere bastığı hızlı iki vuruşlu bir yanal

yürüyüşdür. Bu yürüyüşte vuruş şekli, sağ arka ve sağ ön birlikte, daha sonra sol arka ve sol ön birliktedir. At bir yandan diğer yana sallanırken, bir sonraki yanal çift yere değmeden önce dört ayağının da yerden kesildiği kısa bir süspansiyon anı meydana gelmektedir.

3.3 Kinematik

Kinematik, bir sistemin yapısını ve hareketlerini inceleyen bilim dalıdır. Kinematik yardımı ile hareketin oluşma nedenleri ile ilgilenmeksizin konum, ivme ve hız parametreleri incelenmektedir. Kinematik analizdeki ilişkiler, uç işlevi ile eklem açıları arasında tanımlanır. Kinematik analiz, ileri yön kinematiği ve ters yön kinematiği olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (İnt.Kyn.3, İnt.Kyn.17) İleri yön kinematiği robotun eklem değişkenleri (açıları) yardımıyla uç işlevcisinin pozisyon ve yönelimini bulmayı amaçlar. Bir robot gövdesinden uç işlevcisine kadar birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle bağlanmış seri uzuvlardan oluşur. İleri yön kinematiğinde eklem değişkenlerinin verilmesiyle uç işlevcinin konumu ve yönelimi ana çerçeveye göre hesaplanır. İki uzuv arasındaki ilişki homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Arka arkaya sıralanan eklemlerde dönüşüm matrislerinden yararlanarak taban ile uç işlevcisi arasında bir ilişki tanımlanır.

Kinematik problemlerin çözümü, kartezyen üç boyutlu ve kartonom dört boyutlu olmak üzere iki farklı çözüm uzayında gerçekleştirilmektedir. Robotların eklem değişkenlerinin belirlenmesi için farklı kinematik yöntemler geliştirilmiştir.

Bu yöntemler: homojen dönüşüm yöntemi, Denavit-Hartenberg yöntemi, Pieper-Roth yöntemi, sıfır referans yöntemi ve üssel yöntem olarak sayılabilir. Denativ-Hartenberg yöntemi ileri ve ters kinematik hesaplamaları için basit ve sistemsel bir yaklaşım sunduğu için literatürde daha fazla tercih edilen bir yöntemdir (Küçük ve Bingöl 2004).

3.3.1 Denavit-Hartenberg Yöntemi

Robotların kinematik modelini çıkarırken daha çok tercih edilen Denavit-Hartenberg

Yöntemi homojen dönüşüm matrisi (Şekil 3.2) kullanması ile öne çıkmaktadır. Bu yöntemde dört ana değişken kullanılarak robot kinematiği belirlenmektedir.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.2 Genel homojen matrisi (Küçük ve Bingöl 2004).

Bu değişkenler;

- a_{i-1} , Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} arasındaki mesafe
- α_{i-1} , Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} arasındaki eksen açısı
- d_i , X_{i-1} ile X_i arasında Z_i arasındaki mesafe
- θ_i , X_{i-1} ile X_i arasında Z_i arasındaki eksen açısı

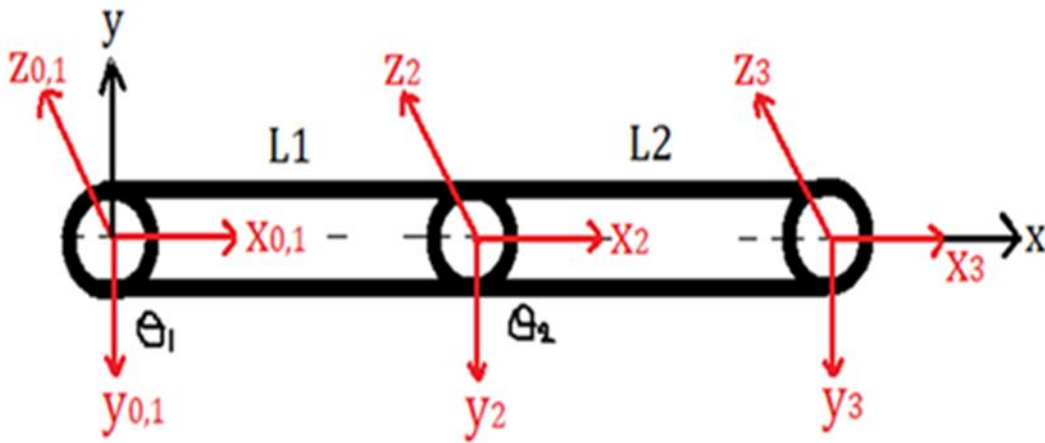
Yukarıda belirtilen dört ana değişken D-H değişkenleri olarak adlandırılır. D-H tablosuna (Şekil 3.3) göre her ekleme ait değişkenleri genel matriste yerine koyularak dönüşüm matrisleri bulunur. Elde edilen her bir ekleme ait dönüşüm matrisleri çarpılarak ana başlangıç noktasıyla robotun uç işlevcisinin arasındaki dönüşüm matrisi elde edilir

Eksen No	D-H DEĞİŞKENLERİ				Eklem değişkeni
	İki komşu eksen açısı	Uzuv uzunluğu	Eklem kaçıklığı	Eklem açısı	
i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	d_i veya θ_i
1	0	0	0	θ_1	θ_1
2	0	L1	0	θ_2	θ_2
3	0	L2	0	0	0

Şekil 3.3 D-H tablosu.

Eklem değişkenlerinin belirlenmesi şu şekilde yapılır. Kinematik hesapları yapabilmek için robot kolunun eklemlerine koordinat sistemleri şekil 3.4’de gösterildiği şekilde eklenmelidir (İnt.Kyn.3).

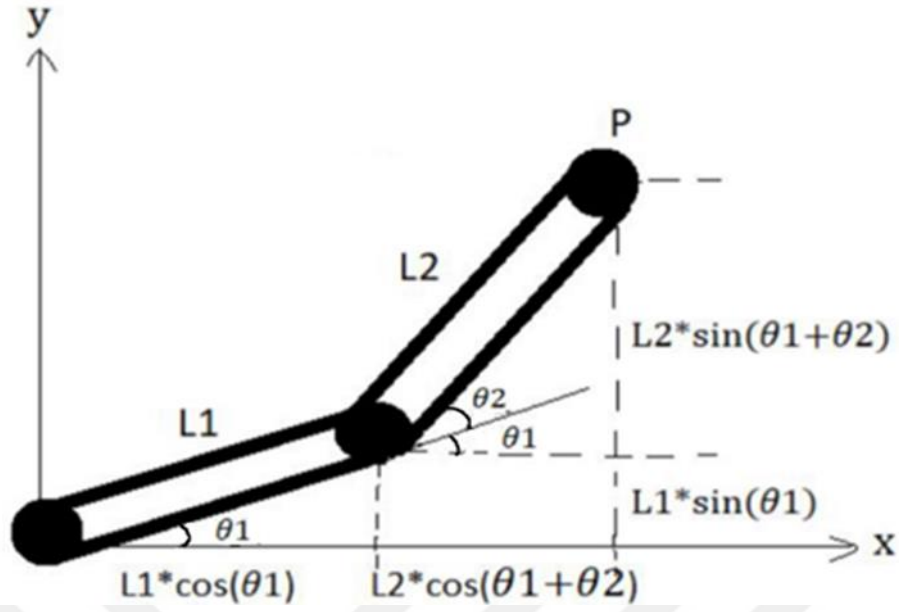
- İlk olarak kayma yönleri veya eklem eksenlerinin dönmesi belirlenir.
- Döner eksenler için dönme yönü ve prizmatik eklemler için kayma yönü Z eksenini olarak tanımlanır.
- Z eksenine dik olan bağ uzunluğu X eksenini olarak tanımlanır.
- X ve Z eksenleri belirlendikten sonra sağ el kuralına göre Y eksenini tespit edilir.
- Sağ el kuralında başparmak Z eksenini, işaret parmağı X eksenini ve orta parmak Y eksenini göstermektedir (Küçük ve Bingöl 2004).



şekil 3.4 Eklemlere koordinat yerleştirme.

3.3.1.1 İleri Yön Kinematiğinin Hesaplanması

Robotun uç işlevcisinin konumu olan P noktası (şekil 3.5) geometrik işlemler yardımıyla ve şekil 3.6 ile şekil 3.7’de Denavit-Hartenberg Yöntemi ile bulunabilmektedir. X ve Y koordinatları Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de verilen eşitlikler ile hesaplanabilmektedir



Şekil 3.5 Robot kolunun iki boyutlu düzlemde gösterimi.

${}^{01}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	${}^{12}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & L1 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
${}^{23}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & L1 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

Şekil 3.6 Denavit-hartenberg yöntemi ile uç işlevçisinin ileri kinematik hesaplanması.

$${}^{03}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & \cos(\theta_1 + \theta_2)*L_2 + \cos(\theta_1)*L_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & \sin(\theta_1 + \theta_2)*L_2 + \sin(\theta_1)*L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} P_x &= L_1 * \cos(\theta_1) + L_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ P_y &= L_1 * \sin(\theta_1) + L_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

Şekil 3.7 Denavit-hartenberg yöntemi ile uç ilevcisinin ileri kinematik hesaplanması (İnt.Kyn.17).

$$P_x = L_1 * \cos(\theta_1) + L_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.1)$$

$$P_y = L_1 * \sin(\theta_1) + L_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2)$$

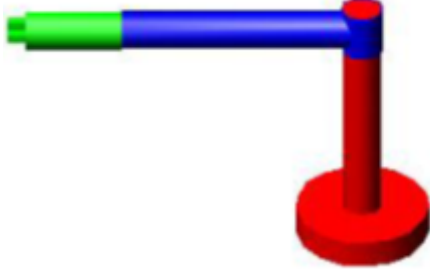
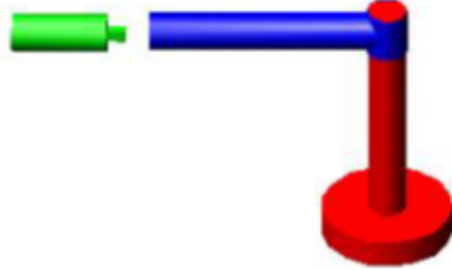
3.3.1.2 Ters Kinematik'in Hesaplanması

Robotun ters kinematiği (Şekil3.7) robot kolunun uç noktasının pozisyon ve yönelmesi bilinen durumlarda robotun sahip olması gereken eklem değişkenlerine (açılarına) ulaşmayı amaçlar. Robotikte, ters kinematik, robotun son efektörlerinin her biri için istenen konumu sağlayan eklem parametrelerini belirlemek için kinematik denklemlerini kullanır. İyi bir yörünge planlaması, robotun optimum hareketler ile doğru noktaya en az gereksinimle ulaşmasını sağlamaktadır (Küçük ve Bingöl 2005, Ünver 2005).



Şekil 3.8 Ters kinematik analizi (İnt.Kyn.17).

Şekil 3.9a’da matematiksel çözümle fiziksel çözüm örtüşürken Şekil 3.9b’deki çözümün örtüşmediği görülmektedir

	
$\Theta = \arctan2(-k, pz)$	$\Theta = \arctan2(k, -pz)$
a) Doğru Çözüm	b) Yanlış Çözüm

Şekil 3.9 Ters kinematik analizinde farklı çözüm denklem çözümlerinin tepkisi (İnt.Kyn.17).

Ters kinematik çözümü gerçekleştirirken kullanılan trigonometrik eşitlikler Denklem 3.3 ile Denklem 3.9 arasındaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\cos\theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm\sqrt{1-a^2}, a) \quad (3.3)$$

$$\sin\theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(a, \pm(\sqrt{1-a^2})) \quad (3.4)$$

$$\cos\theta = a \text{ ve } \sin\theta = b \text{ ise } \theta = \arctan2(b, a) \quad (3.6)$$

$$a\sin\theta + b\cos\theta = 0 \text{ ise } \theta = \arctan2(-b, a) \text{ veya } \arctan2(b, -a) \quad (3.7)$$

$$a\sin\theta + b\cos\theta = c \text{ ise } \theta = \arctan2(a, b) \pm \arctan2(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (3.8)$$

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin\theta_1 * \cos\theta_2 + \cos\theta_1 * \sin\theta_2 \quad (3.9)$$

Şekil 3.10’da verilen iki boyutlu düzlemdeki bir robot kolun ters kinematik analizine ait çözüm adımları aşağıdaki gibidir.

θ_2 Açısının Hesaplanması:

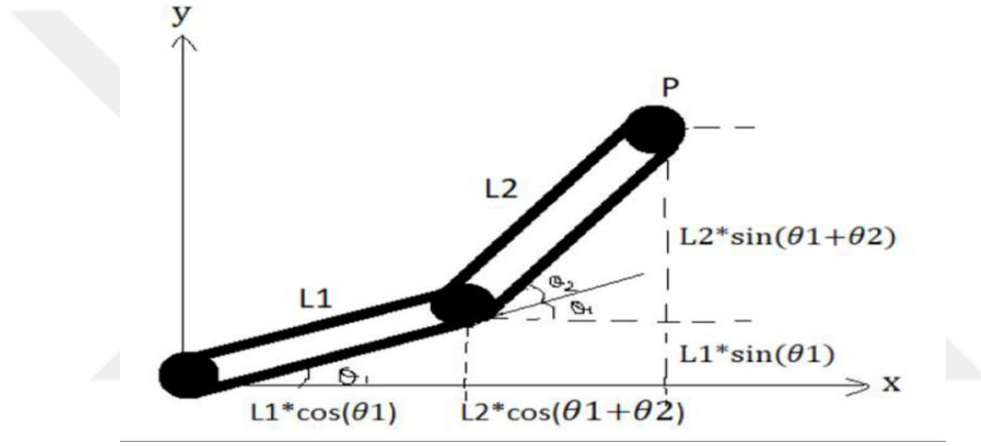
1.Adım: 4.1 ve 4.2 Eşitlikleri yazalım

2.Adım: 4.1 ve 4.2 Eşitliklerin karesini alalım

3.Adım:

$$(3.1)^2 = L1^2 * (\cos\theta_1)^2 + 2 * L1 * \cos\theta_1 * L2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L2 * \cos(\theta_1 + \theta_2)^2 \quad (3.10)$$

$$(3.2)^2 = L1^2 * (\sin\theta_1)^2 + 2 * L1 * \sin\theta_1 * L2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L2 * \sin(\theta_1 + \theta_2)^2 \quad (3.11)$$



Şekil 3.10 Ters kinematik analizinde farklı çözüm denklem çözümlerinin tepkisi (İnt.Kyn.17).

4.Adım:

$$(4.10)^2 + (4.11)^2 = L1^2 + L2^2 + 2 * L1 * L2 * (\cos\theta_1 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin\theta_1 * \sin(\theta_1 + \theta_2)) \quad (3.12)$$

5.Adım:

$$(\cos\theta_1^2 * \cos\theta_2 - \cos\theta_1 * \sin\theta_1 * \sin\theta_2) + (\sin\theta_1^2 * \cos\theta_2 * \sin\theta_2 * \sin\theta_1) = \cos\theta_2(\cos\theta_1^2 + \sin\theta_1^2) =$$

$$(4.1)^2 + (4.2)^2 = L1^2 + L2^2 + 2 * L1 * L2 * \cos\theta_2 \quad (3.13)$$

6.Adım:

$$\cos\theta_2 = \frac{(px^2 + py^2 - (L_2^2 + L_1^2))}{2 * L_1 * L_2} \quad (3.14)$$

7.Adım:

$$\theta_2 = \arctan2(\pm\sqrt{1 - \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}}, \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}) \quad (3.15)$$

θ_1 Açısının Hesaplanması:

1.Adım:

$$Px = L_1 * \cos\theta_1 + L_2 * (\cos\theta_1 * \cos\theta_2 - \sin\theta_1 * \sin\theta_2) \quad (3.16)$$

$$Py = L_1 * \sin\theta_1 + L_2 * (\sin\theta_1 * \cos\theta_2 + \cos\theta_1 * \sin\theta_2) \quad (3.17)$$

2.Adım:

$$Px = L_1 * \cos\theta_1 + L_2 * \cos\theta_1 * \cos\theta_2 - L_2 * \sin\theta_1 * \sin\theta_2 \quad (3.18)$$

$$Py = L_1 * \sin\theta_1 + L_2 \sin\theta_1 * \cos\theta_2 + L_2 * \cos\theta_1 * \sin\theta_2 \quad (3.19)$$

3.Adım:

$$Px = \cos\theta_1 * (L_1 + L_2 * \cos\theta_2) - L_2 * \sin\theta_1 * \sin\theta_2 \quad (3.20)$$

$$Py = \sin\theta_1 * (L_1 + L_2 * \cos\theta_2) + L_2 * \cos\theta_1 * \sin\theta_2 \quad (3.21)$$

4.Adım: Tüm eşitliği $\sin\theta_1$ 'e bölüyoruz ve alt alta toplama işlemi yapıyoruz.

5.Adım:

$$L_1 + L_2 \cos\theta_2 (\cos\theta_1^2 + \sin\theta_1^2) = \cos\theta_1 * Px + \sin\theta_1 * Py \quad (3.22)$$

6.Adım:

$$Px * \cos\theta_1 + Py * \sin\theta_1 = L1 + L2 * \cos\theta_2 \quad (3.23)$$

7.Adım: (3.6) eşitlikten:

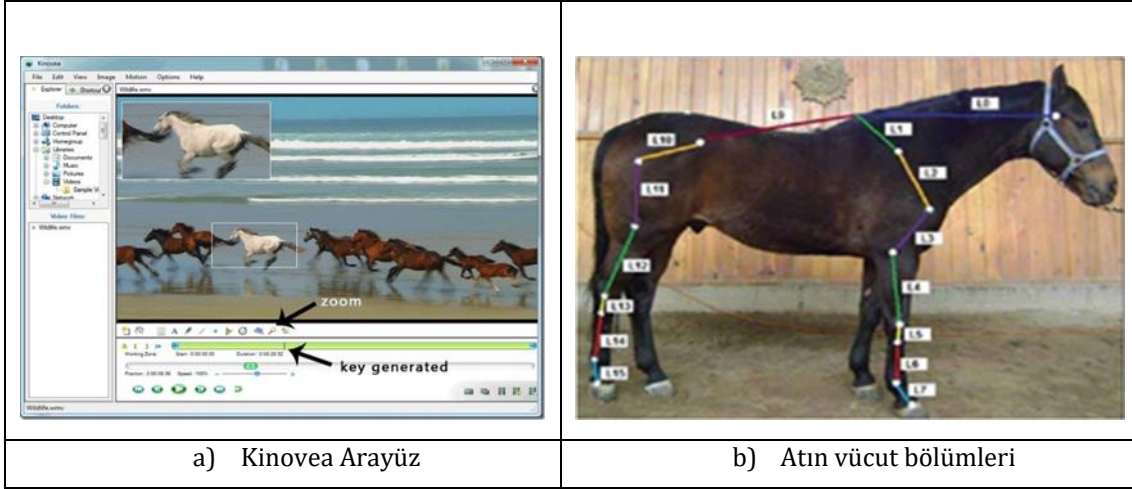
$$\theta_1 = \arctan2(px, py) \pm \arctan2(\sqrt{px^2 + py^2 - (a2 * \cos\theta_2 + a1^2)^2}, a2 * \cos\theta_2 + a1) \quad (3.24)$$

3.4 Görüntü Tabanlı Hareket Analizi

Görüntü tabanlı hareket analizi bir hareketi belirli bir zaman çerçevesi içerisinde referans düzleme göre incelemeyi mümkün kılmaktadır. Görüntü kaydı incelenen hareketin istenilen sürede görüntülenmesini mümkün kıldığı gibi görüntü karelerin dondurulmasına, ağır çekime izin verir ve analizi kolaylaştırır (Armand vd. 2014).

Görüntü kaydı sayesinde 3 boyutlu evrende hareketlerinin bilimsel analizini yapmak mümkün olmuştur. Buna örnek olarak 1878 yılında Eadweard Muybridge yaş kolodyum tekniğiyle dörtnala giden bir atın bütün hareketlerini kayıt altına alarak “Bir at dörtnala koşarken dört ayağı birden aynı anda yerden kesilir mi?” sorusuna cevap bulması verilebilir. Muybridge bu cevabı bir hat üzerine 12 kamera yerleştirerek dörtnala koşan bir atın hat boyunca her bir kamerayı tetiklemesi ile elde ettiği fotoğraf serisi ile ispatlamıştır (İnt.Kny.1).

Bu ilk bilimsel çalışmadan sonra 3 boyutlu evrende hareketin değerlendirilmesi için görüntü tabanlı hareket analizi uygulamalarında vazgeçilmez hale gelmiştir. Ayrıca hareket analizi için farklı hareket programları mevcuttur. Bu programlara Kinovea, V1 Home, PhysMo, Tracker, Motion Analysis Tools, Yessoft Sport Video Player ve Sports Video Analysis örnek olarak verilebilir (İnt.Kny.16). Kinovea, hareket ve spor analizi için geliştirilmiş bir görüntü işleme (Resim 3.1) aracıdır. Bu çalışmada da hareket analizi için Kinovea yazılım programı tercih edilmiştir.

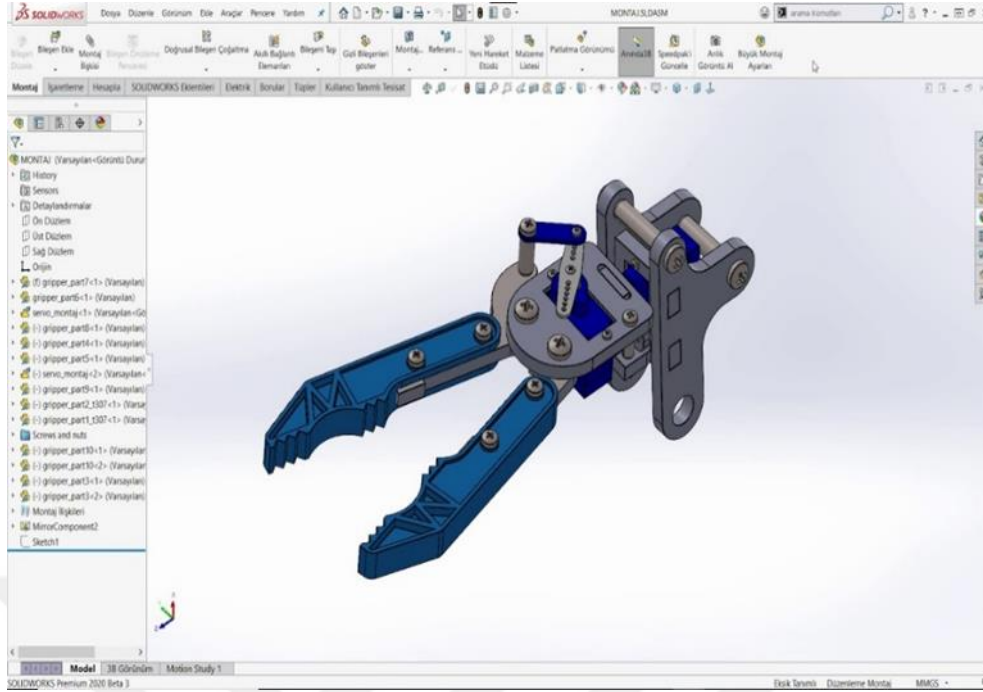


Resim 3.1 Kinovea Programı.

Program, istenen parametreleri ve performansları yakalamak, karşılaştırmak, yavaşlatmak, ölçmek, açıklama eklemek ve incelemek için bir dizi araç sağlamaktadır. Kinovea tamamen ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir yazılımdır (İnt.Kny.11).

3.5 Bilgisayar Destekli Katı Modelleme

Solidworks, katı model oluşturmaya olanak sağlayan bilgisayar destekli çizim (CAD) veya diğer bir adla bilgisayar destekli mühendislik (CAE) tasarım programıdır. Bu CAD yazılımı ile iki boyutlu ve/veya üç boyutlu katı modeller oluşturulabilmektedir. Ayrıca bu yazılım; katı parça modelleme, simülasyon, hareket, montaj, araç kutusu, araç analisti, e-drawings, Photoview 360, ScanTo3D, ve DWG editör gibi modülleri bünyesinde barındırmaktadır (İnt.Kny.15).



Resim 3.2 SolidWorks arayüzü.

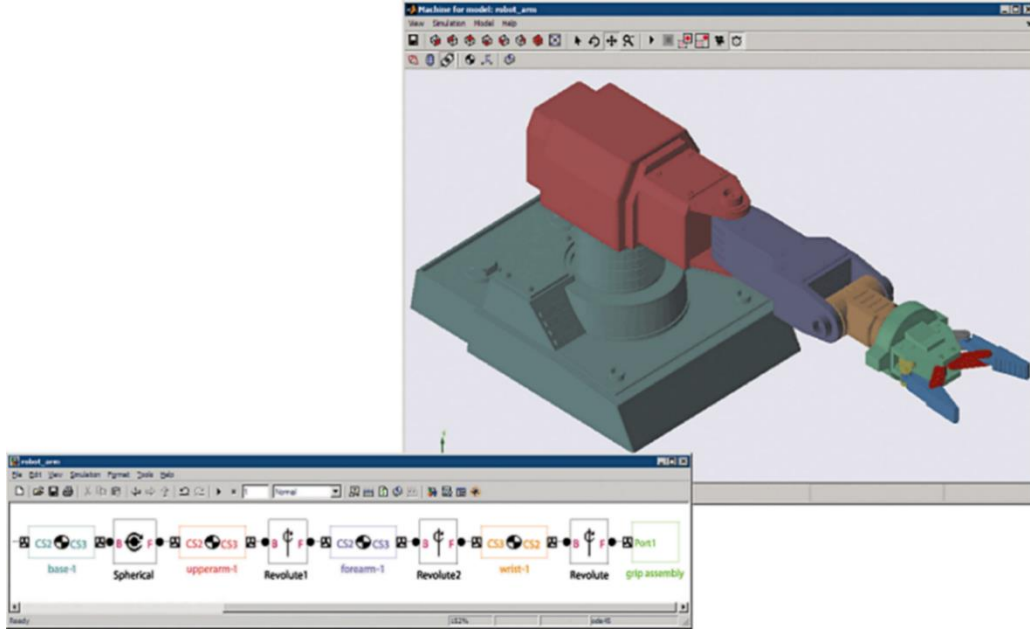
Solidworks (Resim 3.2) programının kullanıcılara sağladığı başlıca avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Basit bir ara yüze sahip olmasının yanı sıra ileri düzey modellemeler yapılabilir.
- Tasarlanan katı model üzerindeki analiz, simülasyon ve animasyon yapılabilir.
- Çok sayıda alt bileşene sahip makine parçalarının tasarımı ve birleşimini yapılabilir.
- Tasarımları renklendirilerek, görsellerini iyileştirme olanağı sağlar.
- Tasarım dosyaları ANSYS gibi analiz programlarında çalıştırılabilir.

3.5.1 Matlab –Simmechanic

MATLAB, MathWorks tarafından geliştirilen tescilli sayısal hesaplama platformudur. Bu program ile matris manipülasyonları, fonksiyonların ve verilerin çizilmesi, mevcut algoritmaların uygulanması, kullanıcı tarafından algoritma geliştirilmesi, insanların bilgisayar ara yüzlerinin oluşturulması vb. birçok işlem yapılabilmektedir. MATLAB sembolik hesaplama yeteneklerine ve isteğe bağlı birçok araç kutusuna erişim sağlayan MuPAD motorunu kullanır (İnt.Kny.15).

Mekanik sistemlerin üç boyutlu modellenmesini sağlayan SimMechanics Simulink ortamında çalışan paket programdır. Bu paket program ile oluşturulan modellerin üç boyutlu modeli görülebilmekte ve hareketler eşzamanlı simülasyon sırasında izlenebilmektedir. SimMechanics, Simulink altında çalıştığı için, MATLAB ve Simulink yazılımlarının tüm olanaklarını bütünsel kullanma olanağı sağlamaktadır. SimMechanics ile tasarlanan mekanik sistemin elektriksel, pnömatik ve hidrolik modellerle birleştirilerek denetlenmesi Simulink sayesinde mümkün olmaktadır. Resim 3.3'te, SolidWorks ortamında katı modeli yapılmış ve SimMechanics blok diyagramı çıkartılmış bir robot kolunun kontrolü ve simülasyonu gerçekleştirilmiş bir çalışma örneği görülmektedir.

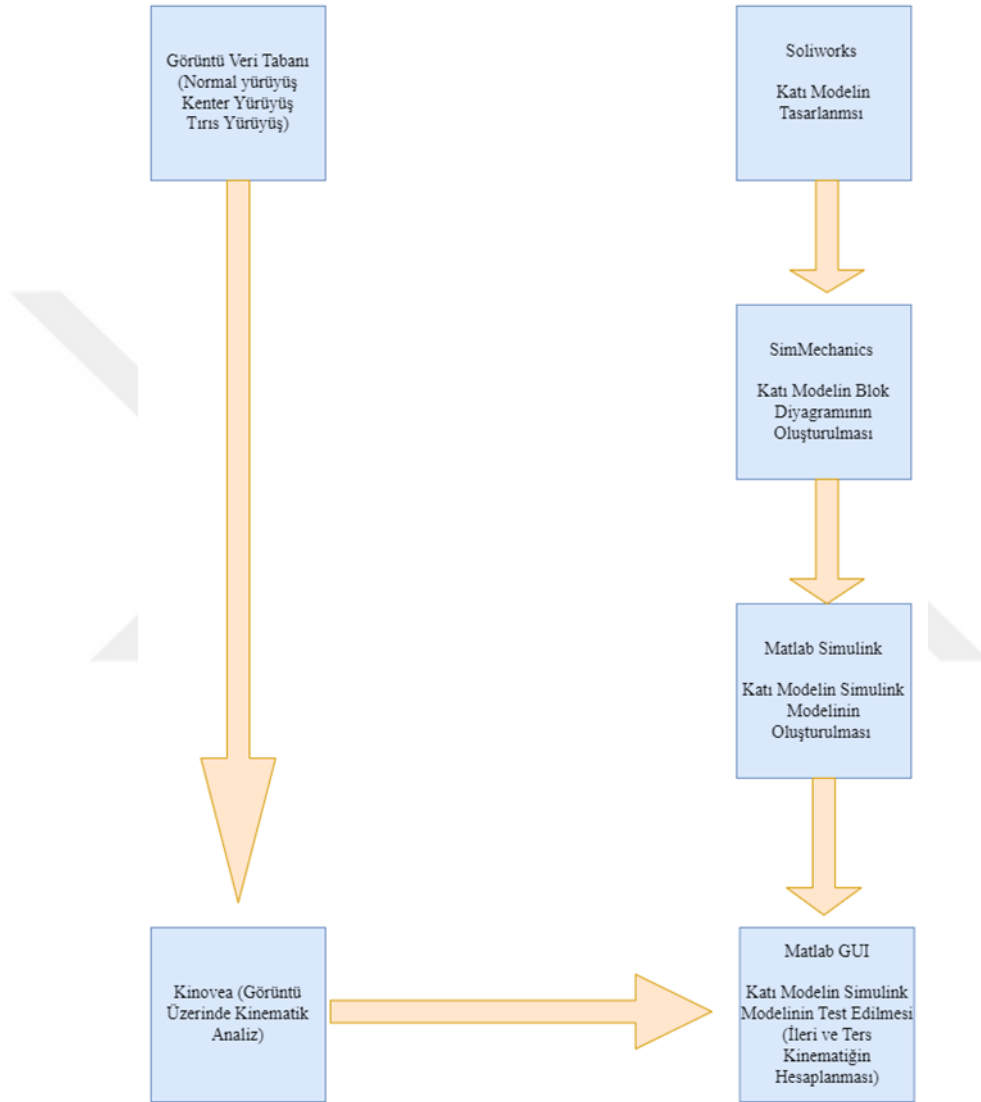


Resim 3.3 SolidWorks Arayüzü.

3.6 Kinematik Analizine Dayalı 3B Modelleme Simülasyon ve Uygulama Sistemi

Şekil 3.10'da tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sistemin simülasyonuna ait blok diyagram verilmiştir. Canlı organizmanın görüntüleri veri tabanından alındıktan sonra Kinovea ortamında her bir kesit analiz edilerek kinematik ekleme açılarına ait veriler çıkartılmıştır. Kinematik analizi yapılan canlının katı modeli Solidworks ortamında tasarlandıktan sonra MATLAB SimMechanics'e uygun olarak modelin mekanik blok

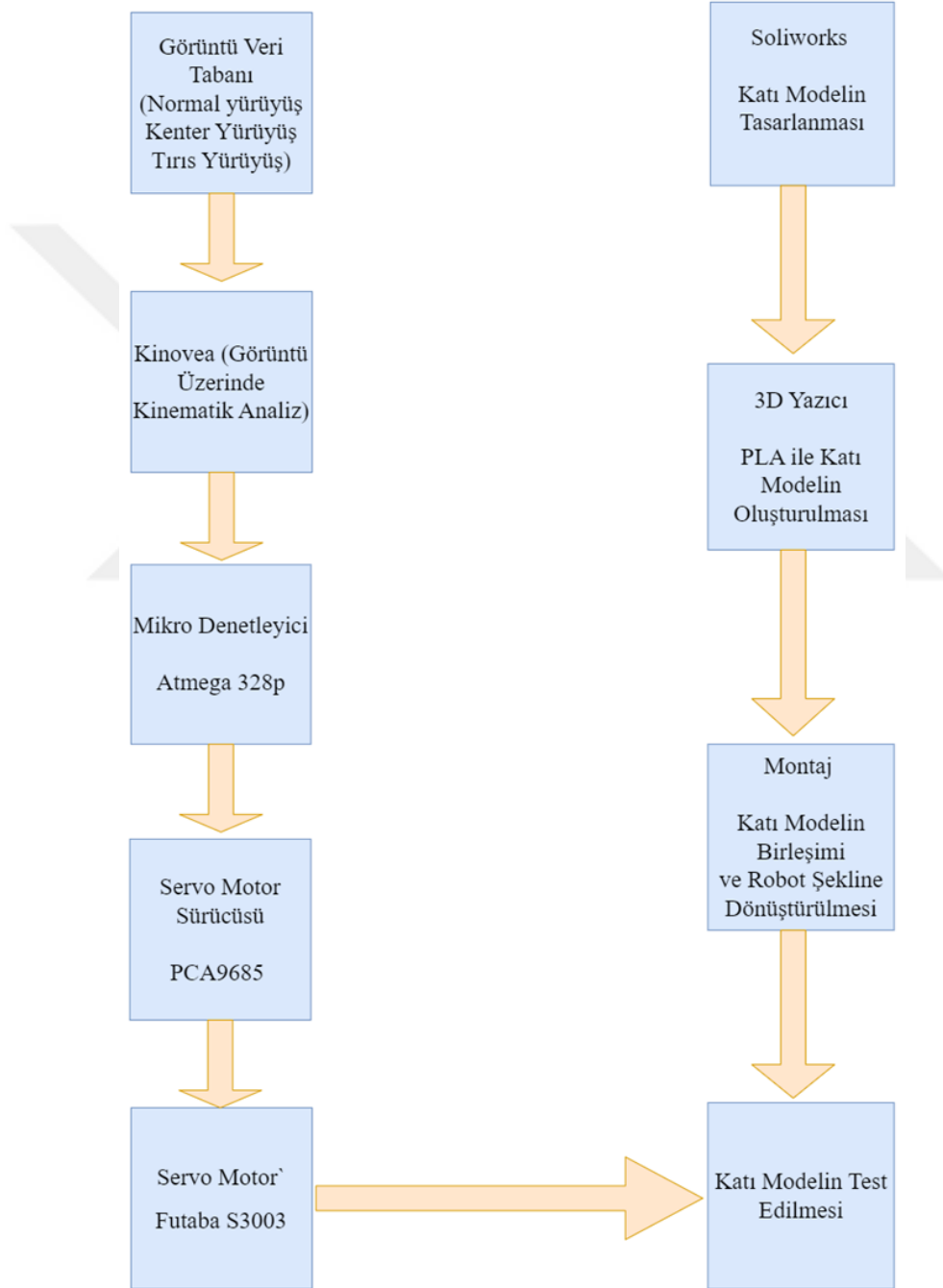
diyagramları oluşturulmuştur. Matlab'ın Simulink ve GUI ortamlarında sistemin ileri ve ters kinematiği hesaplanarak katı modelin hareket yeteneğinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen kinematik bilgileri kutu grafiğine aktararak simülasyon sisteminin doğruluğu saptanmıştır.



Şekil 3.11 Geliştirilen simülasyon sisteminin blok diyagramı.

Uygulama sisteminin blok diyagramı Şekil 3.11’da verilmiştir. Solidworks ortamında tasarlanan katı modelin gerçek modeli 3D yazıcı ile üretilmiştir. Daha sonra Kinovea analizi sonucunda elde edilen kinematik bilgiler kullanılarak eğri uyurma yöntemiyle PWM sinyaline dönüşüm denklemi çıkarılmıştır. Çıkarılan denklemler, mikrodenetleyici (Atmega 238) aracılığıyla aç bilgilerine göre PWM sinyaline çevrilmiş olup PCA9685

servo motor sürücü yardımıyla Futaba S3003 servo motor kullanarak gerçek sistem üzerinde test edilmiştir. Test verilerini analiz etmek üzere sistemin görüntü kaydı alınmıştır. Alınan görüntülerin Kinovea ortamında kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Kinematik analizinden elde edilen bilgiler kutu grafiğe aktarılarak katı modelin hareket yeteneği gerçek, canlı hareketi ile kıyaslanmıştır.



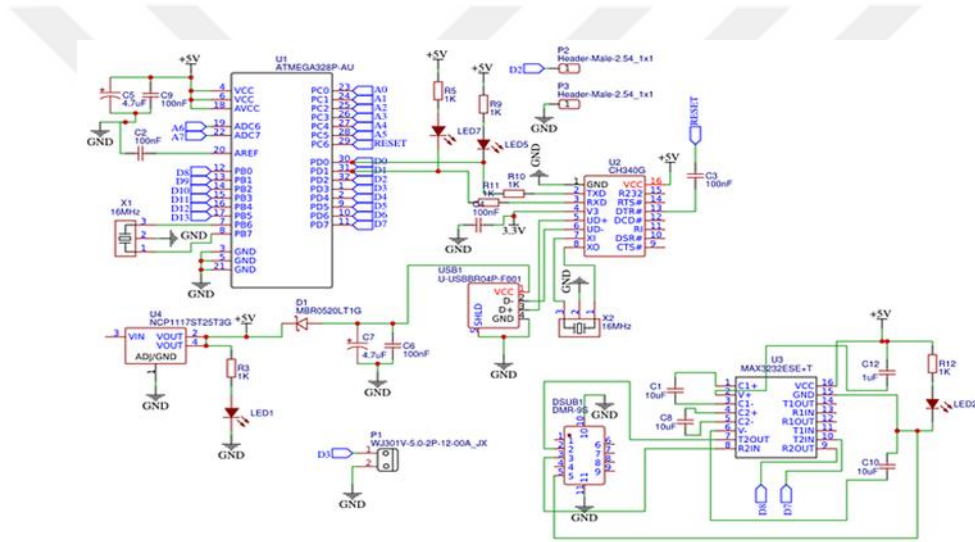
Şekil 3.12 Geliştirilen uygulama sisteminin blok Diyagramı.

3.6.1 Uygulama Sistemine ait Temel Donanımlar

Bu bölümde sistemin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılan temel donanımlar ve bu donanımların teknik özellikleri sunulmaktadır.

3.6.1.1 Mikro Denetleyici

Tasarlanan sistemde Atmega 328 mikro denetleyiciye sahip Arduino Nano geliştirme kartı kullanılmıştır. Kullanılan mikrodenetleyicinin devre şeması Şekil 3.12’de verilmiş olup Çizelge 3.1’de Arduino Nano’nun önemli özellikleri gösterilmiştir (İnt.Kyn.12).



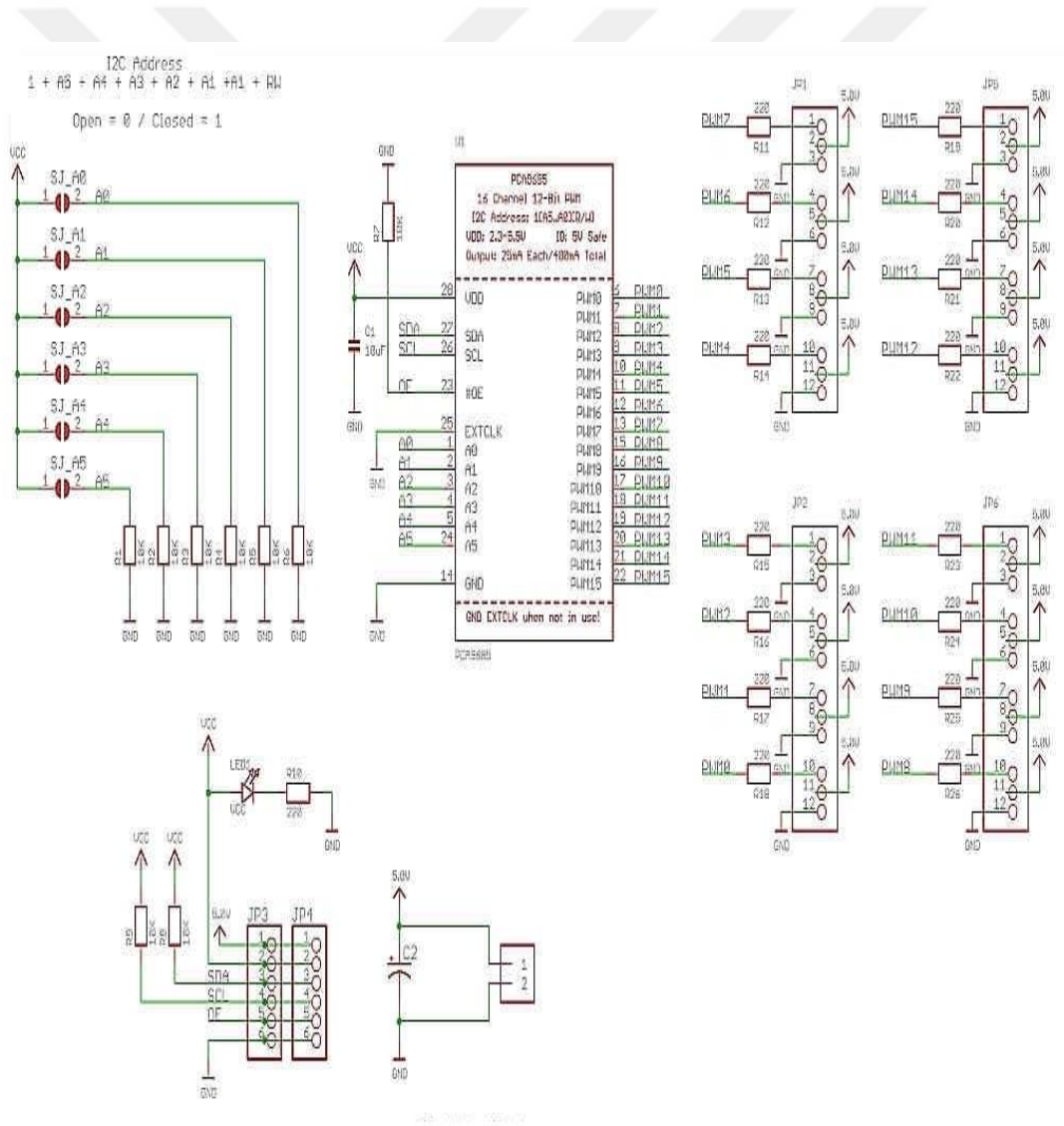
Şekil 3.13 Arduino nano devre şeması (Arduino Forum 2019).

Çizelge 3.1 Arduino nano başlıca önemli özellikleri.

Nano Özellikleri	Değer
Mikrodenetleyici	Atmega 328p
Kristal Osilatör	16 MHZ
Çalışma Voltajı	5 V
Flash Bellek	32 KB
SRAM Bellek	3 KB
EEPROM	1 BB
ADC	10 bitlik 8 kanal
PWM	6 kanal
Haberleşme	UART,I2C,SPI

3.6.1.2 Motor Sürücü

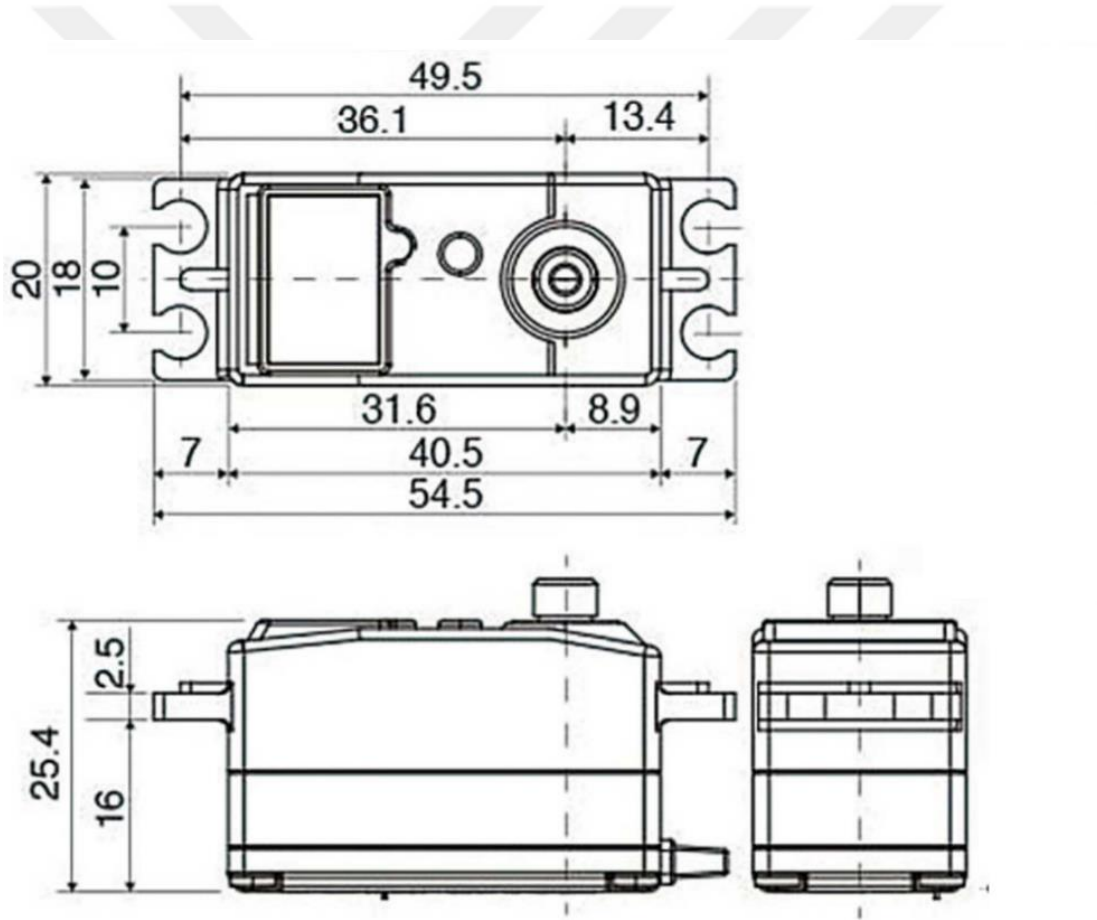
Bu tez çalışmasında kinematik bilgileri elektrik sinyaline çevrildikten sonra servo motor kontrolü için PCA9685 (Şekil 3.13) tercih edilmiştir. PCA9685 servo motor sürücü, I2C haberleşme protokolü kullanarak 16 PWM kanalını eşzamanlı olarak sürme imkânı sunmaktadır. Ayrıca kullanılacak servo motorun besleme kriterlerine uygun güç kaynağı kullanma fırsatı sunmaktadır. Bununla birlikte kartın üzerinde bulunan adresleme özelliklerini kullanarak aynı karttan 62 tane seri bağlayarak toplam 992 PWM çıkışı sürülebilmektedir (Adafruit 2012).



Şekil 3.14 PCA9685 servo motor sürücü kartının devre şeması (Adafruit 2012).

3.6.1.3 Futaba S3003 Servo Motor

Servo motor, mekanizmalarda ve çok eklemlı sistemlerde kinematik bilgileri kontrol etmek amacıyla eyleyici olarak kullanılmaktadır. Servo motorların çok eklemlı sistemlerde tercih edilmesinin sebebi, hedeflenen pozisyonu alması ve sonraki pozisyon komutu gelene kadar bulunduğu pozisyonu değiştirmeme özelliğine sahip olmasıdır. Bu çalışmada Futaba S3003 servo motorun (Şekil 3.14) yüksek tork, 180 derece, uygun çalışma frekansı ve uygun çalışma voltajı özellikleri dolayısıyla tercih edilmiştir. (İnt.Kyn.13)

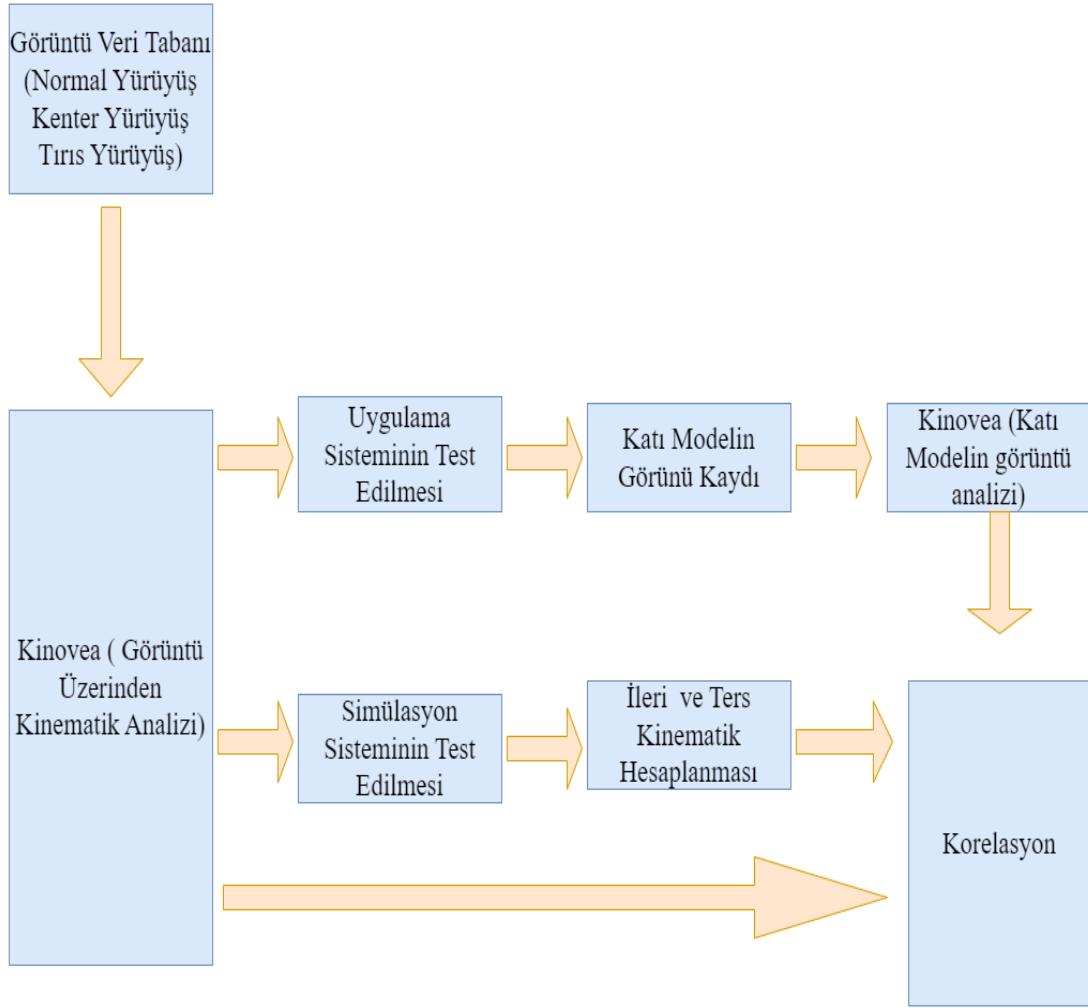


Şekil 3.15 Futaba S3003 servo motor (Anonim).

3.6.2 Sistemin Başarım Testi

Canlı organizmanın görüntüleri veri tabanından alındıktan sonra, Kinovea ortamında

hareket analizi gerçekleştirilerek kinematik bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen bilgiler geliştirilen sistemde test edilmiştir. Daha sonra sistemin görüntü kayıtları alınıp Kinovea ortamında kinematik analizi yapılmıştır. Simülasyon ve uygulama sisteminden elde edilen sonuçlar, gerçek hareket bilgileri kutu grafiğine aktarılarak geliştirilen sistemin başarı oranı tespit edilmiştir. Şekil 3.15'te geliştirilen sistemin başarı testinin akış diyagramı verilmiştir.



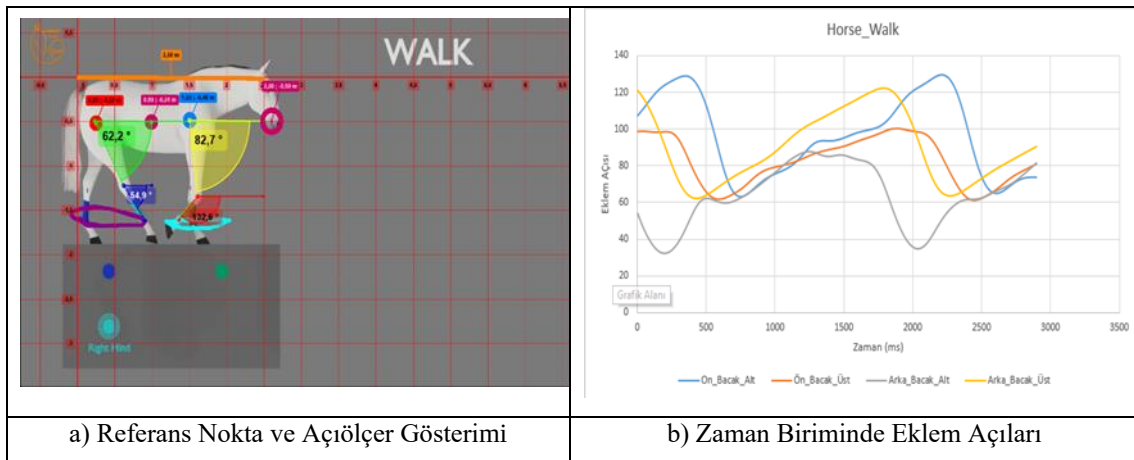
Şekil 3.16 Geliştirilen sistemin kıyaslama akış diyagramı.

4. BULGULAR

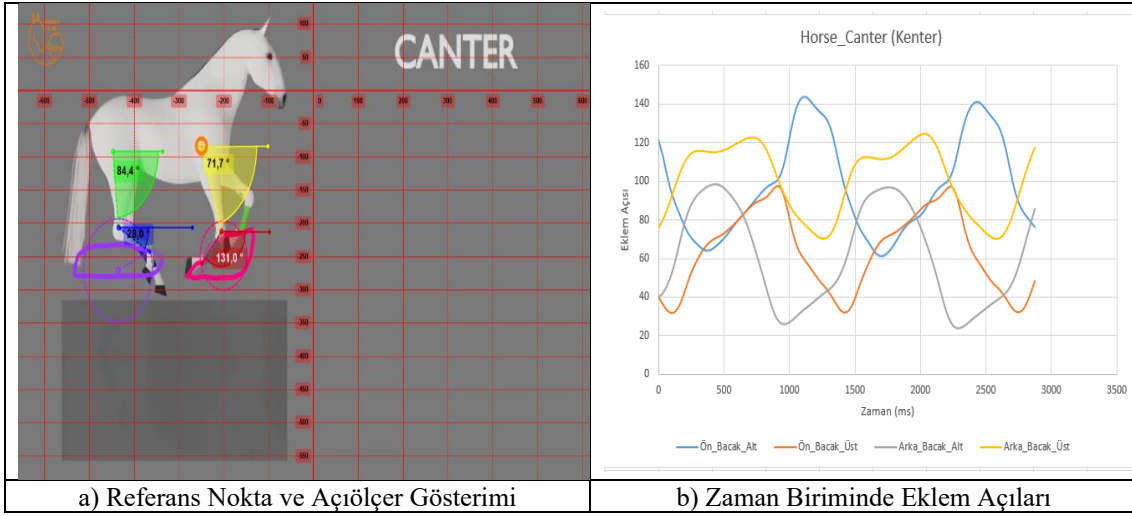
Bu bölümde elde edilen bulgular; canlı görüntülerin Kinovea ortamında kinematik analizi, Solidworks ortamında katı modelin oluşturulması, katı modelin simülasyon sistemi ve sistemin test edilmesi, uygulama sisteminin oluşturulması, uygulama sistemiyle elde edilen görüntülerin kinematik analizi, canlının simülasyon sistemi ve uygulama sistemi ile arasındaki ilişkiler sunulmuştur.

4.1 Kinovea Ortamında Canlı Görüntü Üzerinde Kinematik Analiz

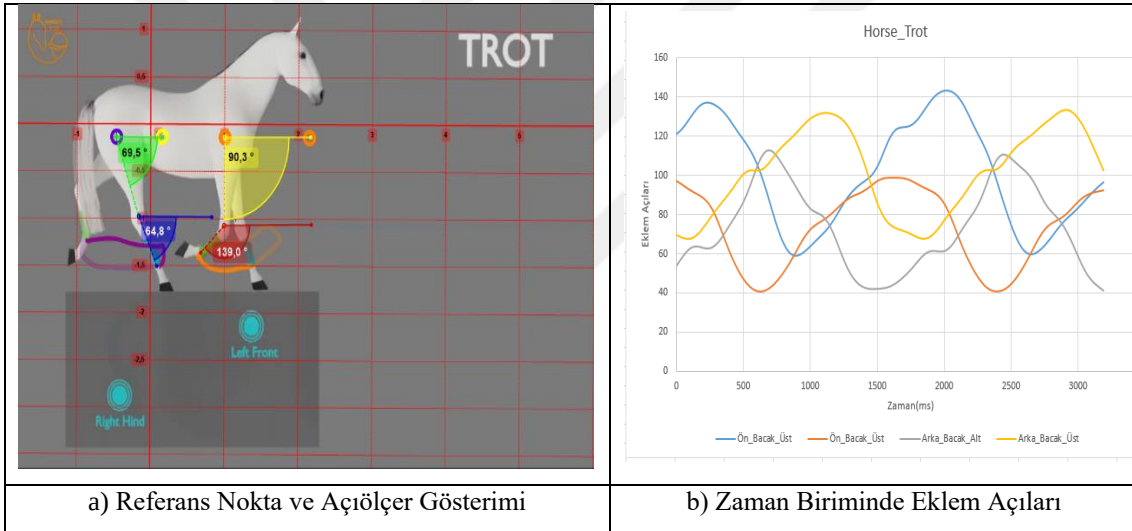
Tez çalışması kapsamında “Horse and Us” blog sitesinden atların doğal yürüyüşlerinden olan normal yürüyüş, kenter yürüyüş ve tırıs yürüyüş görüntüleri alınmıştır (İnt.Kyn.9). Alınan görüntüler Kinovea ortamında atın ön bacaklarında kol (theta1) ve diz (theta2), arka bacaklarında ise kalça (theta1) ve diz (theta2) bölümleri referans nokta belirlenerek Kinovea’da bulunan açıölçer aracı kullanılarak açı bilgileri elde edilmiştir. Normal yürüyüş, kenter yürüyüş ve tırıs yürüyüş esnasında zamana göre değişen açı bilgileri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te verilmiştir. Analiz sonucunda normal ve tırıs yürüyüşlerinin simetrik; yani bir tarafta gözlemlenen hareketin diğer tarafta da tekrarlandığı gözlemlenmiştir. Kenter yürüyüş ise asimmetrik davranış göstermektedir. Yani sağ ve sol tarafta oluşan hareketlerin birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca atın ön ve arka ayak bilekleri referans nokta belirlendiğinde hareketin dairesel olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 Normal Yürüyüşün Kinovea Ortamında Kinematik Analizi.



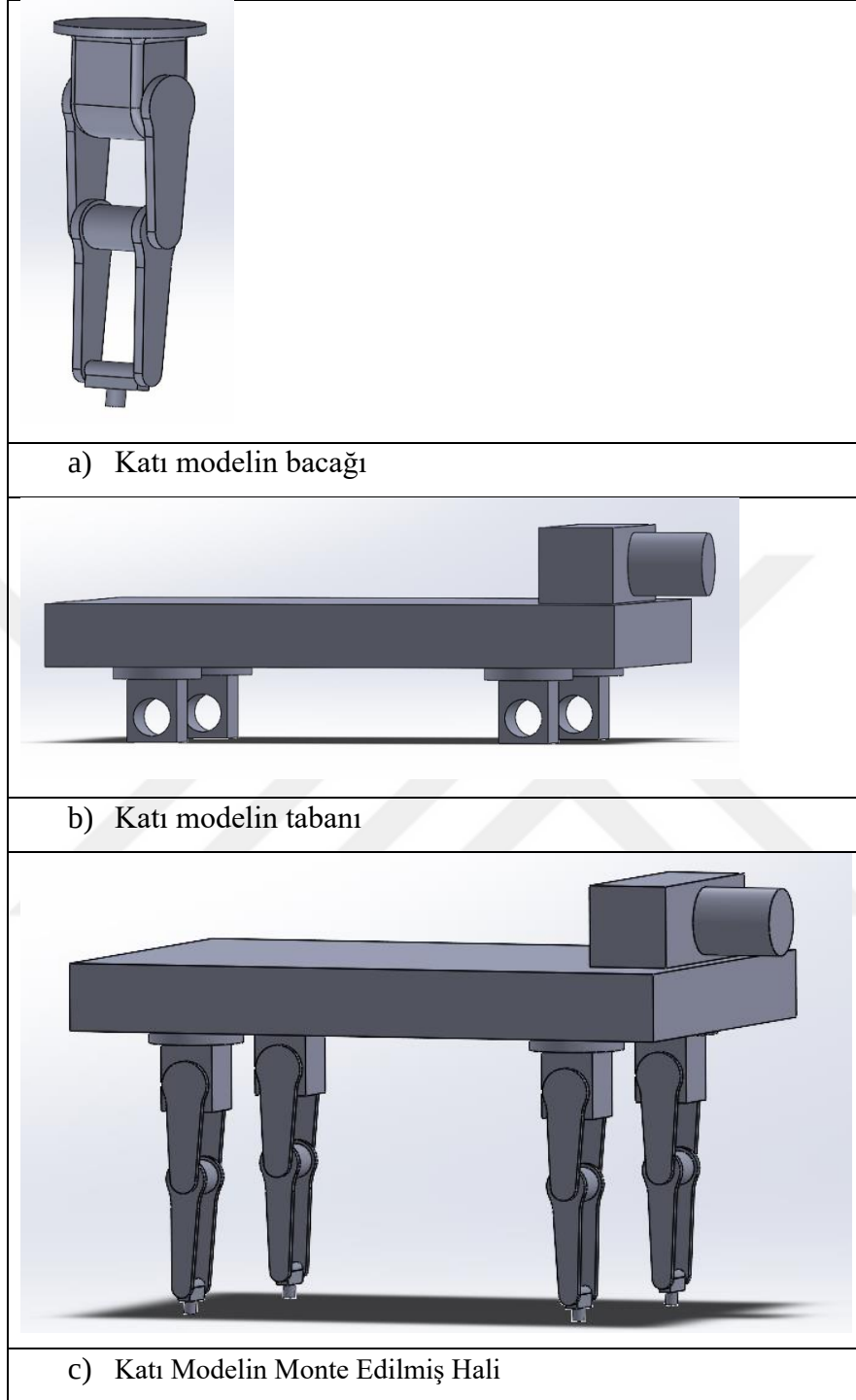
Şekil 4.2 Kenter yürüyüşün kinovea ortamında kinematik analizi.



Şekil 4.3 Tırs yürüyüşün kinovea ortamında kinematik analizi.

4.2 Katı Modelin Solidworks Ortamında Tasarlanması

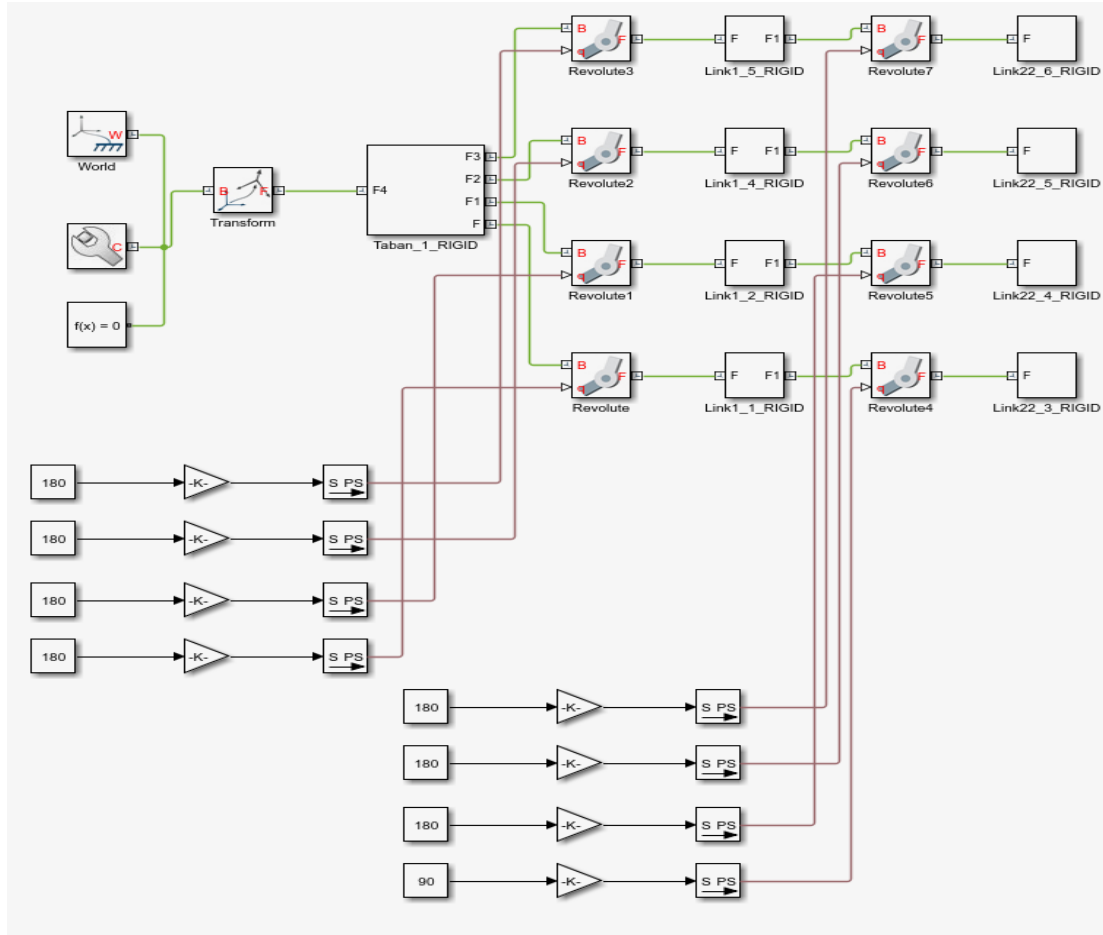
Canlı organizmanın insanla olan benzerliği dikkate alınarak katı modelin bacakları insansı olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bacaklar (Resim 4.1a) yan yana getirilerek düz plaka şeklindeki bir gövdeye monte edilmiştir (Resim 4.1b). Ayrıca Resim 4.1’de katı modelin monte edilmiş hali verilmiştir. Tasarlanan modelin genişliği 290 cm, uzunluğu 46 cm ve yüksekliği 15 cm’dir.



Resim 4.1 Katı modelin tasarımı.

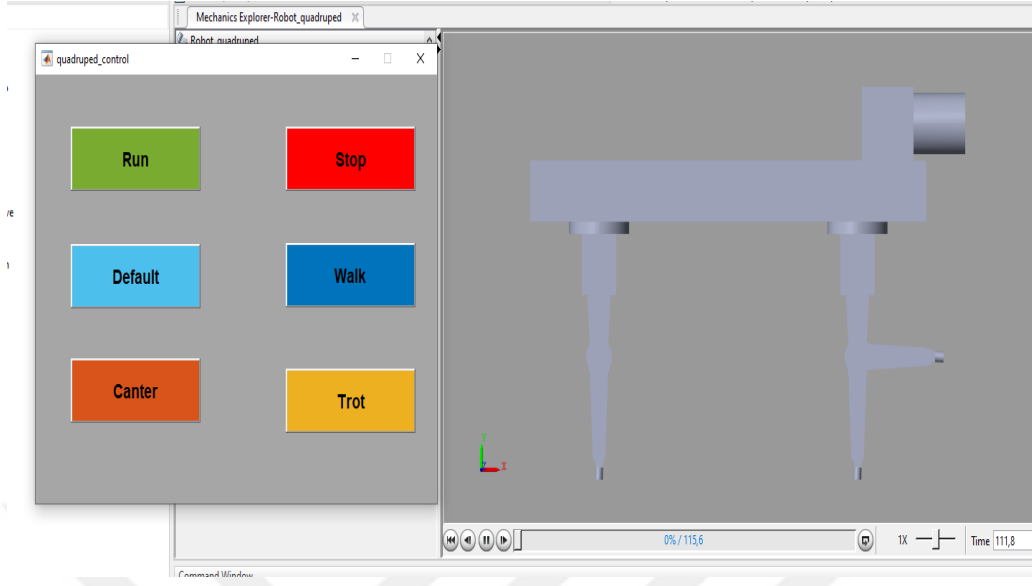
4.3 Katı Modelin Simülasyon Sistemi ve Sistemin Test Edilmesi

Solidworks ortamında katı model tasarlandıktan sonra Matlab SimMechanics eklentisi kullanılarak modelin Simulink modeli (Şekil 4.4) çıkartılmıştır.



Şekil 4.4 Katı modelin simulink blok diyagramı.

Çıkarılan Simulink modelin, kinematik analiz sonuçlarını katı modelde test etmek için Matlab, GUI ara yüzü (Resim 4.2) ile birlikte kullanılmıştır. Tasarlanan ara yüzde 6 tane düğme bulunmaktadır. Start düğmesine basıldığında Simulink modeli yüklenir ve başlatılır, stop düğmesine basıldığında da Simulink modeli durur. Default düğmesine basıldığında ise katı modelin tüm bacaklarının dik durması sağlanmaktadır. Kenter yürüyüş (Canter), normal yürüyüş (Walk) ve tırıs yürüyüş (Trot) düğmelerine basıldığında ise daha önce Kinovea analizinden elde edilen kinematik bilgileri Denavit-Hartenberg yöntemi ile çıkarılan (Denklem 4.1 ve Denklem 4.2) ileri kinematik denklemleriyle konum bilgileri hesaplanmıştır. Elde edilen konum bilgileri ters kinematik denklemlerinden olan denklem 3.15 ile denklem 3.24'e verilerek açı bilgilerine ulaşılmıştır. Denklem 3.15 ve Denklem 3.24'ten dört çözüm uzayı karşımıza çıkmaktadır. Bunlar;



Resim 4.2 Katı modelin tasarımı.

Birinci Çözüm uzayı

$$\theta_2 = \arctan2\left(\sqrt{1 - \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}}, \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}\right) \quad (4.1)$$

$$\theta_1 = \arctan2(px, py) + \arctan2\left(\sqrt{px^2 + py^2 - (a_2 * \cos\theta_2 + a_1^2)^2}, a_2 * \cos\theta_2 + a_1\right) \quad (4.2)$$

İkinci Çözüm Uzayı

$$\theta_2 = \arctan2\left(-\sqrt{1 - \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}}, \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}\right) \quad (4.3)$$

$$\theta_1 = \arctan2(px, py) + \arctan2\left(\sqrt{px^2 + py^2 - (a_2 * \cos\theta_2 + a_1^2)^2}, a_2 * \cos\theta_2 + a_1\right) \quad (4.4)$$

Üçüncü Çözüm Uzayı

$$\theta_2 = \arctan2\left(\sqrt{1 - \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}}, \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}\right) \quad (4.5)$$

$$\theta_1 = \arctan2(px, py) - \arctan2\left(\sqrt{px^2 + py^2 - (a_2 * \cos\theta_2 + a_1^2)^2}, a_2 * \cos\theta_2 + a_1\right) \quad (4.6)$$

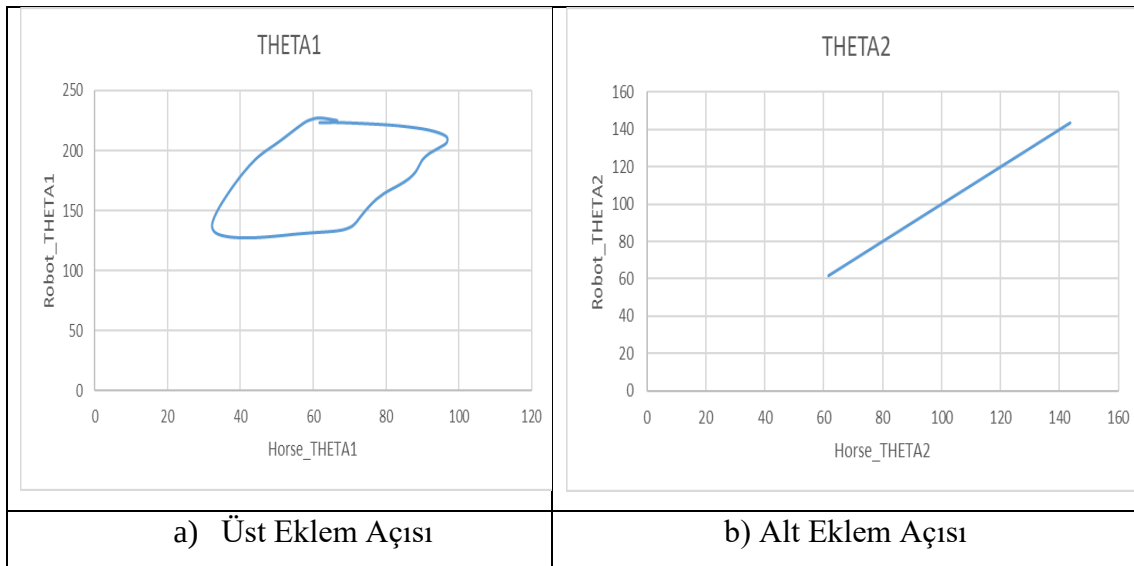
Dördüncü Çözüm Uzayı

$$\theta_2 = \arctan2\left(-\sqrt{1 - \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}}, \frac{px^2 + py^2 - (a_2^2 + a_1^2)}{2 * a_1 * a_2}\right) \quad (4.7)$$

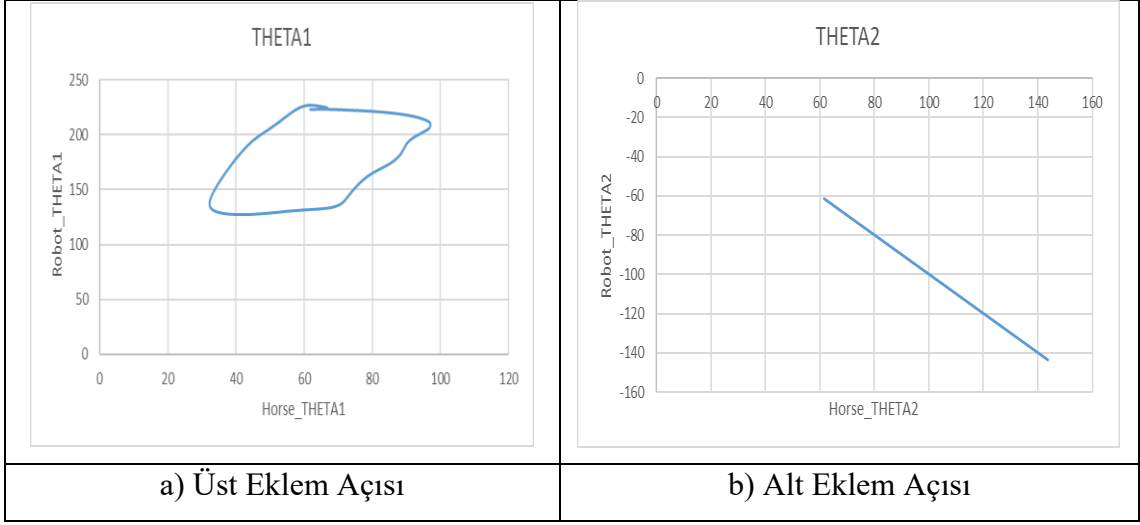
$$\theta_1 = \arctan2(px, py) - \arctan2\left(\sqrt{px^2 + py^2 - (a_2 * \cos\theta_2 + a_1^2)^2}, a_2 * \cos\theta_2 + a_1\right) \quad (4.8)$$

Yukarıda verilen çözüm uzaylarından üçüncü çözüm uzayına ait denklemlerin doğru sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ters kinematik denklemler sonucunda Kinovea analizden elde edilen açı bilgileri ile yeni hesaplanan açı bilgilerinin konum bilgileri arasında Öklid uzaklığı hesaplanarak ters kinematiğin doğru çözüm uzayları tespit edilmiştir. Katı modelin Kenter yürüyüşü için ön bacağın simülasyon sonuçları her bir çözüm uzayı için sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki gibi elde edilmiştir. Ayrıca tüm yürüyüş modellerinin simülasyon sonuçları şekilsel olarak benzerlik göstermektedir.

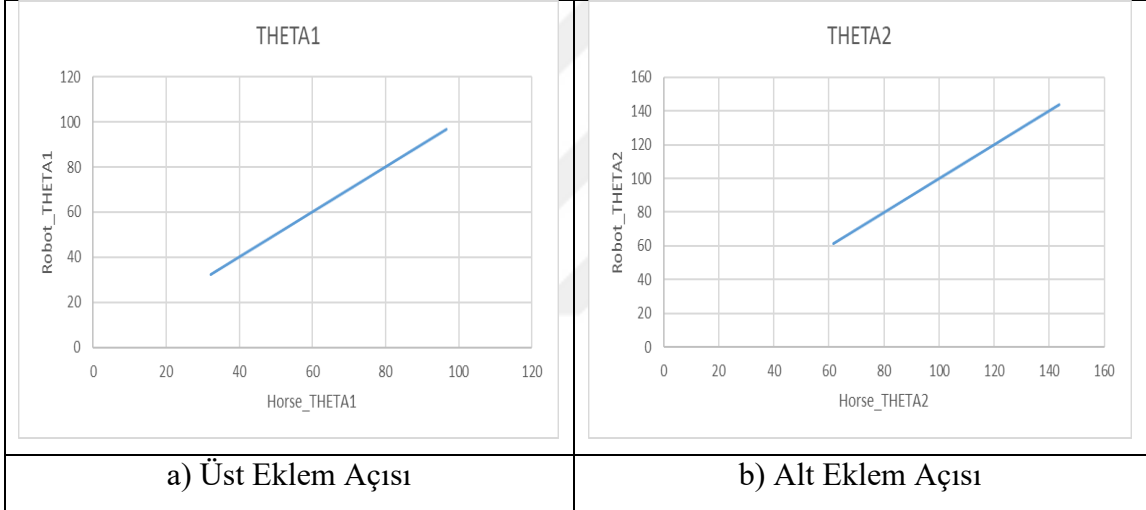
Simülasyon sonuçlarına göre birinci, ikinci ve dördüncü çözüm uzaylarında alt ve üst eklem açıları (THETA1 VE THETA2) birbirlerinden zıt yönde ilişki gösterirken üçüncü çözüm uzayında hem alt eklem açıları hem de üst eklem açıları doğrusal bir ilişki göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada çözüm uzayları arasından üçüncü çözüm uzayı en başarılı çözüm uzayı olarak tespit edilmiştir.



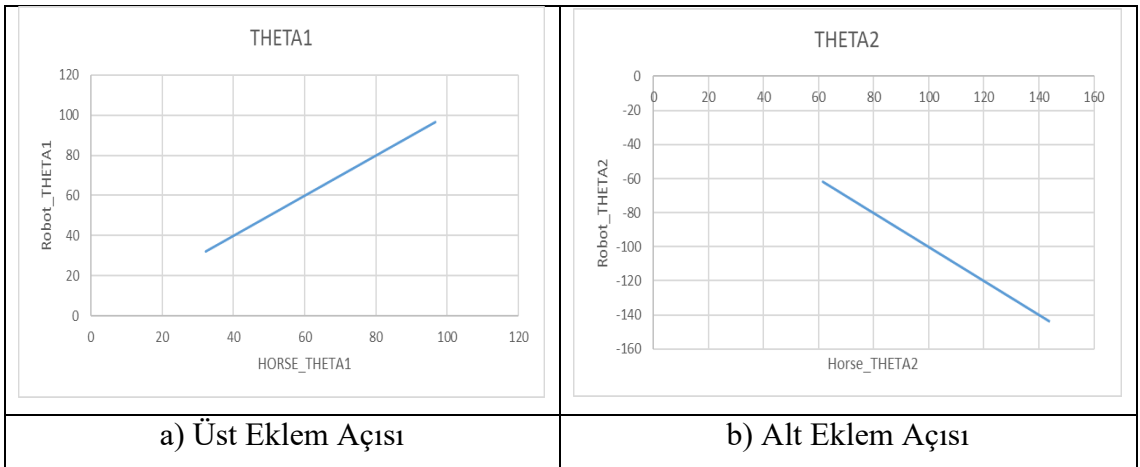
Şekil 4.5 Kenter ön bacağın birinci çözüm uzayı sonuçları.



Şekil 4.6 Kenter ön bacağın ikinci çözüm uzayı sonuçları.



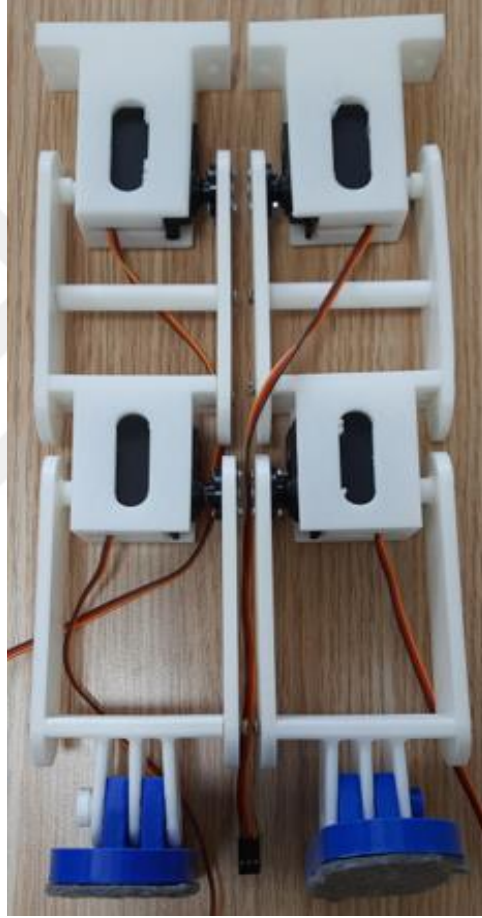
Şekil 4.7 Kenter ön bacağın üçüncü çözüm uzayı sonuçları.



Şekil 4.8 Kenter ön bacağın dördüncü çözüm uzayı sonuçları.

4.4 Uygulama Sisteminin Oluşturulması

Katı model Solidworks ortamında tasarlandıktan sonra STL dosyaları çıkartılarak 3D yazıcıdan PLA malzemesi kullanılarak parçaları üretilmiştir. Üretilen parçalar eklem görevi gören Futaba S3003 servo motorlar ile birleştirerek katı modelin insansı bacakları şekil 4.9’da görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Oluşturulan katı modelin genişliğı 46 cm, uzunluğı 29 cm ve yüksekliğı 36 cm’dir.

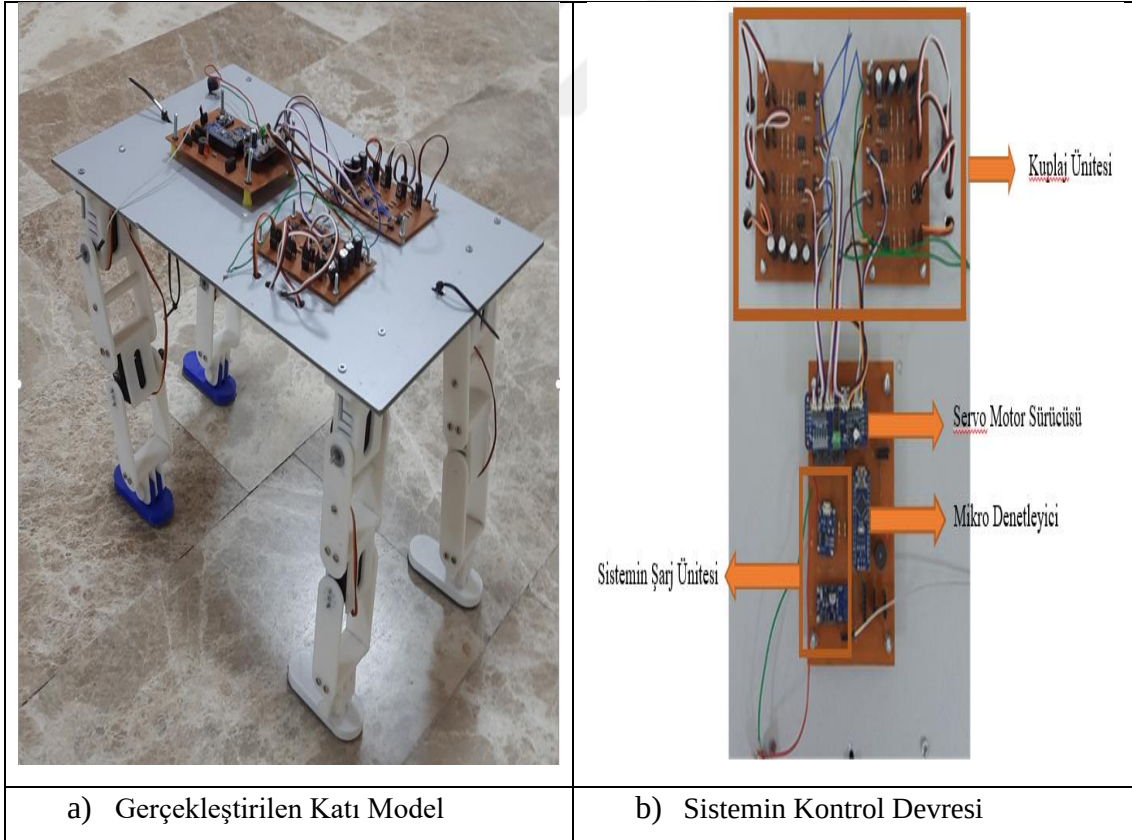


Resim 4.3 Katı modelin monte edilmiş insansı bacağı.

Oluşturulan bacaklar yan yana getirilip sabit düz plaka şeklindeki bir gövdeye monte edilerek dört bacaklı bir canlı sistemi (şekil 4.10) oluşturulmuştur. Servo motorların kontrolünü sağılamak için çıkarılan denklemler Atmega 328 mikrodeneleyiciye verilmiştir. Mikrodeneleyicinin yazılımı için Arduino geliştirme ortamı kullanılmıştır. Ayrıca servo motorların PWM sinyali 400 mikro (0 derece) saniye, 1.2 mili saniye (90 derece) ve 2 mili saniye (180 derece) olarak ayarlanmıştır. Kinematik bilgiler (aı) PWM

sinyaline eğri uydurma yöntemi yardımıyla ayarlanmıştır. Eğri uydurma yöntemi sonucu servo motorların montaj yönlerine göre iki denklem elde edilmiştir. Bunlar $m1$ ve $m2$ olarak Denklem 4.10 ve Denklem 4.11’de verilmiştir. Bu çalışmada PWM sinyalleri $m1$ yani Denklem 4.10’a göre elde edilmiştir.

Oluşturulan sistemin eklem noktalarından bacakları hareket ettirmek için Kinovea ortamında analizi yapılmış olan normal yürüyüş, kenter yürüyüş ve tırıs yürüyüş kinematik açı bilgileri kullanılmıştır. Katı modelin canlı organizmada olduğu gibi ritmik hareketini sağlamak için Kinovea analizi sırasında her kesitten (zaman biriminde) alınan kinematik açı bilgileri, Matlab Curve Fitting aracını kullanarak eğri uydurma yöntemi ile ilişkilendirilerek her yürüyüş modeli için eklem açısına ait altıncı dereceden sinüs denklemleri çıkartılmıştır. Çıkarılan fonksiyonlar Denklem 4.9’da verilmiştir. Ayrıca fonksiyonların Kenter yürüyüş modeli için katsayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Diğer yürüyüş modellerinin Denklem 4.9’daki katsayıları Ekler bölümünde verilmiştir.



Resim 4.4 Gerçekleştirilen uygulama Sistemi.

$$\theta = a1 * \sin(b1 * x + c1) + a2 * \sin(b2 * x + c2) + a3 * \sin(b3 * x + c3) + a4 * \sin(b4 * x + c4) + a5 * \sin(b5 * x + c5) + a6 * \sin(b6 * x + c6) \quad (4.9)$$

$$m1 = (8.8889 * \theta) + 400 \quad (4.10)$$

$$m2 = 2000 - (8.8889 * \theta) \quad (4.11)$$

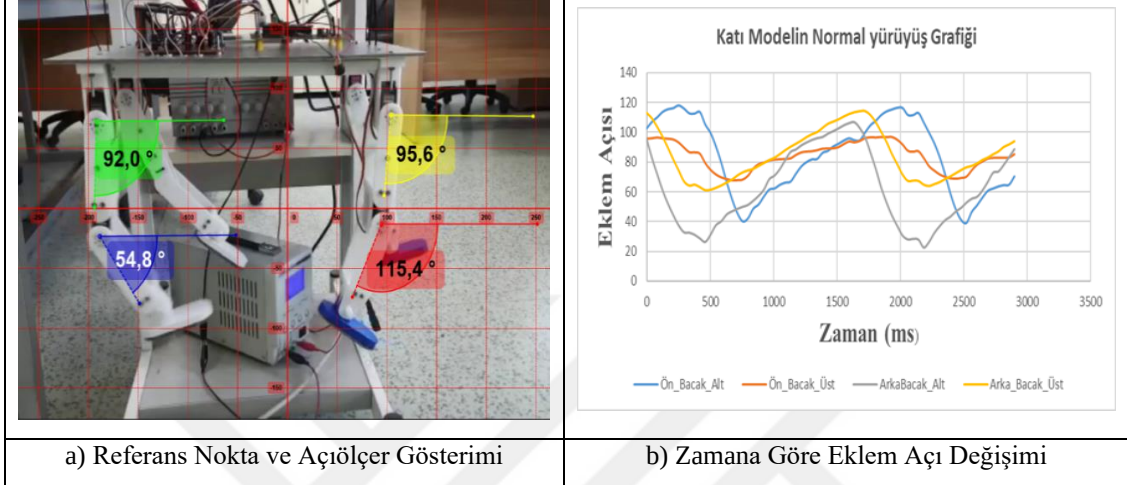
Çizelge 4.1 Kenter yürüyüş için Denklem 4.9'daki fonksiyonun katsayıları.

Değişkenler	Ön_Bacak_ Alt_Eklem	Ön_Bacak_ Üst_Eklem	Arka_Bacak _Alt_Eklem	Arka_Bacak _Üst_Eklem
a1	160.7	146.1	103.8	165.1
b1	0.002092	0.001203	0.002182	0.001977
c1	0.04154	1.717	-0.1692	0.3713
a2	106.2	92.95	16.62	60.64
b2	0.00417	0.002749	0.008154	0.003418
c2	1.654	4.229	1.836	2.934
a3	15.21	6.483	6.674	9.637
b3	0.008079	0.01164	0.01212	0.008457
c3	1.426	0.4364	2.122	2.29
a4	5.281	409.2	26.56	10.93
b4	0.01607	0.02987	0.003266	0.01158
c4	0.3869	-0.837	1.412	2.703
a5	57.46	1.954	2.041	152.4
b5	0.02003	0.01891	0.02195	0.0224
c5	0.9443	3.529	3.598	-2.9
a6	55.6	408.8	1.268	-151.4
b6	0.02032	0.02987	0.01904	0.02241
c6	3.892	2.302	2.959	3.368

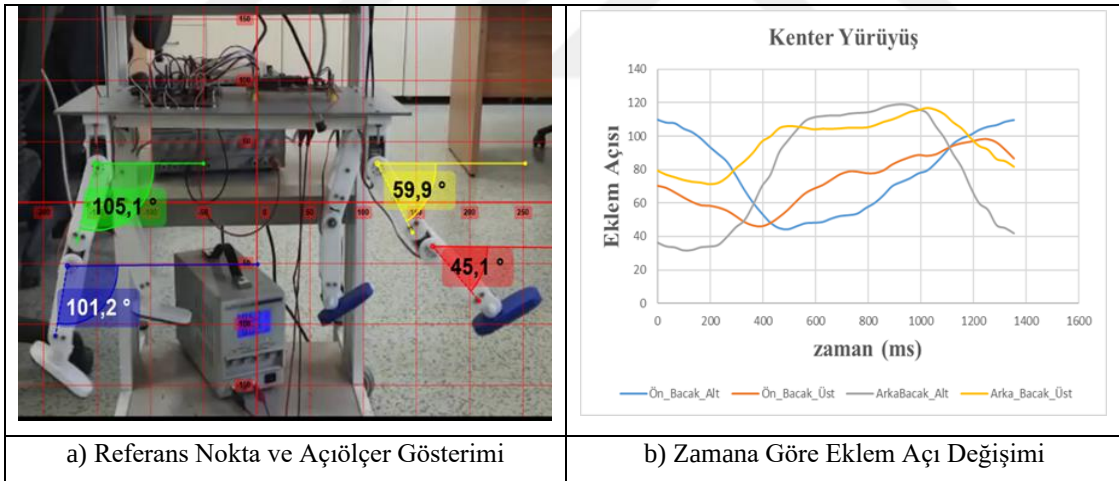
4.5 Uygulama Sisteminin Görüntü Üzerinden Kinematik Analizi

Kinovea ortamında atın normal yürüyüş, kenter yürüyüş ve tırıs yürüyüşlerinin döngü analizi sonuçları Denklem 4.10 kullanılarak PWM sinyallerine dönüştürülmüş ve katı modele aktarılmıştır. Daha sonra katı modelin hareketinin video görüntüleri kaydedilmiş

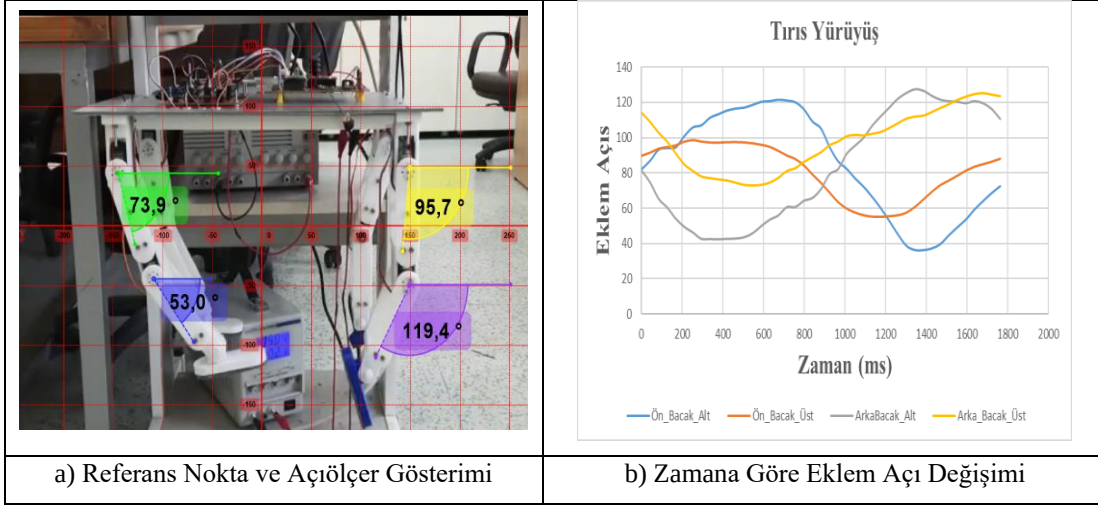
ve Kinovea ortamında kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Kinovea ortamında canlı organizmanın analizinde uygulanan yöntem katı modelde de kullanılarak kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Kinematik analiz sonuçları normal yürüyüş için Şekil 4.10, kenter yürüyüş için Şekil 4.11 ve tırıs yürüyüş için Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.9 Katı modelin normal yürüyüşünün kinovea ortamında kinematik analizi



Şekil 4.11 Katı modelin kenter yürüyüşünün kinovea ortamında kinematik analizi.



Şekil 4.2 Katı modelin tırs yürüyüşünün kinovea ortamında kinematik analizi.

4.6 Simülasyon Sistemi ve Gerçek Sistemin Karşılaştırılması

Kinematik analizlerden elde edilmiş eklem açıları ile simülasyon sisteminin çözüm denklemlerinden elde edilen eklem açıları arasındaki korelasyon katsayıları Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Normal yürüyüş korelasyon tablosu.

Çözüm Uzayları				
Eklem	1.Çözüm	2. Çözüm	3. Çözüm	4. Çözüm
Ön Bacak Alt	1	-1	1	-1
Ön Bacak Üst	0,7926	0,7926	1	1
Arka Bacak Alt	1	-1	1	-1
Arka Bacak Üst	0,8144	0,8144	1	1

Çizelge 4.3 Kenter yürüyüş korelasyon tablosu.

Çözüm Uzayları				
Eklem	1.Çözüm	2. Çözüm	3. Çözüm	4. Çözüm
Ön Bacak Alt	1	-1	1	-1
Ön Bacak Üst	0,6995	0,6995	1	1
Arka Bacak Alt	1	-1	1	-1
Arka Bacak Üst	0,8194	0,8194	1	1

Çizelge 4.4 Tırıs yürüyüş korelasyon tablosu.

Çözüm Uzayları				
Eklem	1.Çözüm	2. Çözüm	3. Çözüm	4. Çözüm
Ön Bacak Alt	1	-1	1	-1
Ön Bacak Üst	0,6995	0,6995	1	1
Arka Bacak Alt	1	-1	1	-1
Arka Bacak Üst	0,8194	0,8194	1	1

Atın gerçek görüntüleri ile gerçekleştirilen sistem arasındaki korelasyon ilişkileri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.5’deki korelasyon tablosuna bakıldığında ortalama olarak en az korelasyon ilişkisine sahip yürüyüş modeli normal yürüyüştür. En yüksek korelasyon ilişkisine sahip yürüyüş modeli ise tırıs yürüyüşte elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 Katı modelin farklı yürüme modelleri arasındaki korelasyon

Eklem	Normal Yürüyüş	Kenter Yürüyüş	Tırıs Yürüyüş	Eklemlerin Genel Ortalaması
Ön Bacak Alt	0,9013	0,8901	0,8310	0,8741
Ön Bacak Üst	0,9463	0,9400	0,9891	0,9584
Arka Bacak Alt	0,7700	0,8143	0,8746	0,8196
Arka Bacak Üst	0,9279	0,9807	0,9411	0,9499
Yürüyüşlerin Genel Ortalaması	0,8863	0,9062	0,9089	

Her yürüyüş modelinde en az korelasyon ilişkisinin alt eklemlerde ve en çok korelasyon ilişkisinin üst eklemlerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi üst eklemlerin gövdeye bağlı olması alt eklemlerin ise gövdeye uzak bir konumda bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü katı model PLA malzeme ile yapılmıştır ve sürekli harekete bağlı olarak malzemenin eklem noktalarında deformasyon oluşmaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada tasarım ve yapım aşaması maliyetli olan biyomimetik sistemlerin fiziksel olarak gerçekleştirilmeden önce denenmesine olanak sağlayan bir sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında anatomisi insan anatomisine benzeyen atların doğal yürüyüşleri (Normal, Kenter ve Tırıs) Kinovea ortamında kinematik analizleri belirlenip Solidworks ortamında 3B katı modelleri çıkartılmıştır. Çıkarılan katı modellere hareket yeteneğinin kazandırılması Matlab-SimMechanic platformunda hazırlanmış olan simülasyon arayüz yazılımı ile sağlanmıştır. Görüntü işleme ve simülasyon sonucunda elde edilen bulgular kıyaslanarak hareketlerin geliştirilen bir sisteme aktarma başarımı değerlendirilmiştir.

Ulusal ve uluslararası yapılan literatür çalışmalarında katı modellerin modellenmesi, simülasyonu ve analizinin bilgisayar destekli ortamlarda gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Geliştirilen katı modellerin biyomimetik analizleri için Matlab-SimMechanics aracı literatürde de tercih edilmiş ve sistemlerin kontrolünü sağlamak için kinematik analizler yapılmıştır. Geliştirilen sistemlerin performans değerlendirilmesi için görüntü analizi yöntemi kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda biyomimetik analizlerin başarımları verilmemiş gibi matematiksel denklemleri de belirtilmemektedir. Bu alanda literatür bilgileri irdelendiğinde, canlı organizmaların hareket ve davranışları robotik ve mekanik sistemlere aktarılırken kinematik ve videometri yöntemlerinin yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir ve geliştirilen sistemlerin gerçek sistemler ile arasındaki korelasyonun (başarımları) verilmemiş tespit edilmiştir.

Bu çalışmada biyomimetik analizlerinin Matlab ortamında matematiksel denklemleri çıkarılmış gerçek sistemde denenmiş ve başarımları hesaplanmıştır. Geliştirilen sistem ile eklem açıları, doğru konuma ulaşma becerileri ve hareket yapabilme yetenekleri analiz edilmiş olup hareketlerin gerçekleştirilmesi için gereken matematiksel denklemlerin nasıl çıkarılabileceği gösterilmiştir. Bunun için canlı organizmanın görüntüsü veri tabanına alındıktan sonra Kinovea ortamında kinematik bilgileri çıkartılmıştır. Çıkarılan bilgiler simülasyon sistemine aktararak doğru çözüm uzayı tespit edilmiştir. Daha sonra aynı kinematik bilgiler Matlab araçlarından biri olan Curve

Fitting aracı kullanılarak yürüyüş modellerinin açı denklemi bulunmuştur. Sonuç olarak, geliştirilen sistemden edinilen bilgiler formülize edilerek farklı canlı gruplarının hareket analizi, simülasyonu ve kontrolü için bir tasarım süreç modeli sunulmuştur.

Çalışma sırasında sistemin başarımlı oranını etkileyen bazı problemlerle karşılaşmıştır. Bunlardan biri piyasada hazır bulunan motor sürücülerin gerekli çözünürlükte olmamasıdır. Sistemde kullanılan motorların çalışma gerilim aralığı ve çektiği akımlardan dolayı sistem üzerinde gürültüye neden olarak kontrol sisteminin kararlı çalışmasını etkilemektedir. Çalışmada bu problem ile baş etmek için kontrol birimi ile motor sürücüler arasında optik izolasyon kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca sistemin konstrüksiyonu PLA malzemesi ile yapıldığından zamanla sistemin deformasyona uğramasına bağlı olarak sistemin rijitliği kaybolmaktadır. İlerleyen çalışmalarda sistemin daha iyi çalışması için yapılabilecek bazı iyileştirmeler aşağıda önerilmiştir:

- Sistemin motor sürücüsünün çözünürlüğü önemli olduğu için yüksek çözünürlüğe sahip motor sürücü devreleri tasarlanmalı veya kullanılmalıdır.
- Sisteminin daha rijit ve stabil olabilmesi ve hareket esnasında meydana gelen sürtünmelere bağlı olarak deformasyona uğramaması için konstrüksiyon malzemesi alüminyum gibi daha hafif bir malzemelerden seçilmelidir.
- Sistemin eklemlerinin daha ritmik hareket edebilmesi ve dengeli olabilmesi için yüksek torka sahip bir motor seçilmelidir.

Sonuç olarak geliştirilen sistem ister hipoterapi simülatörü isterse biyomimetik alanda canlıların davranışını incelemek ve analiz etmek amacıyla kullanılabilir. Sistemin daha fonksiyonel olabilmesi için çift yönlü servo motor veya step motorlar bu çalışmada kullanılan servo motor modeline alternatif olarak kullanılabilir. Böylece oluşabilecek hataların azalabileceği ve sistemin laboratuvar ortamında da kullanılabileceği ön görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abderrahim M, Whittaker A.R, 2000. Kinematic model identification of industrial manipulators, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, 1-8.
- Alerstam T, Gudmundsson, G A, Jönsson P E, Karlsson J, Lindström Å, 1990. Orientation, migration routes and flight behaviour of Knots, Turnstones and Brant Geese departing from Iceland in Spring, *JSTOR*, 201-214.
- Alp O E 2012, Genel Amaçlı Robot Kolu Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, İzmir.
- Armand S, Bonnefoy A, Sagawa Y, Turcot K, 2014, Analyse Du Mouvement Dans Un Contexte Clinique, *Manuel Pratique De Chirurgie Orthopédique*, 3-33.
- Asimov I, 2004, *I Robot*, 1, Bantam Spectra, 256p, New York
- Baniqued P D E, Dungao J R, Manguerra M V, Manguerra R G, Abad A C, Bugtai N T, 2018, Biomimetics in the Design of a Robotic Exoskeleton for Upper Limb Therapy, *AIP Conference Proceedings*, 1993, 040006.
- Bar-Cohen , 2005 *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies.*, CRC Press, 579p, New York
- Bar-Cohen Y, 2006, *Biomimetics—Using Nature To Inspire Human Innovation, Bioinspiration \& Biomimetics* , 1, 1-12.
- Barrett C R, 2018, Human Kinematic Responses to Riding on a Mechanical Horse Simulating Hippotherapy, *Baylor University, Ph.D. Thesis*, 141p, Texas.
- Başer Ö, Şekerci B, Kızıllan H, Kılıç E, 2018, İnsan Ve Alt Uzun Dış İskelet Robotun Matlab Simmechanics Ortamında Modellenmesi Ve Etkileşim Kuvvetlerinin Minimize Edilmesi Kontrol Çalışması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 365-374.
- Başer Ö, Şekerci B, Kızıllan H, Kılıç E, 2020, Sertliği Değiştirilebilir Bir Ayak Bileği Dış İskelet Robotun Çeşitli Kontrolcüler İle Pozisyon Takibi Kontrol Performansının Değerlendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35, 1551-1564.

- Ben-Ari M, Mondada F, 2018, Robots And Their Applications. In Elements Of Robotics, Elements of Robotics, 1-20.
- Bhushan B, 2009, Biomimetics: Lessons From Nature—An Overview, Philosophical Transactions Of The Royal Society, Physical And Engineering Sciences, 367, 1445-1486.
- Biswas S, Visell Y, 2019, Emerging Material Technologies For Haptics, Advanced Materials Technologies, 4, Article number 1900042.
- Bonabeau E, Theraulaz G, Deneubourg J L, Franks N R, Rafelsberger O, Joly J L, Blanco S, 1998, A model for the emergence of pillars, walls and royal chambers in termite nests, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 353, 1561-1576.
- Bouri M, Stauffer Y, Schmitt C, Allemand Y, Gnemmi S, Clavel R, vd., 2006, The WalkTrainer: A Robotic System for Walking Rehabilitation, 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 17-20, Kunming, 1616-1621.
- Bruno S, Lorenzo S, Luigi v, Giuseppe O, 2010, Robotics Modelling Planning and Control, Springer, 644p, Berlin.
- Chen D A, Ross B E, Klotz L E, 2015, Lessons From A Coral Reef: Biomimicry For Structural Engineers, Journal of Structural Engineering, 141, Article number 02514002.
- Choudhury A, Li H, Greene C, Perumalla S, 2018, Humanoid Robot-Application And Influence, arXiv preprint arXiv:1812.06090, 1-30.
- Çakıcı A, Kök M, 2020, Hayvan Destekli Tedavi, Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar, 12, 117—130.
- Çengelci B, Çimen H, 2005, Endüstriyel Robotlar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 69-78.
- Çırak B, 2014, İki Eklemlili Bir Scara Robot Manipülatörünün Hesaplanmış Tork Yöntemi İle Yörünge Kontrolü, Erzincan University Journal of Science and Technology, 7, 77-91.

- Çoban O, 2019, İnmeli Hastalarda Mekanik Hippoterapi Cihazı İle Yapılan Egzersizin Postural Kontrol Ve Denge Üzerine Etkisi, İstanbul Medipol Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, 95s, İstanbul.
- Emerson A E, 1938, Termite Nests--A Study Of The Phylogeny Of Behavior, Ecological Monographs, 8, 247-284.
- Everett H R, 1995, Sensors for Mobile Robots, CRC Press, 542p, Ney work
- Fankhauser P, Bloesch M, Krüsi P, Diethelm R, Wermelinger M, Schneider T, vd., 2016, Collaborative navigation for flying and walking robots, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2859-2866, Daejeon Korea.
- Gelen G, Özcan S, 2019, İnsan-Robot Etkileşiminin Biyomimetik Yaklaşımla Sağlanması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25, 188-198.
- Guzmán-Valdivia C H, Blanco-Ortega A, Oliver-Salazar M Y, Carrera-Escobedo J L, 2013, Therapeutic Motion Analysis Of Lower Limbs Using Kinovea, International Journal Of Soft Computing And Engineering, 3, 2231-307.
- Gül M, 2021, Simulink Üzerinden Medikal Yardımcı Açık Kaynak Robot Kolun İleri ve Ters Kinematik Analizinin Simülasyonu, EMO Bilimsel Dergi, 11, 93-99.
- Gürgüze G, Türkoğlu İ, 2019, Robot Sistemlerinde Kullanılan Algoritmalar, Türk Doğa ve Fen Dergisi, 8, 17-31.
- Güzel M S, 2008, Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsel Karakteristliğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Ankara
- Hisham N A H, Nazri A. F. A, Madete J Herawati L Mahmud J, 2017, Measuring ankle angle and analysis of walking gait using kinovea, International Medical Device and Technology Conference 2017, September 6-7, Johor.
- Hu J, Bhowmick P, Jang I; Arvin, F; Lanzon A, A Decentralized Cluster Formation Containment Framework for Multirobot Systems, IEEE Transactions on Robotics, 37,1936-1955.
- Hu J, Turgut A E, Lennox B, Arvin F, 2021, Robust Formation Coordination Of Robot

- Swarms With Nonlinear Dynamics And Unknown Disturbances: Design And Experiments, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 69, 114-118.
- Hwang J, Jeong Y, Park J. M, Lee K H, Hong J W, Choi J, 2015, Biomimetics: Forecasting The Future Of Science Engineering and Medicine, International journal of nanomedicine, 10, Article number 26388692.
- Jones J L, Flynn A M, Seiger B A, 1993, Mobile Robots-Inspiration to Implementation, CRC Press, 242p, New York.
- Kapoor S, Arora P, Kapoor V, Jayachandran M, Tiwari M, 2014, Haptics Touchfeedback Technology Widening the Horizon of Medicine, Journal of Clinical & Diagnostic Research, 8, 294-299.
- Kim H, Her J G, Ko J, 2014, Effect Of Horseback Riding Simulation Machine Training On Trunk Balance And Gait Of Chronic Stroke Patients, Journal Of Physical Therapy Science, 26, 29-32.
- Koca, T T, Ataseven H, 2015, What Is Hippotherapy? The Indications And Effectiveness Of Hippotherapy, Northern Clinics Of Istanbul, 2, 247.
- Kucuck S, Bingul Z, 2005, The Inverse Kinematics Solutions Of Fundamental Robot Manipulators With Offset Wrist, IEEE International Conference on Mechatronics, 2005, July 10-12, Taipei-Taiwan, 197-202.
- Küçük S, Bingül Z, 2004, Robot Sistemlerinde Kinematik Yöntemlerin Karşılaştırılması, Politeknik Dergisi, 7, 107-117.
- López-Cajún C S, Jáuregui-Correa J C, González-Cruz C A, Rodríguez M, 2015, Mechanical Reproduction of the Horse Movement from a Hippotherapy Cycle, Springer, 371-380.
- Mata F, Torres-Ruiz M, Zagal-Flores R, Moreno-Ibarra M, 2020, Virtual reality and sensors for the next generation medical systems, Miltiadis D. Lytras - Akila Sarirete, Innovation in Health Informatics (279-303), Academic Press, 25p, Massachusetts.
- Mazumder S, Biswas G. R, Majee S. B, 2020, Applications Of Nanorobots In Medical

- Techniques, IJPSR, 11, 3150.
- Mirzaali M J, Mussi V, Vena P, Libonati F, Vergani L, Strano M, 2017, Mimicking The Loading Adaptation Of Bone Microstructure With Aluminum Foams, Materials & Design, 126, 207-218.
- Moubarak P M, Ben-Tzvi P, 2011, Adaptive Manipulation Of A Hybrid Mechanism Mobile Robot, In 2011 IEEE International Symposium On Robotic And Sensors Environments (ROSE), Septembre 17-18, Quebec, 113-118.
- Nasyuha H, Ismail L H, As'ari M A, Zakaria N A, Mahmood N H, 2017, Evaluation Of Kinect Sensor In Mechanical Horse Simulator For Equine-Assisted Therapy, Journal Of Telecommunication, Electronic And Computer Engineering (JTEC), 9, 59-63.
- Noirot C, Darlington J P, 2000, Termite Nests: Architecture, Regulation And Defence. Termites: Evolution Sociality Symbioses Ecology, 121-139.
- Ogilvie M A, 2010, Wild Geese, A&C Black, 353p, London.
- Park J H, Shurtleff T, Engsberg J, Rafferty S, You J Y, You I Y, vd., 2014, Comparison Between The Robo-Horse And Real Horse Movements For Hippotherapy, Bio-medical materials and engineering, 24, 2603-2610.
- Piggott L, Wagner S, Ziat M, 2016, Haptic Neurorehabilitation And Virtual Reality For Upper Limb Paralysis, Critical Reviews in Biomedical Engineering, 44, 1-32
- Pinzon D, Byrns S, Zheng B, 2016, Prevailing Trends In Haptic Feedback Simulation For Minimally Invasive Surgery, Surgical Innovation, 23, 415-421.
- Priplata A A, Niemi J B, Harry J D, Lipsitz L A, Collins J J, 2003, Vibrating Insoles And Balance Control In Elderly People, The Lancet, 362, 1123-1124.
- Rashid F, 2017, Use of VR Technology And Passive Haptics For MANPADS Training System, AD1046913, 123p.
- Robles-De-La-Torre, G, 2008, Principles Of Haptic Perception In Virtual Environments, Isfh. org, 363-379.
- Rodrigues P G, de Oliveira K, Alves S. D. S. V, Fidêncio C F, de Oliveira C. G, Fontes, L N, vd., 2021, Muscle And Biomechanical Response Time In Patrol Horses

Submitted To Functional Training, Research Society and Development, 10,2525-3409.

Rozo L, Silverio J, Calinon S, Caldwell D G, 2016, Learning Controllers For Reactive And Proactive Behaviors İn Human–Robot Collaboration, Frontiers in Robotics and AI, 3, 30.

Serbest K, 2012, İnsan Vücudunun Farklı Durumlardaki Hareketinin Dinamik Modellenmesi Ve Simülasyonu, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110s, Sakarya.

Sharma N, Uppal S, Gupta S, Patiala V B P R D, Panipat S D, 2011, Technology based on touch: Haptics technology, IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management, 12, 2230-7893.

Soto F, Wang J, Ahmed R, Demirci U, 2020, Medical Micro/Nanorobots İn Precision Medicine, Advanced Science, 7, 2002203.

Top N, Başak H, Şahin İ, 2021, Biyomimetik Tabanlı Fonksiyonel Yürüteç Tasarımı ve Dijital İnsan Modelleme İle Ergonomik Analizi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 618-634.

Torres-Pérez Y, Gómez-Pachón E Y, Cuenca-Jiménez F, 2016, Horse's Gait Motion Analysis System Based On Videometry, Ciencia y Agricultura, 13, 83-94.

Tovar N, Witek L, Atria P, Sobieraj M, Bowers M, Lopez C D, Coelho P G, 2018, Form And Functional Repair Of Long Bone Using 3D-Printed Bioactive Scaffolds, Journal Of Tissue Engineering And Regenerative Medicine, 12, 1986-1999.

Towers A, Field J, Stokes C, Maddock S, Martin N, 2019, A Scoping Review Of The Use And Application Of Virtual Reality İn Pre-Clinical Dental Education, British dental journal,226,358-366.

Trusaji W, Satriawan A, Rahadini S S, Hasanuddin M O, Setianingsih G, Pratomo N, vd., 2022, Horse Riding Simulator Design To Replicate Human Walking Gait for Hippotherapy in Cerebral Palsy Rehabilitation, Machines, 10, 1060.

Turner J S, Soar R C, 2008, Beyond Biomimicry: What Termites Can Tell Us About Realizing The Living Building, First International Conference On Industrialized,

- Intelligent Construction At Loughborough University, May 2008, Nottinghamshire, 1-18.
- Uzunçayır D, İlhan L, 2021, Hippoterapi Ve Özel Gereksinimli Çocuklar: Ebeveyn Görüşleri Doğrultusunda Nitel Bir Araştırma, SPORMETRE Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi, 19, 32-50.
- Ünver B, 2005, Artık Robot Kollarının Ters Kinematik Problemlerinin Çözümü Ve Gerçeklenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 123s, İstanbul.
- Wang B, Zhang Y, Zhang L, 2018, Recent progress on micro-and nano-robots: Towards in vivo tracking and localization, Quantitative imaging in medicine and surgery, 8, 461-479.
- Wnag B, Yabin Z, Zhang L, 2018, Recent Progress On Micro- And Nano-Robots: Towards In Vivo Tracking And Localization, Quantitative Imaging In Medicine And Surgery, 8, 461-479.
- Yuan Y, Yu X, Yang X, Xiao Y, Xiang B, Wang Y, 2017, Bionic Building Energy Efficiency And Bionic Green Architecture, Renewable And Sustainable Energy Reviews, 74, 771-787.
- Yücel Şen A D, Çarman K B, Yazar C, Yıldırım C, Bilge U, 2023, Hippoterapinin Serebral Palsili Çocuklarda Denge ve Motor, Osmangazi Tıp Dergisi, 45, 58-63.
- Zhang X, Kong X, Liu G, Wang Y, 2010, Research On The Walking Gait Coordinations Of The Lower Limb Rehabilitation Robot, 2010 IEEE International Conference On Robotics And Biomimetics, Decembre 14-18, Tianjin, 1233-1237.
- Zhou H, Guo J, Li P, Fan T, Zhang D, Ye J, 2013, Leaf-Architected 3D Hierarchical Artificial Photosynthetic System Of Perovskite Titanates Towards CO₂ Photoreduction Into Hydrocarbon Fuels, Scientific Reports, 3, Article number 1667.
- Ziegler J, Gattringer H, Reiter A, H"ormandinger P, Müller A, Mitterhumer M, 2018, Generation Of Realistic Saddle Trajectories From Captured Horseback Motion, Multibody System Dynamics, 52, 117-133.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.sci-sport.com/en/theory/chapter-1-history-and-rise-of-biomechanics.php>, 03.06.2023
- 2- <https://vipsvet.net/topics/biomechanics-of-normal-equine-gait/?print=pdf>, 03.06.2023
- 3- <https://fr.scribd.com/document/535473196/6-2-4-Robotik-Roboti%C4%9Fin-Temeli-Ve-Robotlar%C4%B1n-Gelece%C4%9Fi>, 03.06.2023
- 4- <https://biomimetismetpemaimo.wordpress.com/le-transport/>, 03.06.2023
- 5- <https://militaryembedded.com/unmanned/sensors/biomimicry-for-defense-aims-for-agility-small-size>, 03.06.2023
- 6- <https://www.edimark.fr/courrier-transplantation/ingenierie-tissulaire-biomimetique-cardiopatches-bioprotheses-soutien-ventriculaire>, 03.06.2023
- 7- <https://www.bioxegy.com/post/biomim%C3%A9tisme-et-sant%C3%A9>, 03.06.2023
- 8- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Anatomi>, 03.06.2023
- 9- <https://www.horseandhound.co.uk/blog/nina-johnsons-therapy-blog-565127>, 03.06.2023
- 10- <https://www.horsesandus.com/the-4-basic-horse-gaits-explained/>, 03.06.2023
- 11- <https://www.bilgeyik.com/atlarin-yuruyus-cesitleri-432>, 03.06.2023
- 12- <https://eps.ac-besancon.fr/wp-content/uploads/sites/36/2016/07/Kinovea-2014.pdf>, 03.06.2023
- 13- http://www.robotiksistem.com/arduino_nano_ozellikleri.html, 03.06.2023
- 14- <https://www.es.co.th/schemetic/pdf/et-servo-s3003.pdf>, 03.06.2023
- 15- http://meslek.eba.gov.tr/upload/dk10/Bilgisayarda_Kati_Modelleme_10_29_30.pdf, 03.06.2023
- 16- <https://listoffreeware.com/best-free-motion-analysis-software-windows/>, 03.06.2023
- 17- https://hilmi.kulubevet.com/ders_notlari/robotik/Temel%20Robotik2.pdf, 03.06.2023

EKLER

EK 1. Normal yürüyüş için Denklem 4.9'daki fonksiyonun katsayıları

Değişkenler	Ön_Bacak_ Alt_Eklem	Ön_Bacak_ Üst_Eklem	Arka_Bacak_ _Alt_Eklem	Arka_Bacak_ _Üst_Eklem
a1	194.5	123.8	106.4	137.4
b1	0.001573	0.001476	0.001519	0.001436
c1	0.3063	0.3325	-0.08271	0.3377
a2	128.6	51.69	38	42.9
b2	0.002633	0.003202	0.003036	0.002845
c2	2.662	2.336	1.035	2.808
a3	22.17	14.6	18.99	2.725
b3	0.005866	0.00608	0.005221	0.008388
c3	2.714	3.117	2.051	2.045
a4	5.231	5.179	5.975	36.1
b4	0.009312	0.009407	0.009984	0.01301
c4	2.388	3.031	0.9909	2.191
a5	26.41	162.9	2.441	34.86
b5	0.0154	0.01291	0.014	0.01311
c5	-1.747	3.541	1.318	5.253
a6	26.16	162	1.017	0.1097
b6	0.01565	0.01292	0.01806	0.01974
c6	1.115	6.685	0.7839	4.691

EK 2. Tırıs yürüyüş için Denklem 4.9'daki fonksiyonun katsayıları

Değişkenler	Ön_Bacak_ Alt_Eklem	Ön_Bacak_ Üst_Eklem	Arka_Bacak_ Alt_Eklem	Arka_Bacak_ Üst_Eklem
a1	134.9	118.7	187.3	218.2
b1	0.001342	0.0008793	0.001436	0.001539
c1	0.2329	0.1559	1.257	0.3639
a2	35.96	65.26	149.9	147.7
b2	0.002991	0.002464	0.002596	0.002458
c2	0.8577	1.408	3.773	2.851
a3	17.44	9.28	124.7	11.52
b3	0.006706	0.007306	0.009234	0.006018
c3	1.731	2.723	4.646	2.194
a4	4.646	3.026	25.06	1.961
b4	0.009324	0.0132	0.006093	0.0134
c4	3.108	4.544	4.13	0.797
a5	10.85	-4.09	118.2	0.2969
b5	0.01666	0.01211	0.009466	0.01794
c5	0.3888	-0.2367	7.653	-1.221
a6	8.973	-0.7331	0.8966	-1.026
b6	0.01677	-0.7331	0.02089	0.02244
c6	3.248	1.212	0.9502	-0.2274