

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HARİCİ FİKSATÖR UYGULAMALI KIRIK KEMİKLERİN TEDAVİSİNDE
OTOMATİK REDÜKSİYON YAPABİLEN MEDİKAL ROBOTUN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Yük. Müh. İdris SANCAKTAR

**NİSAN 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kırık kemiklerin tedavisinde harici fiksator kullanıldığı durumlarda, kemiklerin olması gereken yere getirilme işlemi elle yapılmaktadır. Bu işlem bazen oldukça güç olmakla beraber bazen de istenildiği kadar düzgün olmamaktadır. Ayrıca operasyon sırasında çok sayıda röntgen görüntüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Buradaki ihtiyaç üzerine, kemiklerin redüksiyonunu hem manuel hem de otomatik olarak yapabilen bir robot geliştirilmiştir. Otomatik redüksiyon için görüntü işleme ve yapay zekâ algoritmaları kullanılmıştır. Robot sayesinde kırık kemiklerin redüksiyonu hem daha kolay hem de daha hızlı ve doğru yapılabilmektedir. İhtiyaç duyulan röntgen görüntüsü sayısı da oldukça azaltılmıştır. Üstelik redüksiyon işlemi sırasında hasta ile aynı ortamda bulunmak gerekmediğinden dolayı, sağlık personeli hiç radyasyona maruz kalmamaktadır.

Bilgi ve deneyimleri ile beni destekleyen, yardımını esirgemeyen, danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ'a, üniversitemizden ayrılmadan önce danışmanım olan Sayın Prof. Dr. Rıfat YAZICI'ya, değerli görüş ve önerileriyle çalışmalarına katkıda bulunan değerli jüri üyelerine, mekanik kısımların tasarımını ve imalatını yapan Makine Mühendisi Hakan KAHVECİOĞLU'na, tıbbi alanlarda yol gösteren Ortopedi Uzmanı Op.Dr. Burak TUNA'ya, çalışmalarım boyunca ihmal ettiğim eşim ve çocuklarım ile kardeşlerime

Teşekkür ederim.

Bu çalışmayı ahirete intikal etmiş olan anne ve babama atfederim.

İdris SANCAKTAR

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Harici Fiksator Uygulamalı Kırık Kemiklerin Tedavisinde Görüntü İşlemeye Dayalı ve Yapay Zekâ Kontrollü Otomatik Redüksiyon Yapabilen Medikal Robotun Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/04/2018

İdris SANCAKTAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Medikal Robotlar.....	2
1.3. Kırıklarda Harici Fiksator Kullanımı	3
1.4. C-Kollu Röntgen Cihazı	5
1.5. Sensörler (Algılayıcılar).....	6
1.5.1. Konum Algılayıcı (Encoder).....	6
1.5.2. Yük Hücresi (Loadcell).....	7
1.6. Robot Hareketi İçin Kullanılan Elektrik Motorları	8
1.6.1. DC Motorlar	8
1.6.2. Servo Motorlar	8
1.6.3. Adım Motorları.....	9
1.6.4. Redüktörler.....	10
1.7. OpenCV.....	10
1.8. Epipolar Geometri	11
1.9. Kamera Kalibrasyonu.....	13
1.9.1. Kameradan Kaynaklanan Bozukluklar.....	13
1.9.2. Kameranın İç (Intrinsics) Parametreleri.....	14
1.9.3. Kameranın Dış (Extrinsic) Parametreleri	15
1.9.4. Homojen Koordinat Sistemi.....	15
1.9.5. Projeksiyon Matrisi	16
1.9.6. Üç Boyutlu (3D) Geri Çatma	19
1.10. Robotlarda İleri ve Ters Kinematik.....	22

1.10.1.	Robotlarda İleri Kinematik.....	22
1.10.2.	Denavit-Hartenberg Yöntemi	23
1.10.3.	Robotlarda Ters Kinematik	24
1.11.	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	26
1.12.	Literatür Özeti	27
1.12.1.	Kırık Kemik Tedavisinde Robotlar	27
1.12.2.	Medikalde 2D-3D Dönüşümü	33
1.12.3.	Robotlar İçin Yol Planlama.....	34
1.12.4.	PSO Algoritması.....	35
1.13.	Tezin Amacı	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	38
2.1.	Robot Mekanizması.....	39
2.1.1.	Doğrusal Hareket Mekanizması	41
2.1.2.	Döner Hareket Mekanizması.....	42
2.2.	Elektronik Kontrol.....	44
2.2.1.	Ana Devre.....	44
2.2.2.	Motorlar ve Redüktörler	47
2.2.3.	Encoder ile Konum Tespiti.....	48
2.2.4.	Yük Hücreleri (Loadcell) ile Kuvvet Kontrolü	49
2.2.5.	Uzaktan Kumanda Ünitesi.....	51
2.2.6.	Gömülü Yazılımlar.....	52
2.2.6.1.	Ana Kontrol Devresi Merkezi Mikrodenetleyici Yazılımı.....	52
2.2.6.2.	Adım Motorlarını Kontrol Eden Gömülü Yazılımlar.....	54
2.2.6.3.	Uzaktan Kumanda Ünitesi Gömülü Yazılımı	54
2.2.7.	Bilgisayar ile Bağlantı	56
2.3.	İki Adet 2D Görüntüden 3D Koordinat Bulma	56
2.4.	Kırık Kemiklerin 3D Koordinatlarının Bulunması	64
2.5.	Kemik Koordinatlarının Robot Koordinatlarına Uyarlanması.....	66
2.6.	OpenGL Üzerinden Modelin Gösterimi.....	68
2.7.	Robot Uç İşlevçisinin Konumunu Bulma (İleri Kinematik)	70
2.8.	Yük Hücrelerinden Gelen Verilerin İşlenmesi	73
2.9.	Kırık Kemiklerin Uzaktan Kumanda ile Redüksiyonu	74
2.10.	Kırık Kemiklerin Otomatik Redüksiyonu	75

2.11.	Redüksiyon İçin Yol Tasarımı	77
2.11.1.	Kemikleri Paralel Duruma Getirme	79
2.11.2.	Kemikler Arasındaki Mesafeyi Ayarlama.....	83
2.11.3.	Kemikleri Aynı Doğru Üzerine Getirme.....	87
2.11.4.	Kemikleri Karşılıklı Denk Getirme.....	88
2.11.5.	Kemikleri Birleştirme.....	89
2.12.	Robotta Ters Kinematik	90
2.12.1.	PSO ile Ters Kinematik.....	90
2.12.2.	Yeni Sürü ve Yeni Başlangıç ile PSO Algoritması.....	91
2.12.3.	PSO Algoritması İçin Maliyet Tanımları	92
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	94
3.1.	Elektronik Kontrol Devresi	94
3.2.	Uzaktan Kontrol Ünitesi.....	94
3.3.	İki Boyuttan Üç Boyuta Geçerken	95
3.4.	Kemikler Üzerindeki İşaretlemeleler	95
3.5.	Kemikleri Konumlandırma.....	95
3.6.	Robotun Redüksiyon Adımları.....	96
3.6.1.	Robotun 1. Adımı Uygulaması.....	98
3.6.2.	Robotun 2. Adımı Uygulanması.....	101
3.6.3.	Robotun 3. Adımı Uygulanması.....	103
3.6.4.	Robotun 4. Adımı Uygulanması.....	104
3.6.5.	Robotun 5. Adımı Uygulanması.....	106
3.6.6.	Tasarlanan Yolun İrdelemesi.....	108
3.7.	Önerilen PSO Algoritmasının Kıyaslanması.....	108
3.8.	Kumanda ile Redüksiyon	109
3.9.	Hayvan Deneyi Uygulaması.....	110
4.	SONUÇLAR	111
5.	ÖNERİLER	115
6.	KAYNAKLAR.....	118
7.	EKLER	128
Ek 1.	Hayvan Deneyi Raporu	128
Ek 2.	İncelemeli Patent	130
Ek 3:	Marka Tescil Belgesi.....	131

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

HARİCİ FİKSATÖR UYGULAMALI KIRIK KEMİKLERİN TEDAVİSİNDE
OTOMATİK REDÜKSİYON YAPABİLEN MEDİKAL ROBOTUN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

İdris SANCAKTAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ
2018, 127 Sayfa, 4 Sayfa Ek

Bu tezde, harici fiksatör kullanılan kırık kemiklerin tedavilerinde, kemiklerin hizalanması (redüksiyon) için medikal bir robot tasarlanmış ve prototipi imal edilmiştir. Medikal standartlara uygun elektronik devreler, güvenilir gömülü yazılımlar, kablolu uzaktan kumanda ünitesi yapılmış ve robota ait ters kinematik problemini Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile çözen bilgisayar yazılımı gerçekleştirilmiştir. Altı serbestlik derecesine sahip robot, otomatik redüksiyon yapabilmesine rağmen hekim kemikleri manuel olarak hizalamak için interaktif kullanıcı dostu grafik ara yüzü ile veya kablolu uzaktan kumanda üzerindeki butonlarla robotun hareketlerini kontrol edebilir.

Değiştirilmiş PSO metodu ile ters kinematik problemi çözülür ve hekime onaylaması için bir yol önerilir. Robottan veya hekimden kaynaklanan hata sonucu robotun uyguladığı kuvvet herhangi bir yönde tanımlanan eşiği aşarsa, hastaya yanlışlıkla zarar verilmemesi için bilgisayar yazılımı ilgili motorların hareketlerini durdurur.

Sonuçta, harici fiksatör kullanılan kırık kemiklerin tedavisinde kemiklerin hizalanması işlemini otomatik veya hekimin kontrolündeki kablolu uzaktan kumanda ünitesi aracılığıyla, elle yapılandan daha hassas ve hızlı bir şekilde yapan, zararlı X ışınlarını minimize eden medikal bir robot gerçekleştirilmiş ve detayları bu tezde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ortopedik redüksiyon robotu, Biyolojiden esinlenmiş algoritma (PSO), 3D Koordinat bulma, Ters kinematik, Robotta yol planlama

PhD. Thesis

SUMMARY

IMPLEMENTATION OF A MEDICAL ROBOT TO REDUCE FRACTURED BONES
AUTOMATICALLY FOR TREATMENT WITH EXTERNAL FIXATORS

İdris SANCAKTAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ
2018, 127 Pages, 4 Pages Appendix

This thesis explains the design and implementation of a medical robot prototype to align before fixing broken bone parts with external fixators for treatment. The design covers medical standards compliant electronic circuits, reliable embedded software and communication among robot, wired remote control unit and the computer which runs image processing algorithm and solves inverse kinematic problem by Particle Swarm Optimization (PSO) methods. The robot has six degrees of freedom (DOF). Even though the robot can perform automatic alignment, an orthopedist can also control the movements of the robot by push buttons mounted on the wired remote control unit or by a user-friendly interactive GUI to align bones manually. An adapted PSO method solves inverse kinematic problem and suggests orthopedist a planned trajectory for approval. The computer stops corresponding motors even if a single force in any direction exceeds user defined thresholds not to injure patient by mistake because of robot fault or orthopedist malpractice.

In summary, the medical robot detailed in this thesis aligns broken bone parts before fixing them by external fixators more precisely and faster either in automatic mode or under supervision of an orthopedist with a wired remote control unit minimizing hazardous X ray exposure during surgery.

Key Words: Orthopedic reduction robot, Bio-inspired algorithm (PSO), 3D coordinate transformation, Inverse Kinematics, Path planning in Robotics

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Robot ile kemik taşlama deney platformu [6].	3
Şekil 1.2.	Harici fiksator tedavisinin uygulandığı bir görüntü [13]. (a) Normal klinik uygulama (b) Ölçme sistemi ile uygulama	4
Şekil 1.3.	Siemens firmasına ait C-Kollu röntgen cihazı [14].	5
Şekil 1.4.	Epipolar geometri gösterimi a) Epipolar düzlem b) Epipolar noktalar	12
Şekil 1.5.	Radyal bozulmaların olduğu satranç tahtasına ait bir görüntü [27].	14
Şekil 1.6.	İğne deliği kamera modeli [28].	17
Şekil 1.7.	2D nokta (artı ile gösterilen), noktaların bir çizgisine karşılık gelir. (kesikli çizgi) 3D; Bu çizgideki herhangi bir nokta aynı noktaya gidecektir.	19
Şekil 1.8.	İki kamera ile elde edilen resimlerdeki aynı noktaya ait doğrularının kesişimi	19
Şekil 1.9.	Denavit-Hartenberg yöntemi eklem gösterimi	24
Şekil 1.10.	PSO Algoritmasının genel akış diyagramı	27
Şekil 1.11.	Konumlandırma cihazı üzerine monte edilmiş Acrobot robotu [54].	28
Şekil 1.12.	Graham ve arkadaşlarının robotik uygulaması [56].	29
Şekil 1.13.	Ruihua Ye ve arkadaşlarının robot konfigürasyonu [58]	30
Şekil 1.14.	Paralel manipülatörlü robot [59].	30
Şekil 1.15.	Uzaktan kumandalı redüksiyon yapabilen robota ait bir görüntü [60]	31
Şekil 1.16.	Dagnino ve arkadaşlarının çalıştıkları robota ait (a) Robotun şematik gösterimi (b) Laboratuvarında navigasyon sistemi ile entegrasyon görüntüsü	32
Şekil 1.17.	Sağlam hasta üzerinde deneme [64].	32
Şekil 1.18.	Robot destekli kırık redüksiyon sistemi [65].	33
Şekil 2.1.	Robotun katı model görüntüsü: (a) Dış görünümü, (b) İç görünümü	38
Şekil 2.2.	Robotun genel mekanik gösterimi	39
Şekil 2.3.	Robotun model kemiğe olan bağlantısının üstten ve önden görünümü: (a) Üstten görünüm, (b) Önden görünüm	40
Şekil 2.4.	Robot bağlantısının manken hastaya uygulanması	41
Şekil 2.5.	Robotun doğrusal hareket mekanizmasından bir görünüm	42
Şekil 2.6.	Kardan mekanizması ve istavroz	43
Şekil 2.7.	Robotun dönme hareketi yapan uzvu	43
Şekil 2.8.	Elektronik devreye ait basit prensip şema	45
Şekil 2.9.	Elektronik kontrol devresi	46
Şekil 2.10.	Loadcell için alçak geçiren filtre	51

Şekil 2.11. Uzaktan kumanda ünitesinin dış görüntüsü.....	52
Şekil 2.12. Kırık kemiklerin sol tarafından çekilen görüntüsü.	56
Şekil 2.13. Kırık kemiklerin sağ tarafından çekilen görüntüsü.	57
Şekil 2.14. Sol taraftan alınan görüntüde tespit edilen köşeler.....	58
Şekil 2.15. Sağ taraftan alınan görüntüde tespit edilen köşeler	58
Şekil 2.16. Eksen yönleri ve satranç tahtasında köşelerin numaralandırılması	59
Şekil 2.17. Sol taraftan alınan görüntüde işaretlenen nokta.....	61
Şekil 2.18. Sağ taraftan alınan görüntüde işaretlenen nokta	62
Şekil 2.19. Kemikler üzerinde işaretlenmesi gereken noktalar.....	64
Şekil 2.20. Hareketli ve sabit kemik üzerindeki hedef noktalar	65
Şekil 2.21. Robota ait referans noktası	66
Şekil 2.22. Eksen yönleri: kırmızı satranç tahtası, sarı robot.....	67
Şekil 2.23. Kırık kemikler ve OpenGL'deki grafikleri. a: Kemiklerin fotoğrafı, b:OpenGL'de önden görünüm, c:OpenGL'de üstten görünüm.....	69
Şekil 2.24. OpenGL'de robot manipülatöründeki kuvvetlerin gösterimi. a:pozitif yönde uygulanmış kuvvetler, b:negatif yönde uygulanmış kuvvetler	70
Şekil 2.25. Kemikler üzerinde işaretlenmiş noktalar	76
Şekil 2.26. Otomatik redüksiyonun adımları	78
Şekil 2.27. Değiştirilmiş PSO akış şeması.....	92
Şekil 3.1. Kırık kemikler ve üzerindeki işaretlemeler	96
Şekil 3.2. Kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b: önden.....	98
Şekil 3.3. Birinci adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a:üstten, b:önden ...	101
Şekil 3.4. İkinci adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b:önden ...	103
Şekil 3.5. Üçüncü adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b:önden.	104
Şekil 3.6. Dördüncü adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a:üstten, b:önden	105
Şekil 3.7. Beşinci adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b:önden .	107
Şekil 3.8. Redüksiyonu yapılmış kemikler	107

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kullanılan adım motorlarının bazı teknik özellikleri.....	47
Tablo 2.2. Uygulamada kullanılan satranç tahtasının özellikleri.....	57
Tablo 2.3. Seçilen noktanın gerçek ve hesaplanan değerleri	63
Tablo 3.1. Görüntülerden elde edilen noktalar ve koordinatları	97
Tablo 3.2. Koordinatların okunduğu sırada enkoder değerleri	97
Tablo 3.3. Hareketli kemik üzerindeki noktaların kardan mekanizmasına olan uzaklıkları (manipülator)	97
Tablo 3.4. İşlem yapılan noktalar ve koordinatları	99
Tablo 3.5. Şimdiki ve 1. adım sonunda olması gereken koordinatlar.....	100
Tablo 3.6. Birinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü.....	100
Tablo 3.7. Birinci adım sonunda PSO ile bulunan çözümün robottaki sonucu	100
Tablo 3.8. İşlem yapılan noktalar ve koordinatlarının güncellenmiş hali.....	102
Tablo 3.9. Şimdiki ve 2. adım sonunda olması gereken koordinatlar.....	102
Tablo 3.10. İkinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü	102
Tablo 3.11. Şimdiki ve 3. adım sonunda olması gereken koordinatlar.....	103
Tablo 3.12. Üçüncü adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü	104
Tablo 3.13. Şimdiki ve 4. adım sonunda olması gereken koordinatlar.....	105
Tablo 3.14. Dördüncü adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü.....	105
Tablo 3.15. Şimdiki ve 5. adım sonunda olması gereken koordinatlar	106
Tablo 3.16. Beşinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü	106
Tablo 3.17. İki hedef noktanın koordinatları ve üç eksendeki farkları.....	107
Tablo 3.18. Klasik ve önerilen PSO algoritmalarının kıyaslanması.....	109

SEMBOLLER DİZİNİ

2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
AC	: Alternatif Akım
ADC	: Analog Dijital Dönüştürücü
c1, c2	: PSO Algoritmasında hızlanma (ölçeklendirme, öğrenme) faktörleri
CCW	: Saatin yönün tersi
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
CW	: Saat yönü
c_x, c_y	: Kamera merkezi
d	: Uzaklık
d1, d2	: Doğru denklemi
DC	: Doğru Akım
DOF	: Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
F	: Temel (Fundamental) matris
f_x, f_y	: Odak merkezi
GA	: Genetik Algoritmalar
gbest	: Global best (tüm parçacıkların en iyisi)
I	: Birim matris
IP	: İnternet Protokolü
kN	: Kilo Newton
M_{AB}	: A ile B noktalarının ortası
M_{CD}	: C ile D noktalarının ortası
MR	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
N	: Newton
Nm	: Newton metre
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
pbest	: Particle best (parçacığın en iyisi)
P	: Projeksiyon matrisi
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
R	: Döndürme matrisi

sincos	: sinüs veya kosinüs
SVD	: Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition)
T	: Dönüşüm matrisi
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol
u1, u2	: Doğrultu vektörü
USB	: Evrensel Seri Veri Yolu
v	: Hız
w	: Atalet momenti



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilgisayar donanım ve yazılımı gün geçtikçe gelişmekte ve insan hayatında daha da fazla yer almaktadır. Günümüzde tüm alanlarda, hatta günlük basit işlerde bile bilgisayar oldukça alışılmış hale gelmiştir. İnsan makine etkileşimi oldukça yaygınlaşmış ve bilgisayarlar insan hayatının artık bir parçası olmuştur. Yapay zekâ algoritmalarının gelişmesiyle de, birçok alanda bilgisayarların becerisi artık vazgeçilmezdir.

Tarihteki ilk uygulamaları sadece mekanik olan robotlar, elektronik ve yazılımın gelişmesiyle çok becerikli hale gelmişlerdir. Geliştirilen elektrik motorları ve redüktörler, robotların hareket kabiliyetlerini oldukça arttırmışlardır; servo motorlar, adım motorları ve DC motorlar bu alanda oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Encoderlerin gelişimi ile de çok hassas ölçümlerin yapılabilmesini sağlamıştır ve böylece robotların hareketleri mikron düzeylerde ölçülebilmektedir. Gelişen mikroişlemciler ve gömülü yazılımlar sayesinde, robot kontrol devreleri küçük alanlarda oldukça büyük yeteneklere sahip olmuşlardır.

Gelişen hareket kabiliyetleri, hassasiyetleri ve yapay zekâlarıyla robotlar, medikal alanlarda da kendilerine ciddi anlamda yer bulmuşlardır. İnsan etkileşimli robotlar göz ameliyatlarından endoskopiye, ortopedi ameliyatlarından yapay uzuvlara kadar çok geniş alanlarda kullanılmaktadırlar.

Kırık kemiklerin tedavisi için gerekli olan, kırık uçların hizalanması (redüksiyon) da bu alanlardan birisidir. Tedavi için kullanılan yöntem farklılıklarına göre, farklı özelliklere sahip robotlar geliştirilmiştir ve halen geliştirilmeye devam edilmektedir. Kırıkların tedavisinde uygulanan yöntemlerden birisi de harici fiksator uygulamalarıdır ve burada da redüksiyon işlemi gerekmektedir. Fakat harici fiksator uygulamalarında robot destekli redüksiyon çok çalışılmış bir alan olmamakla beraber, nadir olsa da bu amaç için yapılmış robotik kontroller mevcuttur.

Kemiklerin redüksiyonu için üç boyutlu ortamda çalışmak gerekmektedir. Fakat kemikleri görüntüleme yöntemlerinin hepsi üç boyutlu modellemeye imkân vermemektedir. Ortopedi de en yaygın kullanılanlardan olan C-kollu röntgen cihazı, iki boyutlu görüntüler üretmektedir. Bu durumda iki boyutlu resimlerden yola çıkarak, üç

boyutlu modelleme işlemi yapılması gerekir. İki boyuttan üç boyuta geçiş için epipolar geometri oldukça yaygın kullanılan bir çözüm yöntemidir.

Üç boyutlu modelleme yapıldıktan sonra, ilgili konumlar belirlenerek redüksiyon işlemi yapılabilir. Bu aşamada da robotun ileri ve ters kinematiği gereklidir. İleri kinematik kolay olmasına rağmen, ters kinematik o kadar kolay değildir. Bu alanda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve hâlâ yapılmaktadır.

1.2. Medikal Robotlar

Teknolojideki ilerlemeler robotlarda da gelişmeyi beraberinde getirmiştir. Yetenekleri, becerileri, hızları ve zekâları gelişen robotlar gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve her alanda kullanılmaları sürekli artmaktadır. İmalat sektöründen savunma sanayine kadar birçok alanda robot teknolojileri kullanılmaktadır. Hatta robot askerler için kanunların tanımlandığı çalışmalar bile mevcuttur [1] [2].

Robotların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi de sağlık sektörüdür. Bunların bir kısmı da cerrahi alanlarda kullanılmaktadırlar. Hekimin; görme bozukluğu, dalgınlık, yorgunluk veya el titremesi gibi insani özelliklerinden dolayı oluşabilecek aksaklıkları veya zorlukları cerrahi alanda kullanılan robotlar bertaraf edebilirler. Bu nedenle görevinde becerikli ve uzmanlaşmış hekimler tarafından da tercih edilmektedirler. Göz ameliyatları, mikro cerrahi ve bunun gibi hassas operasyonlar için geliştirilmiş robotlar mevcuttur [3-5].

Heqiang ve arkadaşları, boyun omurlarındaki diskleri ufalamak, sivirtmek, taşlamak vb. işlemleri gerçekleştirmek için, görüntü destekli hassas konumlama yapabilen altı serbestlik derecesine sahip, geliştirilmekte olan robotun ümit vaat ettiğini söylemektedirler. Bu çalışmaya ait robot görüntüsü Şekil 1.1.'de verilmiştir [6].

Cerrahi alanında en meşhur olan 1995 yılında kurulan “Intuitive Surgical” firmasının geliştirdiği “da Vinci” isimli robottur. Firma tüm dünyada toplamda üç milyondan fazla ve her 60 sn’de bir operasyonun bu robot ile yapıldığını belirtmektedir. Küçük kısıpçaları ve yüksek hassasiyetleri sebebiyle küçük ve dar alanlarda istenilen hareketleri başarılı bir şekilde yapabilmesi bu robotu değerli kılmaktadır. Operasyon için açılan kesik küçük olacağından daha hızlı ve konforlu iyileşme avantajları arasındadır [7].



Şekil 1.1. Robot ile kemik taşlama deney platformu [6].

Kalp ve damarların durumunu görmek, gerekirse de uygun tedaviyi yapmak amacıyla, el veya ayak damarından girilerek yapılan operasyonları gerçekleştirmek için değişik firmaların ürettiği ve kullanılmakta olan robotlar da vardır [8].

Bir denizaltında, kutupta, çölde vb. yerlerde, hastanın hekime veya hekimin hastaya ulaşmasının güç olduğu durumlarda uzaktan operasyon yapabilecek robotlar mevcuttur. Uydu veya internetten erişim sağlanarak robot aracılığı ile hekimin operasyonu gerçekleştirmesi sağlanır [9].

1.3. Kırıklarda Harici Fiksator Kullanımı

Kırık olan kemiklerin hareket etmesi iyileşme sürecini uzatabilir hatta imkânsız hale bile getirebilir. Bu durumlarda kemiklerin sabitlenmesi gerekir. Kemiklerin konumlarının sabit kalması için kullanılan yöntemlerden birisi de harici fiksator (external fixator) uygulamalarıdır.

Kırık kemiklerin pozisyonları sabit tutularak doğru bir şekilde kaynamasını sağlamak için dışarıdan kullanılan destekler, harici fiksator olarak tanımlanmaktadır [10M].

Ilizarov'un geliştirdiği halka tipli fiksator, kemiklerin değişik yonlerde kontrollu tespitini sağlamaktadır ve bu çalışma boy uzatma operasyonlarında onemli bir adım olmuştur [11] [12].

Hasta narkoz altında iken kırık olan kemikler yaklaşık olarak elle hizalanırlar. Kırık kemiklerin her iki tarafına çiviler sabitlenir. Kemiğe sabitlenen çivilere fiksator geçirilir ve kemiklerin olabildiğince hizalanarak uygun pozisyona getirilmesi (redüksiyon) sağlanır. Tüm bu aşamalar rontgen çekilerek srekli kontrol edilir. Hizalama işleminden sonra, çivilere takılmış olan fiksatorün vidaları sıkılarak sabitlenir. Fiksator, bu kemikleri birbirlerine göre sabit tutacaktır. Böylece harici fiksator uygulaması yapılmış olur. Kemiklerin birbirlerine kaynaması gerçekleşinceye kadar iyileşme sreci beklenir. Bu srecin sonunda kırık kemiklere takılmış olan fiksator ve çiviler, bu kemiklerden sklerek çıkartılır.

A. Lesniewska ve arkadaşları çalışmalarında harici fiksator uygulamasında, fiksatorne binen yükün tedavi srecinde azaldığını belirtmektedirler [13]. şekilde 1.2.'de bu çalışmaya ait harici fiksator uygulaması gösterilmiştir.



(a)



(b)

şekil 1.2. Harici fiksator tedavisinin uygulandığı bir görüntü [13]. (a) Normal klinik uygulama (b) lme sistemi ile uygulama

1.4. C-Kollu Röntgen Cihazı

Kemik ile kas dokunun X-ışınlarını geçirme özellikleri farklı olduklarından dolayı, kırık olan kemik görüntülenmek istediğinde en yaygın kullanılan C-kollu röntgen cihazlarıdır. C-kollu röntgen cihazı tipi C harfine benzediği için bu şekilde adlandırılmaktadır.

Sedye üzerindeki hastanın kırık olan uzvunun etrafında dönebilmesi, bu cihazın avantajıdır. Kırık şeklinin tam olarak anlaşılabilmesi için, farklı açılardan çekilmiş en az iki adet görüntüye ihtiyaç duyulur. Aksi takdirde görüntü yanıltıcı olacaktır. C-kollu röntgen cihazı, kırık kemiğin etrafında döndürülerek, istenilen açıdan görüntü alınabilmesini sağlar. Böylece kırığın şekli ve kırık parçaların birbirlerine göre konumları rahatlıkla öğrenilebilir. Aynı zamanda redüksiyon işlemi sırasında da sürekli farklı açılardan görüntü alınarak, tüm işlem aşamaları ve redüksiyonun başarısı kontrol edilir. Aşağıda Şekil 1.3.'de Siemens firmasına ait C-kollu röntgen cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.3. Siemens firmasına ait C-Kollu röntgen cihazı [14].

1.5. Sensörler (Algılayıcılar)

Doğadaki herhangi bir büyüklüğün miktarını ölçmek için kullanılan aletlere sensör denir. İnsandaki duyu organlarına benzetilebilir. Eğer ölçülen değer sonucunda üretilen gösterge elektriksel bir sinyal ise, bu algılayıcı elektronik sensör diye adlandırılabilir.

Sensörlerin algıladıklarına göre çeşitleri:

- Elektriksel : Direnç, akım, volt, frekans, elektrik alan vb.
- Manyetik : Akı, alan yoğunluğu, geçirgenlik vb.
- Mekanik : Kuvvet, uzunluk, açı, alan vb.
- Termal : Isı
- Işıma : Dalga boyu, faz, yoğunluk
- Kimyasal : pH değeri, reaksiyon hızı, yoğunlaşma

Çıkışında üretilenin türüne göre sensör çeşitleri:

- Analog çıkış verenler: Girişinde okunan veriyi çıkışa, elektriksel büyüklük olarak verir. Çıkıştaki akım veya gerilim olabilir. Burada sinyal sürekli. Alıcı devre ADC dönüşümü yaparak veriyi sayısala çevirir.
- Dijital çıkış verenler: Okunan büyüklüğü sayısal bir değere dönüştürerek, çıkışında ayrık bir sinyal üretir. Genelde seri veya paralel haberleşme ile veriyi gönderir. Pulse (darbe) miktarı ile de gönderim yapanlar da mevcuttur.

1.5.1. Konum Algılayıcı (Encoder)

Enkoderler birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar. Robotik alanında da vazgeçilmez elektromekanik cihazlardır. Enkoderler aslında sinyal üreteçleridir. Bir milin dönme veya öteleme hareketi sonucunda, dijital sinyal (kare veya sincos dalga) üretir. Böylece konumu veya hareket miktarını tespit etme işlevi görürler. Yaygın olarak kullanılan türleri aşağıda verilmiştir.

Şaftlarının çalışma şekline göre ikiye ayrılırlar;

- Doğrusal hareketi ölçenler (Linear Encoder)
- Dönme hareketi ölçenler (Rotary Encoder)

Buldukları pozisyonları belirleme şekline göre;

- Artımsal (Incremental), hareket ettikçe puls üretir, gerçek pozisyonu vermez.
- Mutlak (Absolute), buldukları pozisyonun ne olduğunu verirler.

Şaftının, tahrik şaftına Bağlantı Şekline göre;

- Milli Tip (Shaft Encoder)
- Delik Milli Tip (Hollow Shaft Encoder)

Sinyallerin Oluşturulmasında Kullanılan Algılama (Sensör) Teknolojisine göre;

- Optik Algılamalı
- Manyetik Algılamalı

Çıkış Sinyallerinin Dalga Yapılarına göre;

- Kare Dalga üreten
- sincos Dalga üreten

1.5.2. Yük Hücresi (Loadcell)

Yük hücreleri, uygulanan kuvveti elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılan sensörlerdir. Yük hücresi içerisinde malzeme üzerine gerinim pulları (strain gauge) yapıştırılmıştır. Yük hücresine uygulanan kuvvet, malzemenin deforme olmasına sebep olur. Yük hücresinin yapısına göre deforme, uzama, kısalma veya burulma şeklinde olabilir. Yük hücresindeki bu deforme, malzemeye yapıştırılmış olan gerinim pullarının da şeklini değiştirir ve bu değişimin sonucu, direnç değerinin de değişmesine neden olur. Uygulanan kuvvetin miktarı da bu direnç değişiminden okunur.

Gerinim pulları Wheatstone köprüsü şeklinde bağlanarak, dirençlerdeki değişim ölçülür. Ölçüm sonucu analog bir işaret olup hâlâ çok küçük olduğundan, yükseltilerek ADC'lere veya mikrodenetleyicilerin ADC uçlarına gönderilir.

Basit bir tartıdan asansörlere kadar, köprü ayaklarından depolama tanklarına kadar çok yaygın kullanım alanları vardır. Robotik alanda da çok fazla kullanılmaktadırlar.

1.6. Robot Hareketi İçin Kullanılan Elektrik Motorları

Robotlar, mekanizmalarını hareket ettirebilmek için bir güce ihtiyaç duyarlar. Gerekli olan bu gücü verebilmek için genelde elektrik, hidrolik veya pnömatik tahrik sistemleri kullanılır. En yaygın kullanılan elektrik motorlarıdır.

Robotik sistemlerde en yaygın olarak kullanılan elektrik motorları aşağıda verilmiştir.

- DC Motorlar
- Servo Motorlar
- Adım Motorları

1.6.1. DC Motorlar

DC Motorlar adında da anlaşılacağı üzere doğru akım ile beslenen ve kontrol edilen motorlardır. Temelde firalı ve firasız olmak üzere ikiye ayrılırlar. Sarımlara uygulanan DC işaretin genliğine göre hızları değiştirilir. Piyasada çok yaygın kullanım alanları vardır. Çok değişik hız, g ve boyutlarda yaygın modelleri rahatlıkla bulunabilir. Bu motorları sürmek de kolaydır. DC motorların kararlılıkları ve konum değişikliklerine cevap verme süreleri uzundur.

1.6.2. Servo Motorlar

Servo motorlar robotik sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Kullanımları kolaydır. Üretimleri sırasında kontrol için gerekli devre de sarımlarla beraber imal edilir. Motorlara bağlı üç adet kablo vardır. Bunlardan ikisi besleme için kullanılır. Üçüncü kablo ise motoru kontrol edecek olan sinyal kablosudur. Motora gönderilen sinyale göre motorun pozisyonu ayarlanır. Sinyal olarak Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) kullanılır.

DC ve AC olan türleri vardır. DC servo motorlar, AC servo motorlara göre kurulumları ve bakımları daha pahalıdır. Ayrıca AC servo motorların sessiz çalışma özellikleri de vardır.

Servo motorlar küçük boyutlarına rağmen büyük torklar üretebilirler. PWM sinyali ile hızlarını ve konumlarını kontrol etmek kolaydır.

1.6.3. Adım Motorları

Kontrol girişlerine uygulanan darbe (pulse) sinyali ile dönme hareketi yapan bir çeşit fırçasız ve sabit mıknatıslı DC motordur. Dönme hareketi yapan türleri daha yaygın olmakla beraber, doğrusal hareket yapan türleri de vardır. Sinyal uçlarına işaret uygulandığında hareketi adım adım yaparlar [15].

Bir tur atmak, yani 360° derece dönmek için gerekli olan adım miktarı, motorun adım sayısı olarak adlandırılır. Bu durumda adım sayısı ne kadar fazla ise motor o kadar küçük açılarla adımlar atabilir. Yani motorun adım sayısının artması, hassasiyetinin de arttığı anlamına gelir. Piyasada değişik adım sayılarına sahip motorlar rahatlıkla bulunabilmektedir.

Adım motorlarının sinyal uçlarına uygulanan darbe sinyallerinin sırası değiştirilerek, dönüş yönü ayarlanır. Dönüş yönleri, saat yönünde (CW) ve saat yönünün tersi yönünde (CCW) şeklinde adlandırılır.

Adım motorlarının temel özellikleri:

- Yan yana bulunan sargılara aynı anda enerji verildiğinde yarım adım atması sağlanabilir.
- Hassas konumlandırma yapılabilir.
- Hız kontrolü kararlı ve basittir.
- Yüksek tutma torkuna sahiptirler.

Adım motorlarının avantajları:

- Geri besleme ihtiyacı yoktur. Bu nedenle açık döngülü olarak kontrol edilebilirler.
- Motorun hareketinde konum hatası yoktur.
- Defalarca çalıştırılıp durdurulmaları bir hasara neden olmaz.
- Bakım gerektirmezler.
- Kontrol işareti sayısal olduğundan, bilgisayar veya mikroişlemci ile kontrol edilebilirler.

Adım motorlarının dezavantajları:

- Hareketi adım açılarına bağlıdır ve bu açı sabittir. Bu nedenle hareketleri sürekli değil, darbelidir.
- Çok yüksek hızlarda kontrol edilmeleri zordur.
- Sürtünmeden kaynaklanan yükler, açık döngülü kontrolde konum hatasına neden olabilir.
- Hareket için gerekli olan güç ve tork sınırlıdır.
- DC ve servo motorlara kıyasla daha karmaşık sürücü devrelerine ihtiyaç duyarlar.
- Fazla eylemsizlik gerektiren yüklerde yetersiz olabilirler.
- Kontrolleri iyi yapılmaz ise rezonans meydana getirebilirler.

1.6.4. Redüktörler

Redüktörler, dişli çarklardan oluşan ve hareketi ileten mekanik düzeneklerdir. Girişteki devir miktarını, azalarak veya çoğaltarak çıkışa aktarırlar. Bu düzeneklere dişli kutusu da denir. En yaygın kullanıldığı yer otomobillerdeki vites kutusudur.

Hareket üreten sistemlerde redüktör kullanılması durumunda, girişteki devir miktarı azaltılarak veya artırılarak çıkışa aktarılır. Burada devir sayısının değişimi, çıkıştaki gücü de değiştirecektir. Diğer bir deyişle, eğer girişteki devir düşürülerek çıkışa aktarılırsa, çıkışta daha fazla güç elde edilecektir.

Bir adım motorunun çıkışına redüktör bağlanması durumunda, redüktör oranına göre çok daha küçük adımların çıkışta elde edilmesi mümkün olacaktır. Bu durum konumdaki hassasiyeti artıracaktır. Aynı zamanda devirin düşürülmüş olması, çıkışta yine redüktör oranına göre torku artıracaktır. Böylece hem daha güçlü, hem de daha hassas konumlandırma yapılarak adım motorunun yetenekleri artırılmış olur.

1.7. OpenCV

OpenCV, C/C++ ile geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bilgisayarla görme kütüphanesidir. Linux, Windows ve Mac OS X işletim sistemleri altında çalışır. Python, Ruby, Matlab ve diğer diller için geliştirme arabirimleri vardır. Gerçek zamanlı

uygulamalara destek olacak şekilde tasarlanmıştır ve çok çekirdekli işlemcilerle uygundur [16].

Kullanıcılarına hızlı bir şekilde uygulamalar yapması için, basit bir bilgisayarla görme altyapısı sağlamaktır. OpenCV kütüphanesinde; ürün muayenesi, tıbbi görüntüleme, güvenlik, kullanıcı arabirimi, kamera kalibrasyonu, stereo görme ve robotik dahil olmak üzere birçok alanda 500'den fazla işlev bulunur [17].

1.8. Epipolar Geometri

Epipolar geometri, bir nesnenin farklı yönlerden çekilmiş iki adet görüntüsü arasında bir geometrik bağıntı kurma temeline dayanır. Aynı noktanın iki görüntü arasındaki ilişkiyi tanımlayan matrisine Temel (F - Fundamental) Matris denir [18].

Nesneye ait bir X noktasının, birinci görüntüdeki izdüşümü x ve ikinci görüntüdeki izdüşümü x' ile gösterilecek olursa,

$$x = (x, y, 1)^T \quad (1.1)$$

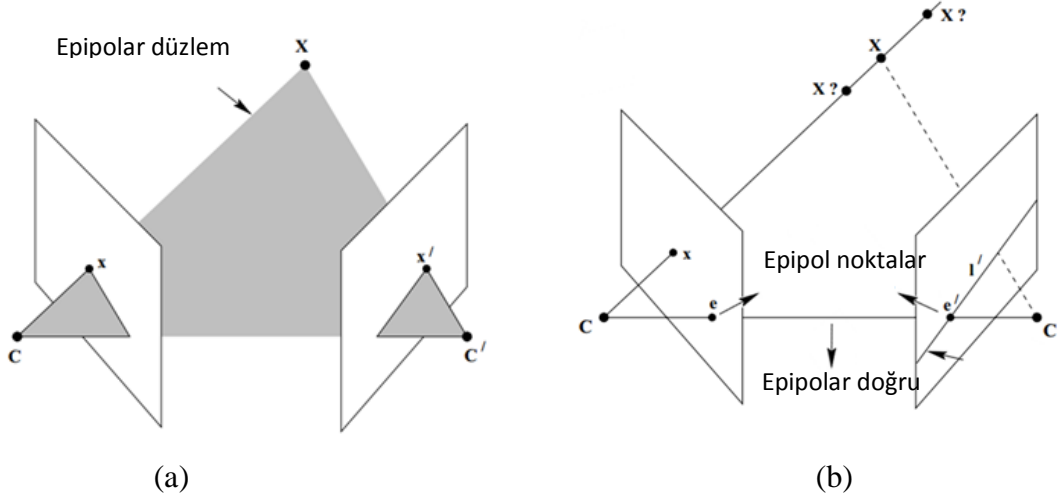
$$x' = (x', y', 1)^T \quad (1.2)$$

iki resim arasındaki bağıntıyı temsil eden 3x3 boyutlu ve rankı 2 olan F matrisine ait denklem (1.3)'de ki gibi yazılır [19].

$$x'^T F x = 0 \quad (1.3)$$

Şekil 1.4.'de C ve C' kamera merkezlerini temsil etmektedir ve C, C', X, x, x' noktaları epipolar düzlemi oluştururlar. Kamera merkezlerini birleştiren doğru epipolar doğru ve bu doğrunun görüntü düzlemi üzerinde kestiği noktalar (e ve e' noktaları) epipolar noktalar olarak adlandırılır. Epipolar noktalar ile F matrisi arasındaki ilişki denklem (1.4)'deki gibi ifade edilir [18].

$$\begin{aligned} F e &= 0 \\ F^T e' &= 0 \end{aligned} \quad (1.4)$$



Şekil 1.4. Epipolar geometri gösterimi a) Epipolar düzlem b) Epipolar noktalar

Epipolar düzlem ile görüntü düzlemlerinin kesişmesi epipolar çizgileri oluşturur. x' noktası, x noktası kullanılarak hesaplanan l' çizgisi üzerinde olur. Yani x' noktası ikinci görüntünün tamamı içerisinde değil, l' çizgisi üzerinde aranır. Böylece arama maliyeti ve hata miktarı azaltılmış olur [18].

$$l = F^T x'$$

$$l' = Fx$$

(1.5)

Üç boyutlu olan bir nesnenin görüntüsü alındığında, görüntü düzlemi üzerindeki boyut sayısı iki olur, böylece derinlik bilgisi kaybolur. Tekrar üç boyutlu koordinatların elde edilebilmesi için aşağıdaki adımlar uygulanır : [18].

- i. Nokta çiftlerinden F matrisinin bulunması
- ii. F matrisi kullanılarak C ve C' kameraları için P ve P' matrislerinin hesaplanması
- iii. $x - x'$ noktaları kullanılarak X noktasına ait üç boyutlu koordinat bilgisinin elde edilmesi (Denklem 1.6.)

$$P = [I|0], \quad P' = [[e'] x F|e']$$

(1.6)

Birinci kameranın konumu referans kabul edilerek, ikinci kameranın konumu ne kadarlık bir öteleme (translation) ve dönme (rotation) yaptığıyla hesaplanır. Böylece elde edilen kamera matrislerinden X noktasının üç boyutlu koordinatları hesaplanabilir.

1.9. Kamera Kalibrasyonu

Kamera kullanılarak elde edilen görüntüde bozulma olması, yapılacak olan işlemin de hatalı olmasına neden olacaktır. Her kameranın geometrisinden ve merceklerinden kaynaklanan hataları vardır. Eğer hatanın ne kadar olduğu bilinirse bunların düzeltilmesi de mümkün olacaktır. Kameradan kaynaklı, ve hataları düzeltmek için gerekli olan parametrelere iç (intrinsics) parametreler denir. Bilgisayarla görme işleminde, üç boyutlu koordinat sistemine geçiş yapılması, yani dünya ile resim arasında bağlantı kurulması gerekir. Bunu için de konum ve yön bilgisi gereklidir ve bunlar da dış (extrinsic) parametreler olarak adlandırılır. Kamera kalibrasyonu, iç ve dış parametreleri bulma işlemidir [20] [21-26].

1.9.1. Kameradan Kaynaklanan Bozukluklar

Kameraların kalitesine göre değişken olmakla birlikte, iğne deliği kameralarının görüntülerinde bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmalardan en önemlileri radyal ve teğetsel bozulmadır.

Radyal bozulma nedeniyle düz çizgiler kavisli görünecektir. Bozulma resim merkezinden uzaklaştıkça artar. Şekil 1.5.'de radyal bozulmaların olduğu bir resim verilmiştir [21-27].

Radyal bozulmalara ait denklem (1.7) ve (1.8)'de verilmiştir.

$$x_{distorted} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (1.7)$$

$$y_{distorted} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (1.8)$$



Şekil 1.5. Radyal bozulmaların olduğu satranç tahtasına ait bir görüntü [27].

Görüntü düzlemi ile görüntü almak için kullanılan lensin birbirlerine paralel olmadığı durumlarda da oluşan hatalar, teğetsel bozulma olarak adlandırılır. Teğetsel bozulma, resimdeki bazı bölgelerin beklenenden daha yakın görünmesine neden olur. Denklem (1.9) ve (1.10)'da teğetsel bozulmayı veren formüller verilmiştir.

$$x_{distorted} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (1.9)$$

$$y_{distorted} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (1.10)$$

Görüldüğü üzere k_1 , k_2 , p_1 , p_2 , k_3 bozulma katsayılarını oluşturmaktadır. OpenCV kütüphaneleri bu parametreleri bulmak için komutlar sunmaktadır.

1.9.2. Kameranın İç (Intrinsics) Parametreleri

Her kameranın kendisine özgü, odak uzaklığı (f_x , f_y) ve optik merkezi (c_x , c_y) parametreleri vardır. Bu parametrelerin oluşturduğu 3x3 boyutlarındaki matrise, iç

(intrinsics) matris veya kamera matrisi denir. Denklem (1.11)'de kamera matrisi verilmiştir [27] [21-26].

Kamera matrisi,

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Kamera matrisi, kameraya özgü olduğu için bir defa hesaplanması yeterlidir. Aynı kamera kullanıldığı sürece, aynı veriler sürekli kullanılabilir. Buradaki parametreler:

f_x, f_y : Odak uzaklığı

c_x, c_y : Kamera merkezi

1.9.3. Kameranın Dış (Extrinsic) Parametreleri

Dış (Extrinsic) parametreler, bir 3D noktasının koordinatlarını, başka bir koordinat sistemine çeviren rotasyon vektörlerine karşılık gelir. Dış parametreler kameranın konumu ve doğrultusu ile alakalıdır. Kameranın konumunu belirtmek için öteleme yapmak yeterlidir. Öteleme üç ekseninde olabileceğinden, üç elemanlı bir vektör gerekir. Kameranın doğrultusunu belirtmek için ise, döndürme işlemi gereklidir. Döndürme işlemi homojen koordinat sisteminde tanımlandığı üzere 3x3 bir matris gerektirir. Denklem (1.12) ve (1.13)'de döndürme ve ötelemeden oluşan dış parametrelerin gösterimi verilmiştir.

$$\text{dış parametreler matrisi} = [R | t] \quad (1.12)$$

$$\text{dış parametreler matrisi} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

1.9.4. Homojen Koordinat Sistemi

Bir görüntüye ait herhangi bir nokta, iki değişken ile ifade edilir (x, y). Homojen koordinat sisteminde (a, b) ile ifade edilen bu iki değişkene bir parametre daha eklenir (w)

ve bu durumda iki boyut için homojen koordinat gösterimi denklem (1.14)'deki gibi ifade edilir. Üç boyutlu bir ortamda ise, denklem (1.15)'de verilen halini alır.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ w \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ w \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Homojen koordinatlardan, normal koordinat sistemine geçiş için, tüm elemanlar w değerine bölünür. Bu durumda;

$$\begin{aligned} x &= a/w \\ y &= b/w \\ z &= c/w \end{aligned} \quad (1.16)$$

olarak bulunur. Doğal olarak bu durumda $w = 1$ olur.

1.9.5. Projeksiyon Matrisi

Projeksiyon matrisi (P), üç boyutlu uzaydan, iki boyutlu gösterime geçişi sağlar. Bir kamera ile alınan görüntü, nesnenin iki boyutlu görüntüsünü verir. Projeksiyon matrisi de bu işi matematiksel yapmanın yoludur. Şekil 1.6.'da iğne delikli kameranın projeksiyon görüntüsünün nasıl oluştuğunun gösterimi verilmiştir [28] [21-26].

3D görüntüden 2D görüntüye geçişi sağlayan Projeksiyon matrisi (1.17) ve (1.18) denklemlerinde verildiği gibi ifade edilir [28].

$$s m' = K [R | t] M' \quad (1.17)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Buradaki simgeler :

(X, Y, Z) : Uzayda bir noktanın 3D koordinatları

(u, v) : Perspektif resimdeki noktanın piksel koordinatları

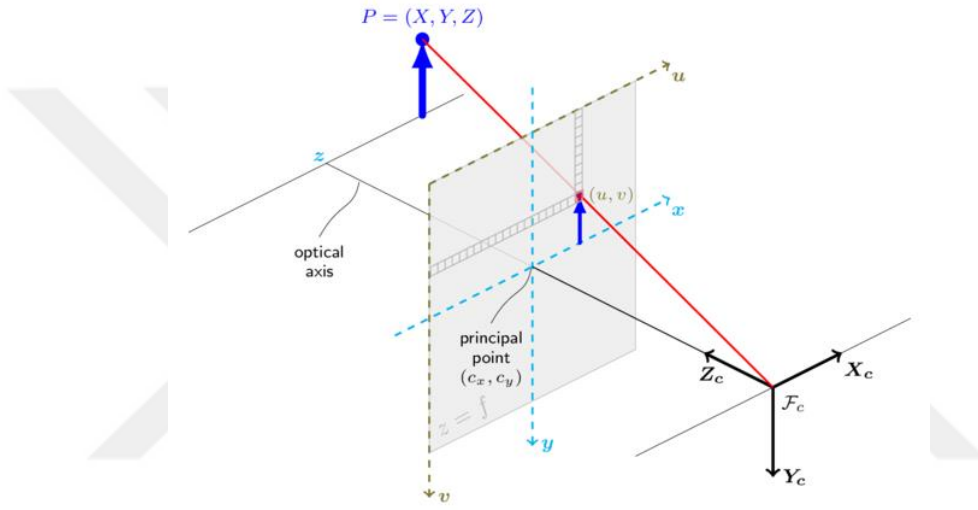
K : Kamera matrisi (iç parametreler)

R : Rotasyon matrisi

t : Öteleme matrisi

f_x, f_y : Odak merkezi

c_x, c_y : Kamera merkezi



Şekil 1.6. İğne deliği kamera modeli [28].

Projeksiyon matrisi (P) denklem (1.19)'deki gibi ifade edilebilir.

$$P = K [R | t] \quad (1.19)$$

Nesneye ait 2D görüntünün nerede çizileceğini bulmak için, 3D uzaydaki özelliği projeksiyon (iz düşüm) matrisi ile çarpılılar [29]. Bir projeksiyon matrisi aşağıda verilen bileşenlerden oluşur:

- Kameranın 3D konumu, öteleme
- Piksel aralığı (görüntünün boyutuyla da ilişkilidir), ölçeklendirme
- Kameranın görüş açısı (baktığı yer), dönme

- Kameranın odak uzaklığı; Bu, 2D x ve y konumlarının 3D z konuma bağımlı olmasına neden olur, böylece noktalar kameraya yaklaşırken görüntüde genellikle hareket etmeye başlar.

3D bir noktanın konumunu belirleyen vektör, w ile beraber 4 adet elemandan ve 2D bir noktanın konumunu gösteren bir vektör ise w ile beraber 3 adet elemandan oluşur. Bu durumda projeksiyon matrisi 3 satır ve 4 sütundan oluşmuş olur. Projeksiyon matrisini kullanarak, 3D bir noktanın 2D görüntüsündeki konumunu elde etmek için denklem (1.20) kullanılır. Denklem (1.21)'de daha açık bir şekilde verilmiştir.

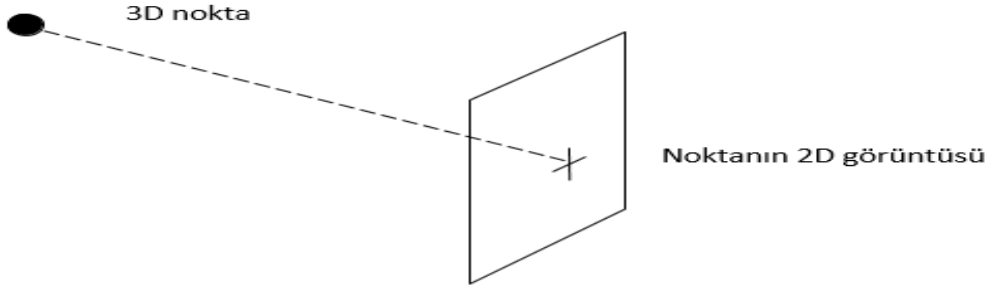
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Aşağıdaki algoritma 3D ortamda yer alan bir noktanın, 2D ortamda iz düşümünün nasıl yapılacağını göstermektedir. Şekil 1.7.'de bu iz düşüm gösterilmiştir.

- Kameranın koordinatlarına, baktığı yöne ve görüş açısına göre Projeksiyon Matrisi oluşturulur.
- 3D sahnede her bir nokta için p(x,y,z)
 - Homojen koordinat vektörü oluşturmak için w=1 eklenir, $[xyz1]^T$
 - $[abw]^T = P [xyz1]^T$ hesaplanır.
 - 2B görüntü noktasını bulmak için w'ye bölünür : $x = a / w$ ve $y = b / w$
 - Bulunan koordinat resimde nokta olarak çizilir.

Görüldüğü üzere kesikli olan çizgi boyunca 3D koordinata sahip tüm noktalar, düzlem üzerinde aynı 2D noktaya izdüşümü yapacaktır. Bu nedenle bir noktanın 3D konumu, bir kameradan belirlenemez.

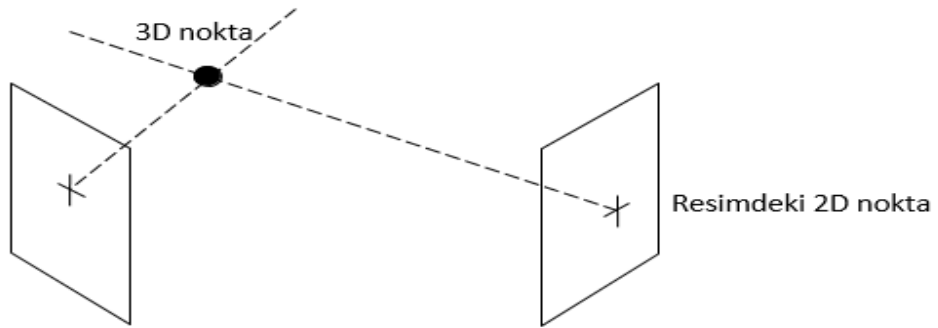


Şekil 1.7. 2D nokta (artı ile gösterilen), noktaların bir çizgisine karşılık gelir. (kesikli çizgi) 3D; Bu çizgideki herhangi bir nokta aynı noktaya gidecektir.

1.9.6. Üç Boyutlu (3D) Geri Çatma

Projeksiyon matrisi, 3D koordinatları verilen noktanın 2D düzlemde konumunu bulmamıza imkân vermektedir. Fakat bunun tersi mümkün değildir. Yani Projeksiyon matrisini kullanarak 2D koordinatlarından bir noktanın 3D koordinatları elde edilemez, sadece hangi doğrultu üzerinde olduğu bulunabilir. Çünkü o doğrultudaki tüm 3D noktaların izdüşümü, 2D görüntüde aynı yere karşılık gelir [29].

2D koordinatlardan 3D konum bilgisi, iki doğrultunun çakıştığı nokta hesaplanarak bulunabilir. İki doğruyu elde etmek için iki adet 2D görüntüye ihtiyaç vardır. O halde farklı açılardan çekilmiş olan iki resim kullanılarak, bir noktanın 3D koordinatları elde edilebilir. Şekil 1.8.'de bu durum gösterilmektedir [29].



Şekil 1.8. İki kamera ile elde edilen resimlerdeki aynı noktaya ait doğrularının kesişimi

Farklı iki kameradan çekilen iki görüntüde, aynı nokta için birer doğrultu elde edilebilir. Bu doğrultuların kesiştiği yer, o noktanın 3D düzlemde tam koordinatlarını verir. Eğer gerçek zamanlı bir çalışma gerekmiyorsa, farklı kamera yerine aynı kameranın farklı

iki açıdan görüntü almasıyla da bu hesaplamalar yapılabilir. Her iki yöntemde de iki tane projeksiyon matrisi vardır. Denklem (1.x) ve (1.x)'de bu durum ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = [P_1] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = [P_2] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Burada verilen kamera görüntülerinden, a_1/w_1 , b_1/w_1 , a_2/w_2 ve b_2/w_2 'nin sırasıyla resimlerdeki x_1, y_1, x_2 ve y_2 olduğunu biliyoruz.

$$a_i = Xp_{11}^i + Yp_{12}^i + Zp_{13}^i + p_{14}^i \quad (1.24)$$

$$b_i = Xp_{21}^i + Yp_{22}^i + Zp_{23}^i + p_{24}^i \quad (1.25)$$

$$w_i = Xp_{31}^i + Yp_{32}^i + Zp_{33}^i + p_{34}^i \quad (1.26)$$

Burada i , resim numarasıdır.

$x_i w_i = a_i$ ve $y_i w_i = b_i$ eşitliklerini yerine koyarsak (1.27) ve (1.28)'deki denklemler elde edilir.

$$Xx_i p_{31}^i + Yx_i p_{32}^i + Zx_i p_{33}^i + x_i p_{34}^i = Xp_{11}^i + Yp_{12}^i + Zp_{13}^i + p_{14}^i \quad (1.27)$$

$$Xy_i p_{31}^i + Yy_i p_{32}^i + Zy_i p_{33}^i + y_i p_{34}^i = Xp_{21}^i + Yp_{22}^i + Zp_{23}^i + p_{24}^i \quad (1.28)$$

Buradan X, Y ve Z için ortak olan terimleri paranteze alınarak, denklem (1.29) ve (1.30) elde edilir.

$$X(x_i p_{31}^i - p_{11}^i) + Y(x_i p_{32}^i - p_{12}^i) + Z(x_i p_{33}^i - p_{13}^i) = p_{14}^i - x_i p_{34}^i \quad (1.29)$$

$$X(y_i p_{31}^i - p_{21}^i) + Y(y_i p_{32}^i - p_{22}^i) + Z(y_i p_{33}^i - p_{23}^i) = p_{24}^i - y_i p_{34}^i \quad (1.30)$$

Yukarıdaki denklemlerde $i=1$ ve $i=2$ için matris çarpımı şeklinde yazılırsa, denklem (1.31) elde edilir ve bu denklem de (1.32)'deki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} x_1 p_{31}^1 - p_{11}^1 & x_1 p_{32}^1 - p_{12}^1 & x_1 p_{33}^1 - p_{13}^1 \\ y_1 p_{31}^1 - p_{21}^1 & y_1 p_{32}^1 - p_{22}^1 & y_1 p_{33}^1 - p_{23}^1 \\ x_2 p_{31}^2 - p_{11}^2 & x_2 p_{32}^2 - p_{12}^2 & x_2 p_{33}^2 - p_{13}^2 \\ y_2 p_{31}^2 - p_{21}^2 & y_2 p_{32}^2 - p_{22}^2 & y_2 p_{33}^2 - p_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14}^1 - x_1 p_{34}^1 \\ p_{24}^1 - y_1 p_{34}^1 \\ p_{14}^2 - x_2 p_{34}^2 \\ p_{24}^2 - y_2 p_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$A X = B \quad (1.32)$$

Burada aradığımız X matrisidir. Bunun için A matrisinin tersini alıp eşitliğin her iki tarafı ile çarpmak sonucu verecektir. Fakat A matrisi kare matris olmadığından dolayı bunu yapamayız, çünkü tersini alamayız. Bu sorundan kurtulmak için, denklem (1.33)'deki işlemler vasıtasıyla, A matrisi kare matris haline getirilerek X matrisi elde edilebilir. Çünkü bir matrisin, kendi evriği (transpoz) ile çarpımı her zaman kare matris olacaktır.

$$(A^T A)^{-1} A^T A X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (1.33)$$

Denklem (1.33)'de eşitliğin sol tarafının birim matris (I) olacağı aşikârdır. Bu durumda X matrisi denklem (1.34)'de verildiği şekilde bulunur ve bu denklem 3D görünümün temel denklemdir.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (1.34)$$

Matris terslerini bulmak için SVD (Tekil Değer Ayrışımı) yöntemi kullanılabilir. Yukarıda bahsedilen 3D konum bulma işlemini gerçekleştirecek olan algoritmayı aşağıdaki gibi yazabiliriz.

- Her bir kamera için P_1 ve P_2 projeksiyon matrisleri bulunur. Eğer kameraların geometrik özellikleri değişmemişse her seferinde bunu hesaplamak gerekmez, bir defa bulunması yeterlidir.
- Her iki kamera görüntüsündeki (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) konumları bulunur.

- Denklem(1.x1.) kullanılarak (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , P_1 ve P_2 değerlerinden A ve B bulunur.
- Eğer sağ taraf sıfır ise SVD yöntemini kullanarak matris tersi bulunur.
- Denklem (1.34)'ü gerçekleştirmek çözümü verir.

1.10. Robotlarda İleri ve Ters Kinematik

Robot manipülatörünün konumu, her zaman için bu tür robotların amacını teşkil eder. Çünkü amaç robot koluna bir iş yaptırmaktır ve bunun için de konumunun bilinmesi kaçınılmazdır. Robot manipülatörünün mevcut durumda nerede olduğunun bilinmesi ileri kinematik olarak adlandırılır. Manipülatörün istenilen bir koordinata getirilmesi ise ters kinematiğin konusudur.

1.10.1. Robotlarda İleri Kinematik

Robotun hareketli uzuvlarının, başlangıçtan itibaren uç uca eklenerek en uçtakinin konumunun nerede olduğunun tespit edilmesi ileri kinematik olarak adlandırılır. Yani manipülatörün şu an nerede olduğunun bilinmesi işlemidir.

Robotun geometrik şeklinin tanımlanması ile bu işin yapılması pek de zor değildir. Bununla birlikte imalattan kaynaklanan hatalar bu işi zorlaştırabilir. Birbirine dik olması istenen iki uzuv imalatta tam 90° olmayabilir. Hatta imal edildikten sonra bile bu açının 90° olup olmadığını ölçmek pek de kolay değildir. Bunun için çok hassas ve pahalı cihazlar gereklidir. Buradaki küçük bir açı sapması kolun uzunluğuna bağlı olarak sonuçta büyük hatalara neden olabilir. Şayet imalattan kaynaklanan hatalar bilinirse, bunlar ileri kinematik denklemlerine eklenerek doğru sonuçlara ulaşılabilir.

Robotların eklem değişkenlerinin belirlenebilmesi için birçok yöntem önerilmiştir ve kullanılmaktadır. Kinematik problemler Kartezyen üç boyutlu ve kartonum dört boyutlu olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Kartezyen uzayda yaygın kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir. En çok tercih edilen Denavit-Hartenberg yöntemidir [30, 31].

- Homojen dönüşüm yöntemi
- Üssel yöntem

- SRK (Sıfır Referans Konum) yöntemi
- Pieper-Roth yöntemi
- TPS (Tam ve Parametrik olarak Sürekli) yöntem

1.10.2. Denavit-Hartenberg Yöntemi

Robotun en baştan en sondaki ucuna doğru hareketler iletilerek manipülatörün konumlanması sağlanır. Burada hareket eden uzuvlar doğrusal veya döner hareket eden mekanizmalardan oluşabilir. İki uzuv arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisi ile açıklanır. Sırasıyla bu dönüşüm matrislerinin birbiri ile çarpılması sonucu toplam hareket matrisi elde edilir. Elde edilen bu matris ile manipülatörün konumu belirlenir.

Her bir ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki denklem (1.35)'de verilen dönüşüm matrisi ile elde edilir. Her ekleme ait dönüşüm matrisi bir önceki eklem ile şimdiki arasındaki ilişkiyi ifade eder.

$${}^{i-1}T_i \quad (1.35)$$

Bu dönüşüm matrisleri arka arkaya çarpılarak, başlangıca göre o eklem konumunu verir. Tüm eklemlerin dönüşüm matrisleri sırasıyla çarpılırsa, sonuç uç işlevcinin konumunu verecektir. Bu ilişki ileri kinematik olarak tanımlanır. Denklem (1.36)'da robotun dönüşüm matrislerinin hesabı gösterilmiştir.

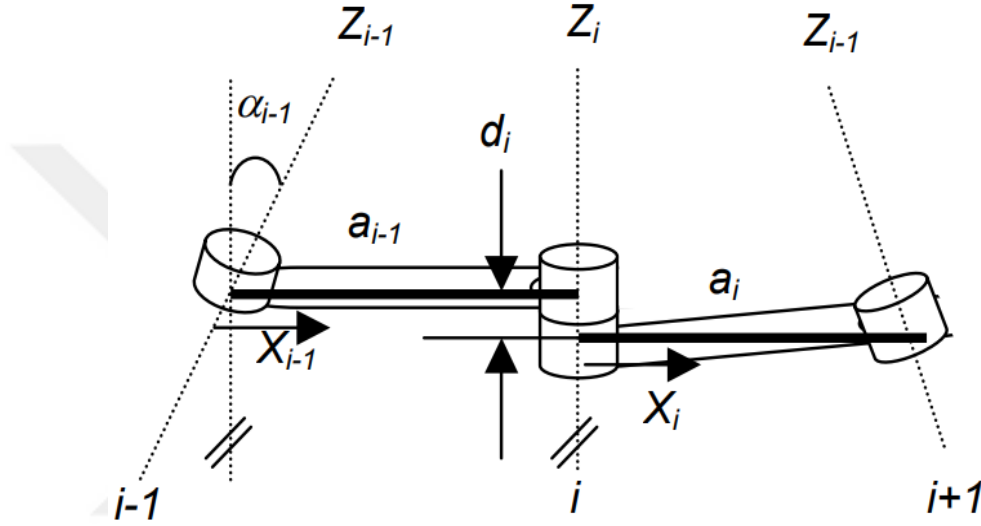
$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots \dots {}^{N-1}T_N \quad (1.36)$$

İlk olarak Denavit-Hartenberg tarafından tanımlanan ve homojen koordinat sistemini kullanarak, eklemler arasındaki ilişkiyi veren dönüşüm (transformasyon) matrisi denklem (1.37)'de verilmiştir [32].

$$T = \left[\begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ \hline F_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \text{Dönme matrisi} & \text{Konum vektörü} \\ \hline \text{Perspektif dönüşüm} & \text{Ölçek} \end{array} \right] \quad (1.37)$$

Şekil 1.9.'de gösterildiği üzere bu dönüşüm matrislerinde kullanılan dört adet parametre vardır ve bunlar Denavit-Hartenberg parametreleri olarak adlandırılır:

- a_{i-1} : İki eksen arasındaki uzuv uzunluğu
- α_{i-1} : $i-1$ ile i eksenleri arasındaki eksen açısı
- d_i : Üst üste çakışan eklemler arasındaki eklem kayması
- θ_i : İki komşu uzuv arasındaki eklem açısı



Şekil 1.9. Denavit-Hartenberg yöntemi eklem gösterimi

Her bir eklem için, (1.38) ve (1.39)'da verilen denklemler uygulanarak, o ekleme ait dönüşüm matrisi hesaplanır.

$${}^{i-1}_i T = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i) \quad (1.38)$$

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

1.10.3. Robotlarda Ters Kinematik

Robot kolunun uç işlevcisinin (manipülator) istenilen bir koordinata taşınması için, eklem değişkenlerinin ne olması gerektiğinin tespit edilmesi işlemi, ters kinematiğin

konusudur. Analitik olarak karmaşık denklemler içerir. Prizmatik eklemlerin ters kinematiği kolay olmasına karşın, döner eklemler çözümü zorlaştırır. Döner eklem sayısının artması çözümü zorlaştırır. Ters kinematiğin matematiksel çözümü her zaman fiziksel bir çözümü temsil etmez, bu çözümlerden bir kısmı sanaldır. Eklem sayısı “n” olan bir robot için matematiksel çözüm sayısı $2^n=64$ 'dür. Ama bunların hepsi eklem hareketleriyle sağlanamaz [33-37].

Ters kinematik için üç ana yöntem vardır:

- Analitik (Cebirsel)
- Geometrik
- İteratif, sezgisel

Analitik çözümde ileri kinematik denklem (1.40)'da verildiği gibi tanımlanmış olsun;

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (1.40)$$

Ters kinematik çözümü bulmak için, denklem (1.41)'de gösterildiği gibi bir matrisin kendi tersi ile çarpımı birim matrisi verir.

$$[{}^0T_1]^{-1} {}^0T_1 = I \quad (1.41)$$

Buradan hareketle ters kinematik denklem (1.42)'de verilen adımlar takip edilerek bulunabilir.

$$[{}^0T_1]^{-1} {}^0T_6 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

$$[{}^0T_1 {}^1T_2]^{-1} {}^0T_6 = {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

$$[{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3]^{-1} {}^0T_6 = {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

$$[{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4]^{-1} {}^0T_6 = {}^4T_5 {}^5T_6$$

$$[{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5]^{-1} {}^0T_6 = {}^5T_6 \quad (1.42)$$

Burada bahsedilen yöntem gösterim olarak kolay gibi gözükse de oldukça karmaşık matematiksel çözümler gerektirir ve çözümleri pek de kolay değildir.

Robotun ileri kinematik haritası için kullanılan eksonansiyel çarpımların, ters kinematik problemlerinde geometrik bir çözümleri mümkündür. Ters kinematik için problemi uygun alt problemlere indirgeyerek çözen geometrik yöntemler de önerilmiştir [38-40].

Yapay sinir ağları, iteratif çözümler, genetik algoritmalar ve sezgisel algoritmalar vb. birçok yöntem robotlarda ters kinematik problemlerin çözümleri için önerilmiştir [41-45].

Bu çalışmada değiştirilmiş PSO ile ters kinematik çözümleri uygulanmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

1.11. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO Algoritmasının temel hali denklem (1.43) ve (1.44)'de verildiği formüllerle, Şekil 1.10.'da verilen akış şemasına göre işlem yapılarak gerçekleştirilmektedir [46-48].

$$v_i^d(t+1) = w v_i^d(t) + c_1 r_1 (x_{pbest_i}^d - x_i^d(t)) + c_2 r_2 (x_{gbest}^d - x_i^d(t)) \quad (1.43)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (1.44)$$

Burada kullanılan değişkenler:

v: parçacık hızı

x: pozisyon

i: parçacık

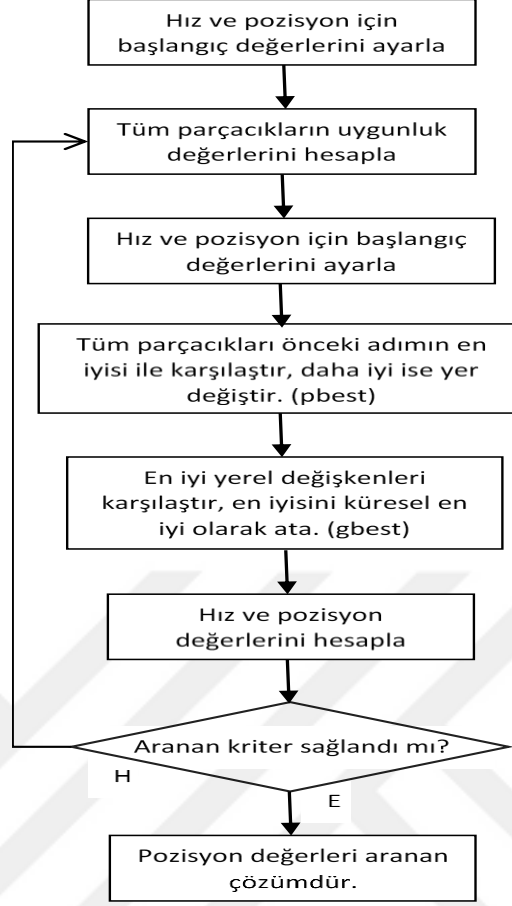
d: değişken

t iterasyon

w: atalet ağırlığı

c1 ve c2: hızlanma (ölçeklendirme, öğrenme) faktörleri

r1 ve r2: (0-1) aralığında rasgele üretilen reel sayılar



Şekil 1.10. PSO Algoritmasının genel akış diyagramı

1.12. Literatür Özeti

Bu tezde, çalışmamıza temel oluşturan konuların önemli olanları ile ilgili neler yapıldığı, dünyadaki çalışmaların hangi yöne doğru ilerlediği konusunda yapılan araştırmalar neticesinde ulaşılan çalışmalardan bir kısmı bu bölümde verilmiştir.

1.12.1. Kırık Kemik Tedavisinde Robotlar

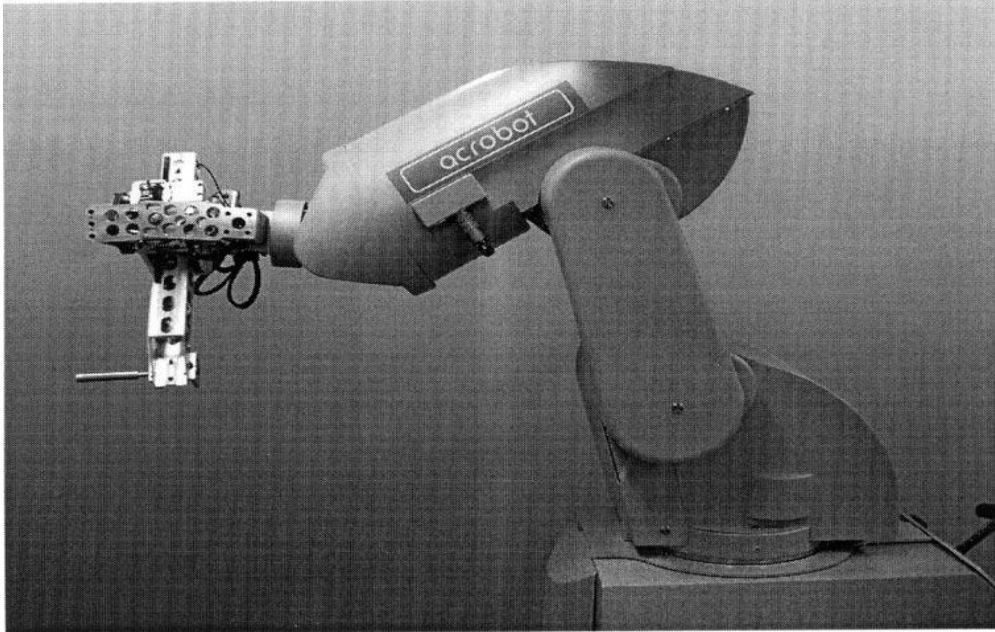
Kemik ile kas dokusunun röntgen ışınlarını geçirgenliği farklı olduklarından dolayı, görüntüleme işleminin bu ışınlarla yapılabilir. Redüksiyon işlemi yapılırken sürekli olarak röntgen görüntüleme faydalanılmaktadır. Geleneksel olarak redüksiyon işlemi genellikle elle yapılmakla beraber bu işlem için robotik çalışmalar da mevcuttur. Aşağıda çalışmamıza yakın olanlardan bazıları verilmiştir.

Kırık kemiğin redüksiyonu için hekimin uyguladığı kuvvetin ne olduğu üzerine yapılan çalışmalarda, 201 N ile 411 N arasında bir kuvvet uygulandığı ve bunun da yorgunluğa neden olduğu belirtilmektedir [49] [50].

Hekimlerin maruz kaldığı X-ışınlarının, sağlıklarını tehlikeye sokacak bir miktara ulaşmaması için sürekli ölçümler yapılır. Redüksiyon işleminin uzun sürmesi daha fazla görüntüleme ihtiyacını doğurur, bu durumda hekimin maruz kalacağı X-ışını miktarını artırır. Bu nedenle hekimin bir yılda yapacağı ameliyat sayısı da buna göre sınırlandırılır [51].

ISS Robodoc (Kazançides ve arkadaşları) kalça protezlerinin daha doğru uygulanabilmesi için, kuvvet algılama özelliğine sahip, yardımcı robotik bir çözüm tasarlamışlardır [52] [53].

Acrobot (Jakopce ve arkadaşları) diz protezlerinin kolay ve hassas yapılması için, tomografi görüntülerini kullanarak hekime yardımcı olan ve yönlendiren bir robot geliştirmişlerdir. Şekil 1.11.' de bu robotun görünüşü verilmiştir [54].



Şekil 1.11. Konumlandırma cihazı üzerine monte edilmiş Acrobot robotu [54].

Mamoru MITSUBISHI ve arkadaşları da kırık operasyonlarında robotun uyguladığı kuvveti 6 eksenle ölçen robot çalışması yapmışlardır [55].

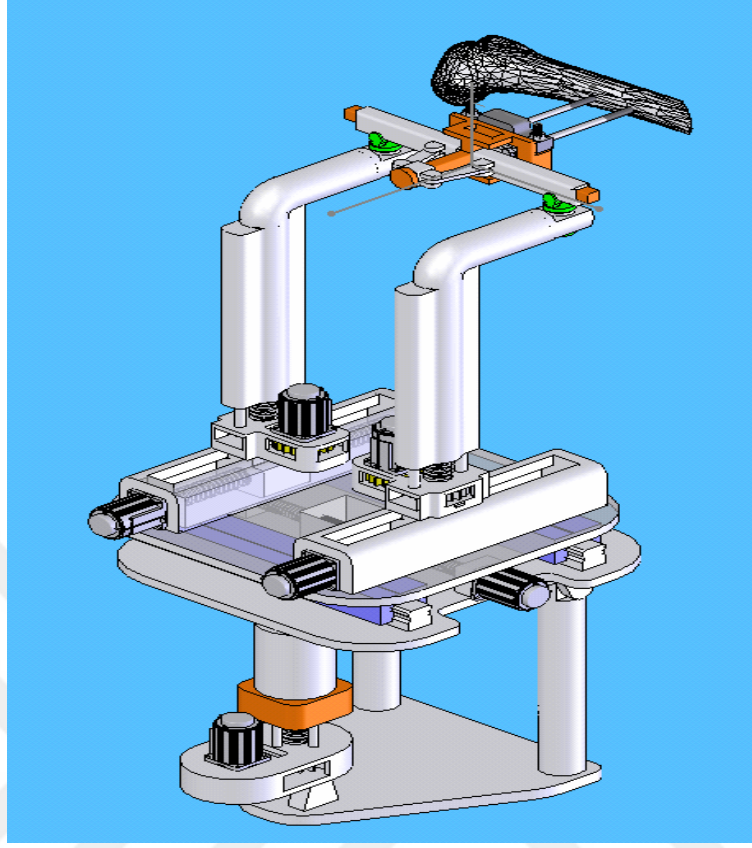
Graham ve arkadaşları uzun kemik kırıklarının 3D görüntüleri elde edip, konum kuvvet ölçümünü de yaparak, redüksiyonu robot ile yapan çözüm üzerinde çalışmışlardır. Şekil 1.12.'de bu çalışmalarının hastaya uygulandığı bir resim verilmiştir [56].



Şekil 1.12. Graham ve arkadaşlarının robotik uygulaması [56].

Buschbaum ve arkadaşları uzun kemik kırıklarının otomatik redüksiyonu için minimum yol planlaması çalışmaları yapmışlardır. Fakat bu sadece teorik bir çalışma olup ameliyat tecrübesi veya röntgen sonuçları gözlemlenmemiştir. Harici fiksator kullanılan çalışmada 3D görüntüleme kullanarak ameliyat süresini kısaltmayı ve başarılı bir redüksiyonu amaçlamışlardır. Doğrusal yönde 2.04 mm (\pm 1.53), açısal yönde 2.54° (\pm 1.33) yaklaşımlar olduğunu ve bunun başarılı bir sonuç olduğunu belirtmektedirler [57].

Ruihua Ye ve arkadaşları kemik kırıklarında redüksiyon için kullanılan seri robotların yük taşıma yeteneklerinin ve redüksiyon başarısının düşük olduğundan bahisle paralel manipülatörlü 6 serbestlik derecesine sahip robot önermişlerdir. Ancak bu yöntemin de sınırlı hareket alanlarının, performanslarını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Şekil 1.13.'de çalışmalarına ait bir resim verilmiştir [58]. Şekil 1.14.'de de bir başka paralel çalışmaya ait uygulamadan bir görüntü verilmiştir [59].



Şekil 1.13. Ruihua Ye ve arkadaşlarının robot konfigürasyonu [58]



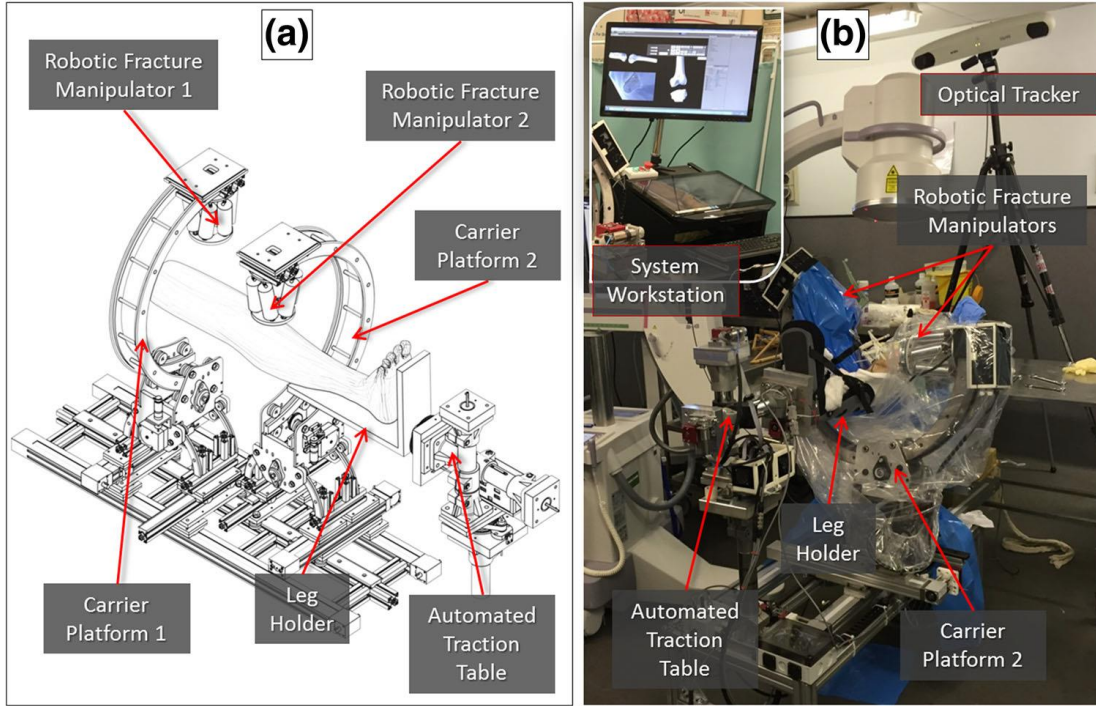
Şekil 1.14. Paralel manipulatörlü robot [59]

Uzaktan kumanda ile kırık kemiğin redüksiyonunu yapabilen, bu sırada uygulanan kuvveti geri bildirim olarak sunabilen robotlar üzerinde çalışılmış ve elle yapılandan çok farklı bir sonuç elde edilmediği, yani bu yöntemin kullanılabileceği ifade edilmektedir. Redüksiyon işlemi sırasında x-ışınlarının belirgin ölçüde daha az kullanıldığı belirtilmiştir. Şekil 1.15.'de bu çalışmaya ait uzaktan kumandalı redüksiyon yapabilen bir robotun resmi verilmiştir [60, 61].



Şekil 1.15. Uzaktan kumandalı redüksiyon yapabilen robota ait bir görüntü [60]

Dagnino ve arkadaşları; kalça, ayak bileği, omuz gibi eklem kırıklarını iki boyutlu görüntülerden üç boyutlu görüntülemeyi sağlayarak, operasyonu yapan robotik çözüm gerçekleştirilmişlerdir. 9 kadavra örneği üzerinde yapılan çalışmadan 7'sinde redüksiyonun kabul edilebilir ölçüde başarılı olduklarını (1mm, 5°) söylemektedirler. Şekil 1.16.'de bu çalışmaya ait görüntüler yer almaktadır [62] [63].

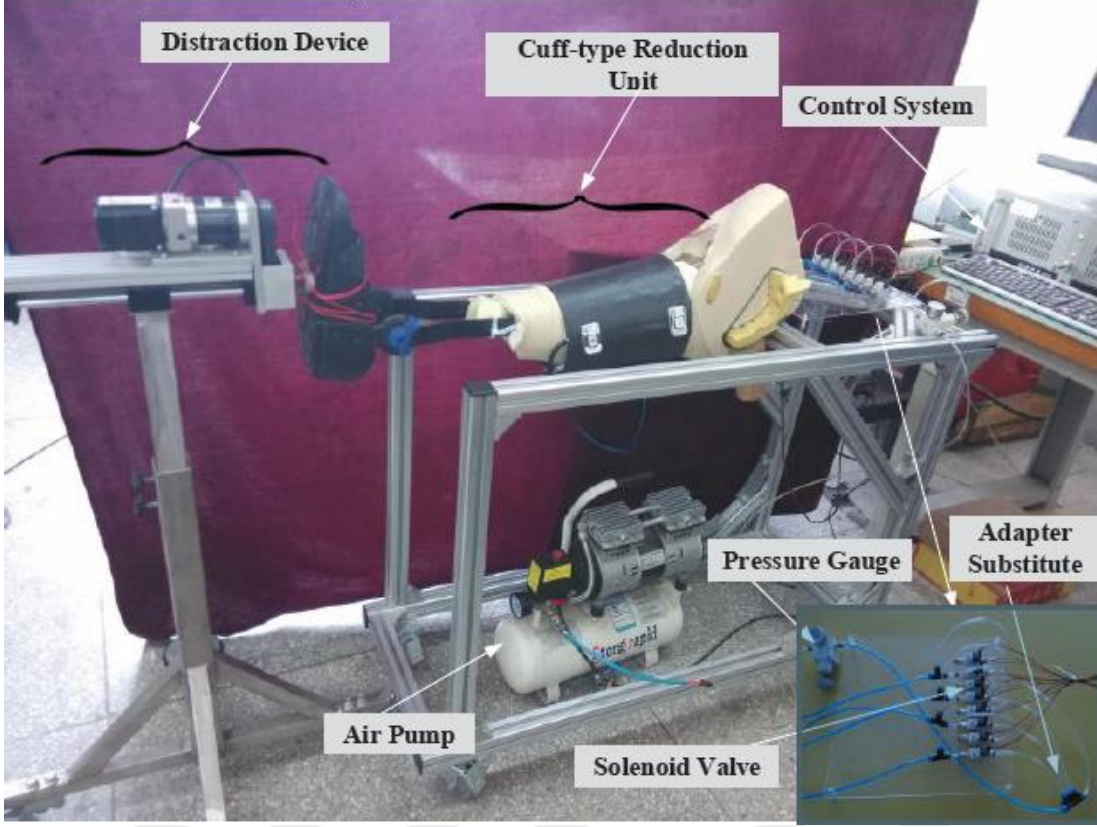


Şekil 1.16. Dagnino ve arkadaşlarının çalıştıkları robota ait (a) Robotun şematik gösterimi (b) Laboratuvarında navigasyon sistemi ile entegrasyon görüntüsü

Kırık olan uzuv uç kısımdan çekilerek, kuvvetin bir noktaya uygulanmayıp, yayılarak uygulandığı redüksiyon işlemi için yaptıkları robotların, redüksiyon hatalarını oldukça azalttıklarını bildiren çalışmalar da mevcuttur. Şekil 1.17.'de ve Şekil 1.18.' bu çalışmalardan örnek görüntüler verilmiştir [64, 65].



Şekil 1.17. Sağlam hasta üzerinde deneme [64].



Şekil 1.18. Robot destekli kırık redüksiyon sistemi [65].

Bu çalışmanın konusu da, harici fiksator kullanılan kemik kırıklarında redüksiyon için gerçekleştirdiğimiz 6 serbestlik derecesine sahip robot ile redüksiyon işlemidir [66].

1.12.2. Medikalde 2D-3D Dönüşümü

Tıbbi alanda teşhis ve tedavi işlemlerinde görüntüleme önemli bir yer tutmaktadır ve bunun önemi her gün artmaktadır. Bununla beraber teknolojiye, bu alanda önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Görüntüleme amacıyla kullanılan en yaygın yöntemler ultrason, X-ışınları, MR, bilgisayarlı tomografi (CT) vb. yöntemlerdir. Bu yöntemlerle geliştirilmiş cihazlar piyasada kullanılmaktadır.

Üç boyutlu görüntüyü elde edebilmek için iki boyutlu görüntüler kullanılır. Kalp damar sisteminin görüntülenmesi ve kemiklerin mevcut durumunun tespiti için X-ışını çok

yaygın kullanılmaktadır. Farklı açılardan çekilmiş iki veya daha fazla iki boyutlu görüntülerden üç boyutlu görüntüleri elde eden birçok çalışma mevcuttur [67-75].

1.12.3. Robotlar İçin Yol Planlama

Robotların ortak özelliklerinden biri hareket etmeleridir. Bazıları mobil olup tamamen hareket ederken, bazıları ise sabit bir noktada durur ama kolu/kolları (manipülator) hareket eder. Her iki tür harekette de bir yol vardır. Amaç, bir başlangıç noktasından başlayarak istenilen hedefe ulaşmaktır. Hedefe ulaşmak için geçilen her nokta yoldur ve çoğunlukla bunun planlanması gerekir.

Eğer yol üzerinde engeller ve/veya kısıtlamalar varsa, bu özellikler dikkate alınarak bir yol planlaması yapılır. Bazen yolun kısa olanının tercih edilmesi gerekir. Aynı zamanda hareketin olduğu yerde hız ve ivme de vardır. Robotun tür ve amacına göre değişmekle beraber hız ve ivmenin de kontrolü gerekir [76-78][79-82].

Robotların kontrolünde yol ve hareket planı önceden hesaplanabileceği gibi, bazen de gerçek zamanlı planlama gerekebilir. Mobil bir robot, yolu ezbere bilmiyor ise bu durumda gerçek zamanlı bir yol ve hız planlaması yapmak zorundadır. Son zamanlarda sürücüsüz araçlar üzerine oldukça yoğun çalışmalar mevcuttur. Araçların kendi kendine park edebilmeleri üzerine geliştirilmiş sistemler piyasada oldukça yaygındır [76-78][79-82].

Tek manipülatorü olan robotlar yanında birden çok manipülatöre sahip robotlar için de yol ve hız planlamaları üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Fabrika ortamı gibi yerlerde hareket eden birden fazla robotun, çarpışmaması ve en kısa yollardan güvenli hareketleri yapabilmesi için bu robotların kontrolünü yapabilen çalışmalar da mevcuttur. [83-90]

Hem robotun takip edeceği yolun hem de bu yol üzerindeki hız ve ivmesinin hesaplanması için değişik yöntemler önerilmektedir. Yapay sinir ağları, genetik algoritmalar (GA), PID kontrolü ve sezgisel algoritmalar ile bu problemlerin çözülmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur [91-95] [96, 97] [83, 98].

Kırık kemiklerin robotla redüksiyonu için de belli bir yolun takip edilmesi gerekir. Aksi takdirde kemik veya kas dokuya zarar verilebilir. Takip edilmesi gereken yol düzgün değilse redüksiyon işlemi başarılı olmayacaktır. Bu amaçla iki parçalı kemik kırıklarının redüksiyonu için çalışmalar yapılmaktadır [57, 99, 100].

1.12.4. PSO Algoritması

Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından 1995 yılında geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş ve balık sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir [101].

PSO, üretilen parçacıkların belirli kuralları takip ederek, muhtemel çözümleri bulmak için rastgele yönlenmesi üzerine geliştirilmiş bir algoritmadır [101-104].

PSO yönteminin, Genetik Algoritmalar (GA) gibi hesaplama teknikleriyle benzer özellikleri bulunmaktadır. Algoritma çözüm için üretilen rasgele bir popülasyon ile başlar ve nesilleri güncelleyerek en uygun olanı arar. GA çaprazlama ve mutasyon gibi evrim operatörleri içermesine rağmen, PSO'da bunlar yoktur. GA ile kıyaslandığında, PSO'nun ayarlanması için daha az parametreye ihtiyaç vardır ve uygulanması daha kolaydır [105].

Çözümü bulmak üzere üretilen tüm parçacıkların, aranılan hedefe göre bir uygunluk değerleri ve hızları vardır. Üretilen bu parçacıklar rasgele bir adım atarlar ve hedefe göre en iyiyi bulmak için güncellenirler. Atılan her adımda tüm parçacıklar iki tane en iyi çözüm değeri ile güncellenirler [101].

- Parçacığın şimdiye kadar elde ettiği en iyi çözüm (P_{id})
- Tüm parçacıklar içerisinde o adıma kadar elde edilen en iyi değer global değer (P_{gd})

Aranılan bu en iyi iki değer bulunduktan sonra, parçacıkların hızları ve konumları sürekli güncellenir.

PSO algoritması en yaygın kullanılanı, hız için atalet ağırlığının da eklenmiş olan hali denklem (1.45) ve konumu bulmak için olanı denklem(1.46)'da verilmiştir [46].

$$v_{id} = w v_{id} + c_1 rand()(P_{id} - x_{id}) + c_2 rand()(P_{gd} - x_{id}) \quad (1.45)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (1.46)$$

Burada; v: parçacık hızı, x: pozisyon, w: atalet ağırlığı, i: parçacık, P: bir önceki parçacığın pozisyonu, d: değişken, t: iterasyon, c1 ve c2: hızlanma (ölçeklendirme, öğrenme) faktörleri, rand [0-1] aralığında rasgele üretilen reel sayıdır.

PSO algoritmasının yukarıda verilen hali temel alınarak, algoritmayı daha da geliştirmek için birçok farklı düzenlemesi yapılmıştır. Yerel minimuma sıkışmamak,

hedefe daha hızlı yaklaşmak, çözümü daha az adımda bulmak üzerine oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Birden çok sürü kullanmak, lideri değiştirmek, birden fazla hedef sorununu aşmak, yeniden başlatmak, türevsel yaklaşmak, yapay sinir ağıyla yaklaşım, genetik algoritmaya uyarlama vb. birçok yöntem önerilerek PSO algoritmasının geliştirilmesi için çalışılmıştır [103, 106-115].

1.13. Tezin Amacı

Kırık kemiklerin tedavisinde kullanılan yöntemlerden birisi de harici fiksator uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda kemiklerin redüksiyon işlemi çoğunlukla elle yapılmaktadır. Robotik uygulamalar için çalışmalar yapılmakta ise de özellikle harici fiksator uygulamalarında kullanılan çivileri tutarak, yapay zekâ algoritmaları ile otomatik redüksiyon yapabilen bir uygulama yoktur. Redüksiyon için robotun tutunacağı çivileri kemiklere sabitleyerek kullananlar olmakla birlikte, bu uygulamalarda fazladan çiviler çakılmaktadır. Bu çalışmada fazladan çivi çakılmadığı gibi, çakılan çiviler de robotun tutması için değil, tedavi yönteminin gereğidir. Robot, zaten çakılı olan çivileri tutarak redüksiyon yapmaktadır. Bu anlamda bu çalışma bir ilktir.

Genç hastalarda, özellikle bacak kırıklarında kaslar güçlü olduğu için, kırık olan kemiğin redüksiyonu oldukça güçtür. Kemik kırıldığından dolayı, kaslar kırık olan kısımları birbirine doğru çeker. Bu kemikleri geriye çekmek oldukça zordur. Güç kullanılarak geriye çekilse bile istenildiği gibi redüksiyon işlemi her zaman tam anlamıyla gerçekleşmeyebilir.

Genellikle C-kollu röntgen cihazı ile görüntüleme yapıp ve farklı açılardan görüntü alınarak kemiğin konumu anlaşılmasına çalışılır. Farklı açılardan alınan iki boyutlu bu görüntülerden üç boyutlu kemiğin konumunu kafada canlandırmak gerekmektedir. Hekim bu konuda tecrübeli ve yetenekli olsa bile, operasyonu beraber gerçekleştirdiği yardımcı sağlık personelinin de aynı özelliklere sahip olması gerekir. Aynı zamanda tüm ekip senkronize hareket edebilmelidir. Aksi takdirde oldukça enerji ve zaman kaybı olacaktır. Ortada hasta, üzerinde hareket edebilmesi gereken bir röntgen cihazı ve etrafta sağlık personeli operasyon gerçekleştirilmeye çalışılır. Dar bir alanda bu işlemlerin yapılması kolay bir iş değildir.

Operasyon süresince kemiklerin konumunu anlayabilmek için doğal olarak sık sık röntgen görüntüsüne ihtiyaç duyulur. Üstelik her bir konumun kontrolü için en az iki

görüntüye ihtiyaç vardır. Sonuçta çok sayıda röntgen görüntüsü alınır. Bu görüntüleme esnasında ortaya çıkan radyasyonu hasta sadece bir operasyon süresince alacaktır, fakat sağlık personeli her operasyonda X-ışınlarına ve/veya ortaya çıkan radyasyona maruz kalmaktadırlar. Alabildikleri tek önlem de kurşun bir yelek giymektir ki, bu da sağlıklı bir korumayı yeterince sağlayamamaktadır.

Bu tezde, harici fiksator kullanılan kemik kırıklarında tedavisinde, redüksiyon işlemi otomatik olarak yapabilen bir robot tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. İki farklı açıdan görüntüler alınır ve bilgisayar ekranına aktarılır. Bilgisayar ekranında hekimin görüntü üzerinde belirli yerleri işaretlemesi istenir ve böylece üç boyutlu görüntü ekranda oluşturulur.

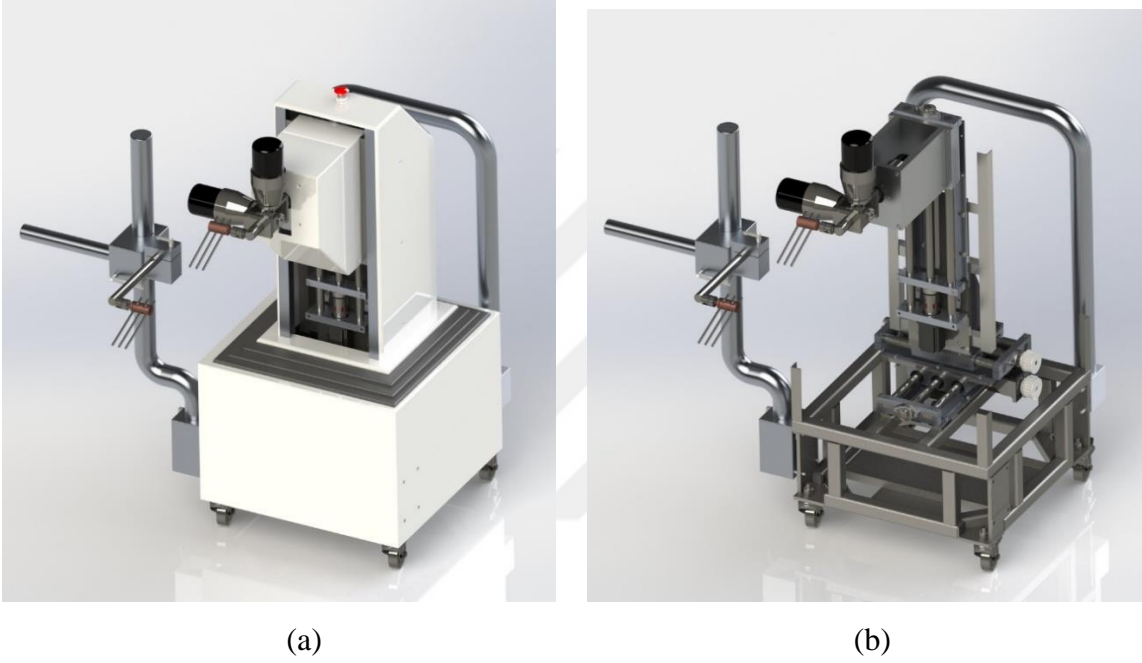
Ekranda görüntülenen kırık kemiklerin redüksiyonu için, yapay zeka çözümleri kullanılarak, hekime kemiklerin redüksiyonunun nasıl yapılacağı simülasyon ile gösterilir. Hekimin de bu işlemi uygun bulması halinde, simülasyonu yapılan redüksiyon işlemi, robot tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Eğer hekim isterse, her aşamada manuel kontrol yapma imkânına da sahiptir. Her aşamada robotun uyguladığı kuvvet kontrol altında tutulur. Böylece güçlü olan robotun hastaya zarar vermesinin önüne geçilir. Uygulanacak maksimum kuvvet hekim tarafından ayarlanabilir.

Böylece, asıl amaç olan kırık kemiklerin redüksiyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olur. Çoğu zaman elle yapılandan daha başarılı sonuçlar alınmıştır. Çünkü robot güçlüdür ve aynı gücü uzun süre boyunca uygulayabilir, insan gibi yorulmaz. Operasyon süresi oldukça kısılacaktır. Dahası, çekilen röntgen sayısı hatırı sayılır ölçüde azalacaktır ve hasta çok daha az miktarda zararlı ışına maruz kalacaktır. Sağlık personeli için ise sıfır radyasyon hedeflenmiştir. Zira röntgen çekilirken sağlık personelinin hastanın yanında olması gerekmez. Görüntüler başka bir odadaki bilgisayara aktarılır ve robotun kontrolü de yine bu odadan yapılır. Hastanın yanında kimsenin olması gerekmez.

Sağlık personellerinin radyasyona maruz kalma miktarı yıl boyunca Sağlık Bakanlığı tarafından sürekli ölçülür ve belli bir sınıra erişmesi durumunda da bu personelin artık radyasyona maruz kalması engellenir. Bu durumda hekimin yapabileceği ameliyat sayısı sınırlanmış olur. Robotun kullanılması durumunda sağlık personeli sıfır radyasyona maruz kalacağından yıl boyunca yapabileceği ameliyat sayısı da artacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kırık kemiklerin redüksiyon işlemlerinde kullanılmak üzere, harici fiksator için kemiğe çakılan çivilerden tutarak, kemiklerin birbirlerine göre konumlarını otomatik olarak düzelten bir robot yapılmıştır. Şekil 2.1’de robotun genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1. Robotun katı model görüntüsü: (a) Dış görünümü, (b) İç görünümü

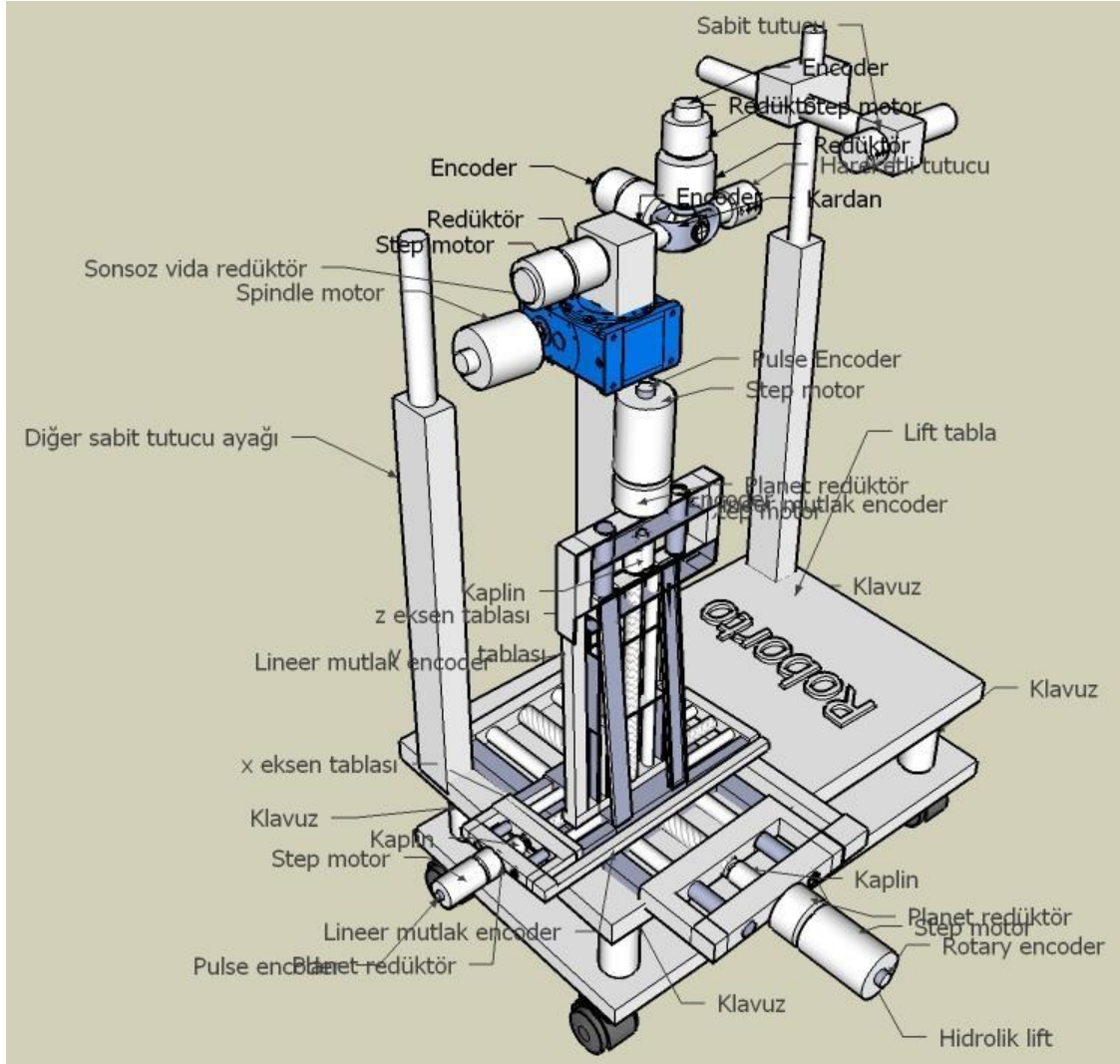
Robot üç eksenle doğrusal ve üç eksenle dairesel hareket yapabilmektedir. Hareketlerin gerçekleştirilmesi için adım motorları kullanılmıştır ve konumları enkoderler ile tespit edilmektedir. Aynı zamanda robotun uyguladığı kuvvet her üç eksenle sürekli olarak ölçülmektedir.

Robot hareketlerini yapan motorları kontrol eden, enkoderlerden konumları ve yük hücrelerinden uyguladığı kuvveti sürekli okuyan bir elektronik devre ile gömülü yazılımları tasarlanmış ve yapılmıştır.

Yapay zekâ ve görüntü işlemeye dayalı bilgisayar yazılımı aracılığı ile hekimin yapacağı işaretlemeler sayesinde, kırık kemiklerin redüksiyonunu otomatik olarak yapabilen medikal bir robot geliştirilmiştir.

2.1. Robot Mekanizması

Robot, hastanın kırık kemiğinin vücuda uzak tarafındaki ağırlığını taşıyabilecek ve kemikleri çekerek birbirinden uzaklaştırabilecek şekilde yapılmıştır. Bu amaçla kemiği istediği yönde öteleme ve döndürme kabiliyetine sahiptir. Robot mekanizmasının basit şeması Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Robotun genel mekanik gösterimi

Robotun iki kolu vardır. Bunlardan biri sabittir ve kırığın vücuda yakın olan kısımdaki çivilerden tutar. Çivileri tutabilmesi için konumu değiştirilir ve çivilere montajı yapıldıktan sonra bu kol sabitlenir. Artık operasyon sonuna kadar bu haliyle kol sabit kalacaktır. Diğer kol ise hareketlidir ve kırığın vücuda uzak olan tarafındaki çivilerden

tutar. Çivileri tutabilmesi için gerekli hareketler ve konum değişiklikleri yapılır ve çivileri tutan vidalar sıkıştırılır. Kırık olan kemiğin her iki parçası artık robotun kollarındadır. Şekil 2.3.'de model kemiğe robotun bağlantısı ve Şekil 2.4.'de manken hastaya uygulanması gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.3. Robotun model kemiğe olan bağlantısının üstten ve önden görünümü: (a) Üstten görünüm, (b) Önden görünüm



Şekil 2.4. Robot bağlantısının manken hastaya uygulanması

2.1.1. Doğrusal Hareket Mekanizması

Üç yönde hareket etmesi için, birbirlerine dik üç adet vidalı mil ile kızak üzerinde kayma işlemi motorlar sayesinde gerçekleştirilir. Kızaklar, kılavuzluk yaparak öteleme hareketinin sürekli aynı eksende kalmasını sağlar. Doğrusal hareket yapılmasını sağlayan bu kızaklar birbiri üzerlerine bindirilmişlerdir. Önden bakıldığında; sağ tarafa olan hareketi +x yönü, bize doğru olan hareketi +z yönü ve yukarıya doğru olan hareketi de +y yönü olarak belirlenmiştir. x ve z doğrultularındaki hareket alanı 150 mm ve y yönündeki hareket alanı ise 300 mm'dir. Doğrusal hareketlerin her iki tarafında birer sonlandırıcı kullanılarak motorların buralara çarpması ve zorlanması engellenmiştir. Aynı zamanda bu sonlandırıcılar sayesinde ihtiyaç duyulduğunda tekrar kalibre işlemi yapılabilmektedir.

Doğrusal yönde olan hareketler birer enkoder ile sürekli okunurlar ve böylece her üç yöndeki konumları ve hareket miktarları sürekli kontrol edilir. Konumlar okunarak da hareketli mekanizmaların kenarlara çarpmaları engellenebilir. Şekil 2.5.'de robotun doğrusal hareket yapabilen mekanizmaları görülmektedir



Şekil 2.5. Robotun doğrusal hareket mekanizmasından bir görünüm

2.1.2. Döner Hareket Mekanizması

Doğrusal hareket yapan mekanizmanın uç kısmında bir kardan mekanizması vardır. Motorlar her üç yönde dönme hareketini bu kardan mekanizması üzerine uygular. Kardan mekanizması içerisinde bir adet istavroz vardır ve dönme hareketleri için merkez burasıdır. Kardan ve istavroz hareket etse de dönme hareketi için merkezi hep aynı noktadır. Şekil 2.6.'de bu kardan mekanizmasının görüntüsü ve Şekil 2.7.'de bu mekanizmaya bağlı olan motorların görüntüsü vardır.



Şekil 2.6. Kardan mekanizması ve istavroz



Şekil 2.7. Robotun dönme hareketi yapan uzvu

Doğrusal hareket yapan motorlar, yük dişlilere bindiğinden dolayı fazla güç ihtiyacı duymazlar. Ağırlığı taşıması ve gerekli hareketleri yapabilmesi için, kullanılmış olan motorlar gerekli gücü sağlayabilmektedirler. Fakat dönme hareketi yapacak olan motorlar dişli üzerindeki mekanizmayı hareket ettirmedeği, direkt olarak bağlı olduğu için daha fazla güç üretmeleri gerekir. Bu olumsuz durumdan kurtulmak için motorların ucuna redüktör

bağlanmıştır. Böylece hem gerekli kuvvet ihtiyacı, hem de daha hassas hareket yapabilmeleri sağlanmıştır.

Dönme miktarını ölçmek için burada da enkoderler kullanılmıştır. Böylece robot kolunun her 3 eksen ile yaptığı açıların ölçümü sağlanmıştır.

2.2. Elektronik Kontrol

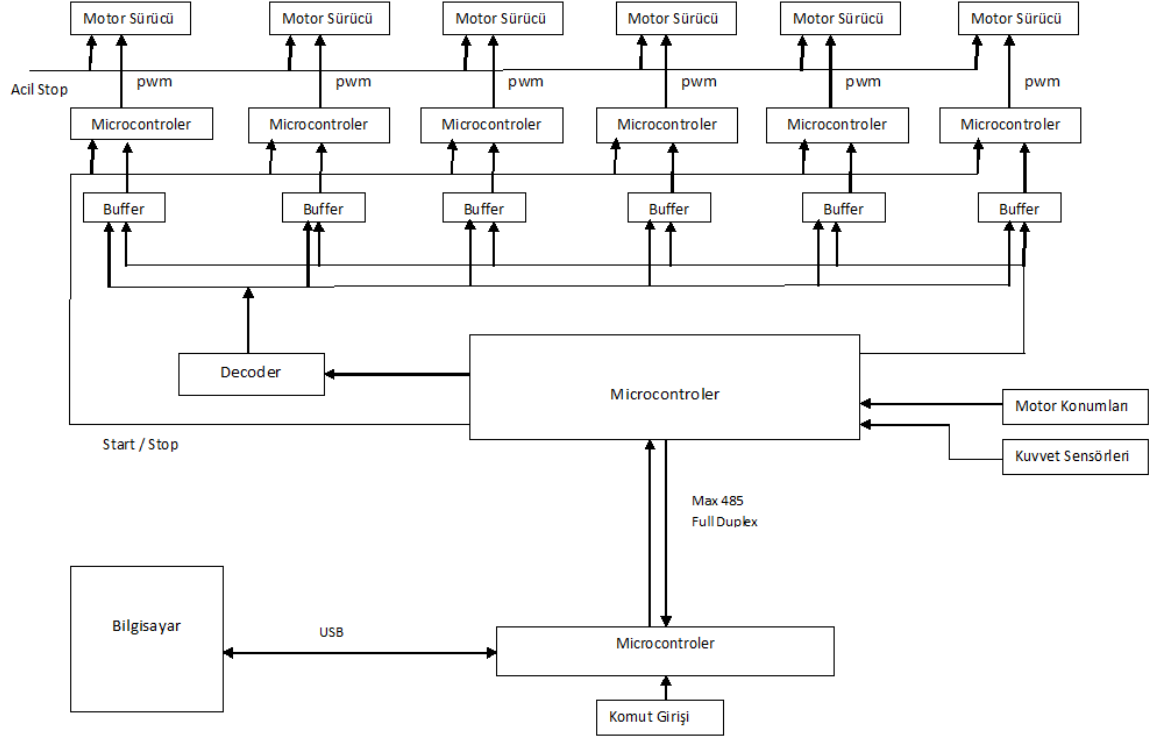
Elektronik bileşenler temelde üç kısımdan oluşmaktadır.

- Ana Devre
- Uzaktan Kumanda
- Sensörler (algılayıcılar) ve motorlar

2.2.1. Ana Devre

Elektronik kontrol devresi üzerinde toplam 7 adet mikrodenetleyici bulunmaktadır. Bu mikrodenetleyicilerden bir tanesi merkezi işlemci olarak kullanılmıştır ve diğer 6 adet mikrodenetleyiciyi bu kontrol etmektedir. Aynı zamanda 6 adet enkoder ve 3 adet yük hücresi (loadcell) de yine bu mikrodenetleyiciye bağlıdır. Enkoderlerden ve yük hücrelerinden gelen veriyi sürekli okur ve uzaktan kontrol ünitesi ile haberleşir. Bilgisayar ile kurulan bağlantı da uzaktan kontrol ünitesi aracılığıyla yapılır. Motorların sınıra dayandığı bilgisini veren sonlandırıcılar da bu mikrodenetleyiciye bağlanmıştır.

Elektronik kontrol ünitesi 6 serbestlik derecesine sahip robotu amacına uygun kontrol etmek için tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Altı adet adım motorunu kontrol amacıyla her bir motoru sürmek için birer adet mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyiciler kendisine gelen bilgiye göre uygun frekansta PWM sinyali üreterek adım motorlarının sürücülerine gönderilir. Her biri için ayrı bir işlemci kullanılarak birbirlerinden bağımsız olarak çalışmaları sağlanmıştır. Bu mikrodenetleyiciler PWM sinyali üretmeleri sırasında normal çalışmalarına devam edebilirler, bu sinyali üretmeleri işlemcinin hızını ve normal çalışmasını etkilemez. Böylece bu işlemciler, adım motorlarını istenilen yönde ve hızda döndürürler, istenildiği zaman da durdururlar. Şekil 2.8'de basit prensip şeması gösterilmiştir.

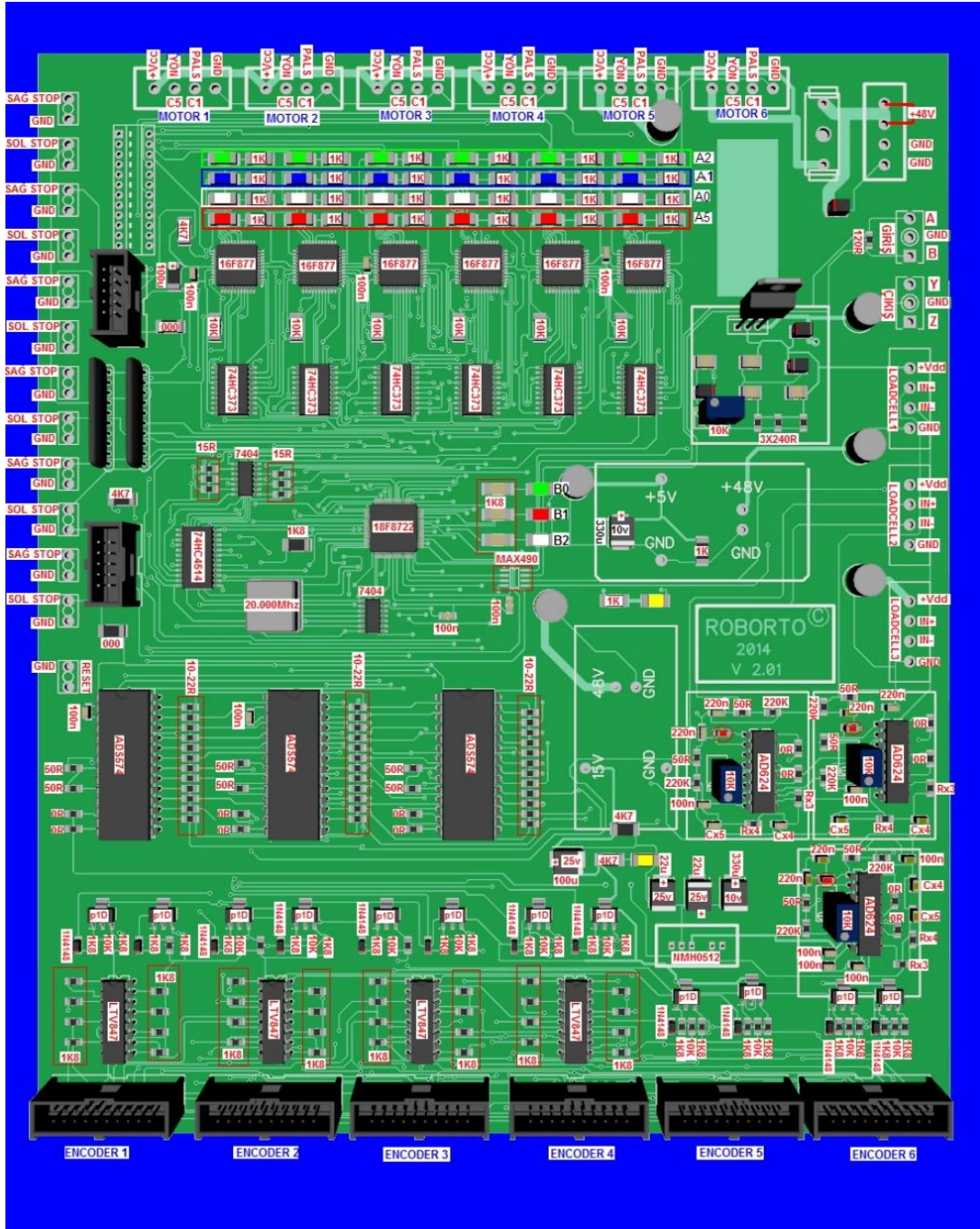


Şekil 2.8. Elektronik devreye ait basit prensip şema

Motorların hareket ettirdiği robot uzuvlarının konumlarını öğrenmek için paralel çıkış veren enkoderler kullanılmıştır. Paralel çıkışlı enkoder kullanılmasının sebebi erişimin daha hızlı olması içindir. Bu enkoderlerden sürekli veri okunarak altı adet konum bilgisi bilgisayara gönderilir.

Motorun uç işlevcisinde oluşan yük veya diğer bir deyişle robotun uyguladığı kuvvet 3 adet yük hücresi ile okunur. Üç adet yük hücresinin kullanılmasının amacı her üç yönde de oluşan kuvveti ölçebilmektir. Şekil 2.9.'da elektronik devrenin görüntüsü verilmiştir.

Elektronik kontrol devresindeki merkezi mikrodenetleyici yazılımı döngü şeklinde çalışır. Önce bilgisayardan gelen komutu okur. Komut içerisinde hangi motorun, hangi yönde ve hangi hızla hareket edeceği bilgisi vardır. Bu bilgileri sırasıyla 6 ayrı buffer üzerine yazar, her buffer bir motora ait hareket bilgilerini içerir. Böylece ana mikroişlemci, diğer mikrodenetleyicilere veri göndermek için herhangi bir senkronizasyonu beklemez, çünkü onlarla direk olarak haberleşmez. Diğer mikroişlemciler de bu bufferları sürekli olarak kontrol eder, yeni gelen veri varsa gereğini yerine getirir. Ana mikroişlemci daha sonra; 6 adet enkoderi, 3 adet yük hücresini ve 6 adet limitörü okur. Tüm bu bilgileri bilgisayara gönderir ve bilgisayardan tekrar komut bekler.



Şekil 2.9. Elektronik kontrol devresi

Motorları kontrol eden mikrodenetleyicilerin, her biri bir bufferı okur ve bu bufferdan aldığı verilere göre motorları kontrol eder. Sonra tekrar buffera bakar yeni veri gelmişse aynı işlemleri sürekli tekrar eder, eğer yeni veri gelmediyse motorları hareket ettirmez, ama bufferı kontrol etmeye devam eder.

2.2.2. Motorlar ve Redüktörler

Robottaki uzuvların hareketini sağlamak amacıyla adım motorları kullanılmıştır. Üç ekseninde öteleme ve üç ekseninde dönme hareketi yapıldığından dolayı, doğal olarak kullanılan motor sayısı da altı adettir. Adım motorunu sürmek için kare dalga üreten sürücüler kullanılmıştır. Sürücüler ise komutu PWM olarak elektronik devre üzerindeki mikrodenetleyicilerden almaktadır. Bu mikrodenetleyiciler yön bilgisini bu sürücülere gönderir. Hız kontrolü ise yine sürücüye gönderilen PWM sinyali ile mikrodenetleyici tarafından sağlanır.

Kullanılan adım motorları 200 adımlıdır ve dolayısıyla her bir adımı 1.8° 'ye karşılık gelmektedir, bu motorlara ait ilgili teknik veriler Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kullanılan adım motorlarının bazı teknik özellikleri

Adım sayısı	200
Adım açısı	1.8°
Tutma torku	3 Nm

Doğrusal harekette kullanılan vidalı milin hatvesi (diş adımı) 3 mm'dir. Kullanılan motorun adım sayısı 200 olduğundan, motorun her adımı için hareket edeceği miktar Denklem (2.1)'de verildiği gibi bulunur.

$$1 \text{ Adımdaki mesafe} = \text{milin hatvesi} / \text{Motorun adım sayısı} \quad x$$

$$1 \text{ Adımdaki mesafe} = 3\text{mm} / 200 = 0,015\text{mm} \quad (2.1)$$

Dönme hareketini yapan motorlarda bölme oranı 160 olan redüktörler kullanılmıştır. Bu sayede motorun adımı 160° 'a bölünürken, uygulayabileceği tork da 160 katına çıkmıştır. Böylece, motorun adım sayısı denklem (2.2)'de ve adım açısı ise (2.3)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Adım sayısı} = \text{Motorun adım sayısı} \times \text{Redüktör oranı}$$

$$\text{Adım sayısı} = 200 \times 160 = 32.000 \quad (2.2)$$

$$\text{Adım açısı} = \text{Motorun adım açısı} / \text{Redüktör oranı}$$

$$\text{Adım açısı} = 1.8^\circ / 160 = 0,01125^\circ \quad (2.3)$$

Görüldüğü üzere kullanılan redüktör sayesinde çok daha hassas hareket edebilme özelliği kazanılmıştır.

Aynı şekilde denklem (2.4)'de de redüksiyon sonrası elde edilecek olan maksimum torku bulma hesabı verilmiştir.

$$\text{Tork} = \text{Motor torku} \times \text{Redüktör oranı}$$

$$\text{Tork} = 3 \text{ Nm} \times 160 = 480 \text{ Nm} \quad (2.4)$$

Kullanılan redüktörler sayesinde, hem daha hassas hareket edilebilmekte hem de çok daha fazla tork çıkışa verilebilmektedir. Eğer redüktör kullanmadan sadece motorun torku ile redüksiyon yapılsaydı, kilosu fazla olan hastalarda hareket mümkün olmayacak ya da istenildiği gibi olmayacaktı. Hastanın ağırlığı motorun üreteceği torku yenecekti. Dahası eğer hasta güçlü kaslara sahipse, kırık kemikleri birbirinden uzaklaşacak yönde istenilen miktarda hareket ettirmek mümkün olmayacaktı. Redüktörler sayesinde hem fazla kilolu hem de güçlü kaslara sahip hastalar için de artık kullanılabilir durumdadır. Burada kemiğe iletilecek torkun ve hareket edebileceği minimum miktarın, istavrozun merkezi ile kemik arasındaki mesafeye bağlı olduğunu da göz önünde bulundurmak gerekir. Bu mesafe her operasyon ve hasta için farklı olacaktır ve yazılım bunları dikkate almaktadır.

2.2.3. Encoder ile Konum Tespiti

Robotun doğrusal ve dairesel yönde yaptığı hareketin ne kadar olduğu ve mevcut konumunun ne olduğunun bilinmesi gerekir. Aksi takdirde robotun otomatik kontrolü mümkün olmaz. Elle yapılan kontrol ve yönlendirmelerde konum gözle kontrol edilebileceği için konum bilgisi mecburi değildir, fakat bu durumda da robotun kemiklere uyguladığı kuvvet hesaplanamaz.

Konum bilgisi, elektronik devre sayesinde enkoderlerden okunarak bilgisayara gönderilir. Bu çalışmada mutlak enkoderler kullanılmıştır. Yani enerji kesintisi olsa bile konumunu unutmaz, enerji yokken hareket etse bile konumunu doğru şekilde bilir. Böylece

robotun enerjisinin her kesilmesinden sonra tekrar kalibre işlemi yapılmasının önüne geçilmiştir.

Kullanılan enkoderler konum bilgilerini dışarıya paralel olarak vermektedir. Paralel çıkış verebilen tipte enkoder tercih edilmesinin nedeni daha kısa sürede verinin okunabilmesine müsaade etmesidir. Seri çıkışı olan enkoderler kullanılsaydı, her bir enkoderi okuma süresi daha fazla olacaktı veya her bir enkoderi okumak için bir tane daha işlemci kullanmak gerekecekti. Her ne kadar, her bir enkoder için ayrı bir işlemci kullanmak bir çözüm olsa da, paralel çıkış verenden kadar hızlı olmayacaktır.

Enkoderler yüksek empedans verebilme özelliğine, diğer bir tanımla tri-state çıkışına sahiptirler. Yani istenildiğinde çıkışa bilgi verirler, aksi durumda ise yüksek empedans durumundadırlar. Bundan dolayı altı adet enkoderin konum bilgisi veren çıkışları birbirlerine paralel olarak bağlanmışlardır. Bu ortak bağlantı da elektronik devre üzerinden mikrodenetleyiciye bağlıdır. Mikrodenetleyici, okumak istediği enkodere uygun sinyali gönderdiğinde çıkışı aktif olur ve o enkodere ait konum bilgisini okur. Mikrodenetleyici sırayla bütün enkoderlerdeki konum bilgilerini okumakta ve sürekli olarak bilgisayara göndermektedir.

Kullanılan enkoderlere ait konum bilgisi 20 bittir. Bu bitlerden 8 adedi tur bilgisini, kalan 12 biti ise tur başına konumunu, yani açısını verir. Bu durumda sayılabilecek tur miktarı 256 olur ki bu da yeterlidir. Doğrusal hareket eden mekanizmada konum tur sayısına bağlıdır, fakat dönme hareketi yapan mekanizmada tur bilgisine ihtiyaç yoktur. Sadece açıyı okumak yeterlidir. 12 bitten oluşan açı bilgisi de 360° 'yi 4096 (2^{12}) değerine bölmek demektir. Bu durumda enkoderler yaklaşık $0,088^\circ$ 'lik hareketi algılayabilmektedirler.

2.2.4. Yük Hücreleri (Loadcell) ile Kuvvet Kontrolü

Robotun uyguladığı kuvveti bilmek bu uygulama için çok önemlidir. İnsanın uygulayabildiğinden daha fazla bir kuvvet kemiklere uygulanabilir ve fazla miktarda kuvvet uygulanması durumunda bunun hissedilmesi zordur. Çünkü mevcut uygulamalarda insan gücü uygulanmaktadır ve sağlık personeli ne kadar bir kuvvet uyguladığını bilir. Ayrıca uygulayabileceği kuvvet genelde kemiklere veya kaslara zarar verecek kadar fazla olmaz. Oysa robotun uygulayacağı kuvvet fazla olabileceği için bir risk taşımaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak, en azından minimize etmek için uygulanan kuvvetin sürekli

bilinmesi ve sürekli kontrol edilmesi gerekir. Bu kadar ciddi bir durum da insanın dikkatine bırakılmamalı, riskli durumlarda hekim uyarılmalıdır. Bu nedenle robotun uyguladığı kuvvet yük hücreleri (loadcell) aracılığıyla sürekli olarak okunur.

Her üç ekseninde uygulanan kuvvet, üç ayrı loadcell ile sürekli olarak okunur ve bilgisayara gönderilir. Bilgisayardaki yazılım tarafından uygulanan kuvvet sürekli olarak gösterilmektedir. Hem görsel büyüklük olarak hem sayısal olarak okunan kuvvetler her üç eksen için ayrı ayrı gösterilir. Ayrıca uygulanacak kuvvetin maksimum miktarı her eksen için bilgisayar yazılımı tarafından belirlenir. Eğer uygulanan kuvvet belirlenen bu maksimum değerlere ulaşılmışsa, robotun o yönde kuvvet artışına müsaade edilmez, o yöndeki hareketi durdurulur. Yazılım ekranda kuvvet sınırlarına ulaşıldığına dair bir uyarı mesajı verir. Maksimum kuvvet sınırlarına ulaşılmayan yönlerde hareketlere izin verilir.

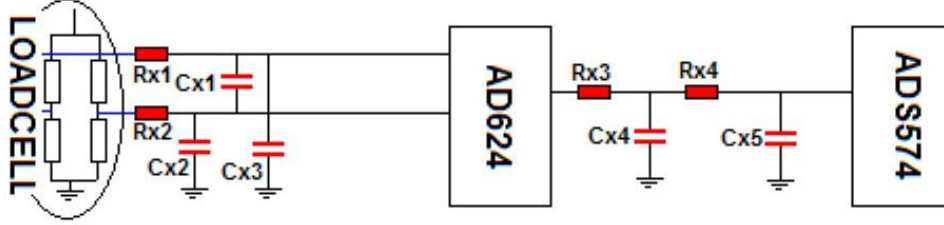
Hastanın yaş ve cinsiyetine göre uygulanması gereken kuvvet farklı olacaktır. Bu nedenle uygulanacak maksimum kuvvet sınırlamasının değişken olması gerekir. Bu nedenle yazılım, kullanıcının kuvvet sınırlarını belirleyebileceği şekilde yapılmıştır. Hekim, maksimum kuvvet değerlerini bilgisayardaki yazılım üzerinden değiştirebilir, hatta her eksen için farklı bir değer belirleyebilir.

Robota gönderilecek her komuttan önce uygulanan mevcut kuvvet kontrol edilir, eğer sınırlara ulaşılmamışsa hareketine izin verilir.

Robotun gövdesi üzerinde, kollarındaki yükü algılayacak şekilde üç adet S-tipi loadcell kullanılmıştır. Her loadcellin sadece bir doğrultuda esnemesi mekanik olarak sağlanmaya çalışılmıştır. Böylece her ekseninde oluşan yük okunabilmektedir. Loadcell'lerin bulunduğu konum ile kuvvetin uygulandığı nokta arasındaki mesafe moment oluşturacağından dolayı önemlidir. Bu nedenle uygulanan kuvvetin doğru hesaplanabilmesi için, kırık kemik ucu ile loadceller arasındaki mesafenin bilinmesi gerekir. Bu mesafelerin robotun gövdesi üzerinde olan kısımları sabittir, fakat harici fiksatorler için kemiklere sabitlenen çivilerin kemik ile olan bağlantısı ve bu çivilerin robota olan mesafeleri her operasyon için farklı olacaktır. Bu mesafeler görüntü işleme ile bulunmuştur ve gerekli işlemler yapılarak kemiklere uygulanan gerçek güç hesaplanmıştır.

Loadcell'lerden gelen analog sinyallerin genlikleri çok düşük olduğundan yükseltilmeleri gerekir. Bu nedenle analog işaret güçlendirildikten sonra ADC (analog dijital dönüştürücü) entegresine gönderilmiştir.

Elektronik devre üzerinde üç adet ve 12-bit çözünürlükte ADC vardır. Devreye yük hücrelerinden gelen analog sinyaller, Şekil 2.10'daki gibi, alçak geçiren filtrelerden geçirilerek gürültüler azaltılmıştır.



Şekil 2.10. Loadcell için alçak geçiren filtre

Kullanılan ADC entegrelerinin çıkışları tri-state özelliğe sahip olduklarından dolayı, veri çıkışları birbirlerine paralel hale getirildikten sonra, merkezi mikrodenetleyiciye bağlanmıştır. ADC entegreleri sürekli çalışma halindedir; mikrodenetleyici, hangisini okumak istiyorsa onun çıkışını aktif etme komutunu gönderir ve ona ait veriyi okur. Sırayla her üç ADC'den gelen veri okunur. ADC entegrelerinden gelen veri paralel olduğundan dolayı, bu işlem hızlı gerçekleştirilmiş olur. Okunan veri sürekli olarak uzaktan kontrol kumandası üzerinden bilgisayara gönderilmektedir.

2.2.5. Uzaktan Kumanda Ünitesi

Uzaktan kumanda ünitesi robotun manuel kontrolü için tasarlanmıştır. Üzerinde bulunan butonlarla her bir motor ayrı ayrı veya aynı anda kontrol edilebilirler. Tasarımı robotu kolay kontrol etmek üzere yapılmıştır. Hangi butonun hangi motoru hareket ettireceği, yani hareketin ne tarafa doğru olacağını kolayca anlaşılması hedeflenmiştir. Robotun hastaya bağlanma yönüne göre (sol taraftan veya sağ taraftan) veya robota bakma yönüne göre algılamada güçlük yaşanabilmektedir. Bu güçlüğü en aza indirebilmek için böyle bir tasarım yapılmıştır. Böylece sağa-sola, ileri-geri, yukarı-aşağı doğrusal ve bu eksenlerin etrafında döner hareketi hangi butonun yapacağı daha kolay anlaşılabilir olmuştur.

Üzerindeki mikrodnetleyici hem robotun ana devresi ile hem de bilgisayarla haberleşir. Bilgisayar yazılımı uzaktan kumanda ünitesinin robotu kontrol etmesi engellenebilmektedir. Fakat her durumda ana devreden gelen veriler sürekli olarak bilgisayardaki yazılıma gönderilmektedir. Aynı şekilde bilgisayar yazılımı da sürekli olarak gerekli bilgileri, uzaktan kumanda ünitesi üzerinden ana devreye göndermektedir. Şekil 2.11.'de uzaktan kumanda ünitesinin resmi verilmiştir.



Şekil 2.11. Uzaktan kumanda ünitesinin dış görüntüsü

2.2.6. Gömülü Yazılımlar

Projenin tamamında 8 adet mikrodnetleyici kullanılmıştır. Bunlardan 7 tanesi ana kontrol devresi üzerinde, bir adedi ise uzaktan kontrol kumandası üzerindedir.

2.2.6.1. Ana Kontrol Devresi Merkezi Mikrodnetleyici Yazılımı

Ana kontrol devresi üzerindeki mikrodnetleyicilerden bir tanesi devrenin yönetilmesini üstlenmiştir, merkezi işlemci gibi çalışmaktadır. Uzaktan kontrol ünitesi ile haberleşir ve diğer tüm işleri kontrol eder.

Üç adet yük hücresinden robotun uyguladığı kuvvetleri, altı adet enkoderden uzuvların konumlarını, altı adet limitörden motorların sona gelip gelmediğini sürekli olarak

okur ve bu bilgileri bilgisayara gönderir. Enkoderler ve ADC'ler tri-state özellikli olduğundan dolayı, hepsinin çıkışları birbirine paralel olarak mikrodenetleyicinin portlarına bağlanmıştır. Bir adet kod çözücü sayesinde, mikrodenetleyici tri-state özelliğine sahip elemanları sırayla seçmekte ve çıkışını aktif ederek ondan gelen veriyi okumaktadır.

Bu mikrodenetleyici motorların nasıl davranacaklarını, motorları kontrol eden mikrodenetleyicilere göndermektedir. Bu gönderme işleminde bağlantı direk olarak iki mikrodenetleyici arasında kurulmamıştır. Çünkü bu durumda senkronizasyon gereklidir ve bunu altı adet mikrodenetleyici için ayrı ayrı yapılması gerekir. Hem senkronizasyon probleminden kurtulmak hem de daha hızlı olabilmek için, mikrodenetleyici göndereceği bilgiyi tampon (buffer) belleklere yazmaktadır. Merkezi mikrodenetleyici, kullanılan kod çözücü ile hangi belleğe yazacağını seçmekte ve altı adet motor için yapılacak işlemleri altı ayrı belleğe yazmaktadır. Motorları kontrol eden mikrodenetleyiciler de bu bellekleri okuyarak yapacakları işleri gerçekleştirmektedirler.

Motorların yapacağı işlerin ne olduğunu ise uzaktan kumanda ünitesi bu mikrodenetleyiciye gönderir. Uzaktan kumanda ünitesiyle full duplex RS-485 katmanı ile haberleşir. Kablosuz bağlantı yapılması daha önce düşünülmüş, hatta bluetooth bağlantısı uygulanmıştır. Fakat yapılan iş önemli olduğundan, ortada kullanılan bir röntgen cihazı bulunacağından ve kablosuz haberleşmeyi bozabileceğinden dolayı, kablolu bir haberleşme daha güvenli olacağı için kablosuz uygulamalardan vazgeçilmiştir. USB ile haberleşmede ise bağlantı mesafesi uzadıkça kalite ve güvenilirlik azalmaktadır, üstelik etraftaki elektrikli cihazlardan olumsuz şekilde etkilenmektedir. Hem güvenilirlik, hem uzun mesafede haberleşebilme, hem de yeterli hızda haberleşebilmek amacıyla full duplex modda çalışan RS-485 bağlantısı tercih edilmiştir.

Aşağıda kontrol devresi üzerindeki merkezi işlemcinin temel algoritması verilmiştir.

- Uzaktan kumanda ünitesinden gelen komutları oku (Max485).
- Konum, yük hücresi (loadcell) ve limitör sensörlerinden bilgileri oku.
- Gelen komutun hareket ettireceği motor, o yönde kuvvet ve mekanik sınırlara gelmemişse, ilgili tampona (buffer) hız ve yön bilgisini yaz. Aksi halde tampona sıfır yaz.
- Konum, yük hücresi (loadcell) ve limitör sensörlerinden bilgileri oku.
- Sensörlerden okunan bilgileri uzaktan kumanda ünitesine gönder (Max485).
- Başa dön.

2.2.6.2. Adım Motorlarını Kontrol Eden Gömülü Yazılımlar

Ana kontrol devresi üzerinde kullanılan mikrodenetleyicilerden altı adedi motorları kontrol etmek için kullanılmıştır ve hepsinde aynı yazılım vardır. Kontrol edilen motora ait bilgiler ana işlemciden alınır. Motorun hareket edip etmeyeceği, hareket edecekse hangi yönde hareket edeceği ve hangi hızla hareket edeceği bilgisini ana işlemci dolaylı olarak bu mikrodenetleyiciye gönderir. Senkronizasyon sıkıntılarından kurtulmak ve daha hızlı çalışabilmesi için, ana işlemciyle direkt haberleşmesi yoktur. Ana işlemci motorun kontrolü ile ilgili bilgileri bir tampona yazar ve motorları kontrol eden mikrodenetleyici de bu bilgileri tampondan okur.

Tampondan alınan verilere göre motor sürücüsüne yön bilgisini ve hızını gönderir. Hız bilgisi bir PWM sinyalidir. Motorun hızı, mikrodenetleyici tarafından üretilen PWM sinyalinin frekansı ile kontrol edilir. PWM sinyalinin üretilmesi sırasında mikrodenetleyici program akışını durdurmaz, çalışmasına devam eder. Sürekli olarak tampondaki veriyi okur ve gereğini yapar.

Aşağıda adım motorlarını kontrol eden mikrodenetleyiciye ait yazılımın temel adımları verilmiştir:

- Tampondaki (buffer) veriyi oku.
- Okunan veri sıfır ise PWM sinyalini durdur ve başa dön.
- Okunan veri sıfırdan farklı ise motoru sürücüsüne yön bilgisini gönder.
- Motorun hızını PWM sinyali ile ayarla ve belirli bir süre uygula.
- Başa dön.

2.2.6.3. Uzaktan Kumanda Ünitesi Gömülü Yazılımı

Uzaktan kumanda ünitesi aslında bir ara devredir. Hem bilgisayar ile hem de ana devre ile haberleşir. Ana devreden gelen bilgileri bilgisayara, bilgisayardan aldığı komut bilgilerini de ana devreye gönderir. Aynı zamanda kendisi de ana devreye komut gönderebilir. Bilgisayarın yakınında olması gerekir, çünkü bilgisayar yazılımı ile beraber çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bilgisayar yazılımını kullanan kişinin, uzaktan kumanda ünitesini de kullanabilmesi amaçlanmıştır. Bilgisayara yakın olduğu için bilgisayarla

haberleşmesi USB protokolü ile yapılmıştır. Ana devreye uzak olduğu için full duplex RS-485 katmanı ile seri haberleşme tercih edilmiştir.

Bilgisayardan gelen komutları USB'den alır ve robotun yanındaki ana devreye gönderir. Aynı şekilde robottan gelen tüm veriyi RS-485 katmanı ile alır ve USB üzerinden bilgisayara gönderir. Bilgisayardaki yazılım motorların hareket edip etmeyeceğine, hızına ve yönüne karar verir.

Uzaktan kumanda devresinin kendisi de motorları kontrol edebilir. Üzerindeki butonlar kullanılarak istenilen motorun istenilen yönde hareketi sağlanabilir. Fakat bilgisayardaki yazılım motor ve/veya motorları kilitlemiş ise kumandadaki butonlar bu durumda görev yapamaz. Kontrol edilecek motorun hangi hızda hareket edeceğine de bilgisayar yazılımı karar verir, uzaktan kumanda ünitesinin hız kontrolü yetkisi yoktur.

Bilgisayar yazılımı otomatik olarak kemikleri redüksiyon edebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle redüksiyon işleminde uzaktan kumanda ünitesinin kontrol etmesine ihtiyaç yoktur. Fakat hekim otomatik redüksiyonu değil de elle kontrolü tercih ederse, bu durumda uzaktan kumanda ünitesi üzerindeki butonlarla bu işi yapabilir. Ayrıca, redüksiyon işlemi başlamadan, hastanın kırık kemiklerinin robota bağlanması için robot kolunun istenilen yere getirilmesi gerekir. Bu durumda elle (manuel) kontrol gerekir. Elle kontrol uzaktan kumanda ünitesi üzerinden yapılabileceği gibi, yazılım üzerinden de yapılabilir, fakat uzaktan kumanda ile kontrol etmek daha kolaydır.

Uzaktan kumanda ünitesindeki mikrodenetleyici yazılımının temel adımları aşağıda verilmiştir:

- Bilgisayardan gelen komutları oku (Her bir motor için hız ve yön bilgisi gönderilir). (USB)
- Butonlardan aktif olanları belirle. Gönderilecek hız ve yön bilgilerini hazırla (Bilgisayardan gelen hareket bilgilere, buton bilgileri eklenir).
- Motorlar için hız ve yön bilgilerini ana kontrol devresine gönder (Max485).
- Ana kontrol devresinden gelen verileri oku (Konumlar, kuvvetle ve limitörler). Bu bilgiler sadece transfer için okunur, işlem yapılmaz. (Max485).
- Gelen verileri bilgisayara gönder (USB).
- Başa dön.

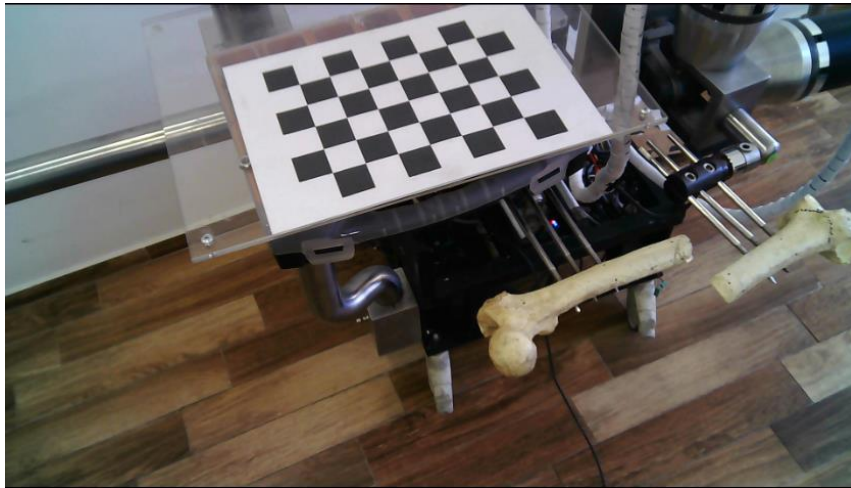
2.2.7. Bilgisayar ile Bağlantı

Robotu yöneten ve robota ait sensörlerden veri alan ana devre bilgisayar ile uzaktan kumanda ünitesi üzerinden haberleşir. Uzaktan kumanda, ana devre ile RS-485 ve bilgisayar ile USB protokolü üzerinden iletişim kurar. Uzaktan kumanda ünitesi bilgisayarın yanında olduğu için mesafe USB bağlantısı için uygundur. Uzaktan kumanda devresi ile robot arasındaki mesafe USB için fazla uzundur. Bu nedenle daha güvenli olan full duplex RS-485 bağlantısı tercih edilmiştir.

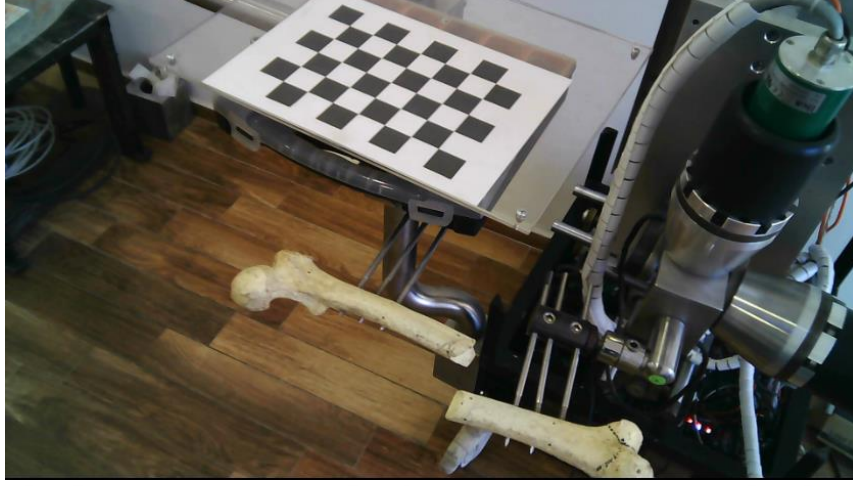
2.3. İki Adet 2D Görüntüden 3D Koordinat Bulma

Bölüm 1.9.'de anlatılan yöntemler ve işlemlerin uygulanması bu bölümde anlatılmıştır. Denemelerden birine ait detaylar ve elde edilen sayısal sonuçlar verilmiştir. Uygulamalarda OpenCV Kütüphanesi ve Python programlama dili kullanılarak kamera kalibrasyonu yapılmış, kamera ve projeksiyon matrisleri elde edilmiştir. Delphi programlamayla, elde edilen bu matrislerden 3D koordinatlar hesaplanmış ve OpenGL'e aktararak gösterilmesi sağlanmıştır.

Robotun otomatik redüksiyon yapabilmesi için, kırık olan kemiklerin konum ve koordinatlarının bilmesi gerekir. Epipolar geometrinin gereği iki farklı açıdan 2D görüntü gereklidir. Bu amaçla, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13.'de görüldüğü üzere kırık olan kemiklere ait iki adet görüntü farklı açılardan alınmıştır.



Şekil 2.12. Kırık kemiklerin sol tarafından çekilen görüntüsü.



Şekil 2.13.Kırık kemiklerin sağ tarafından çekilen görüntüsü.

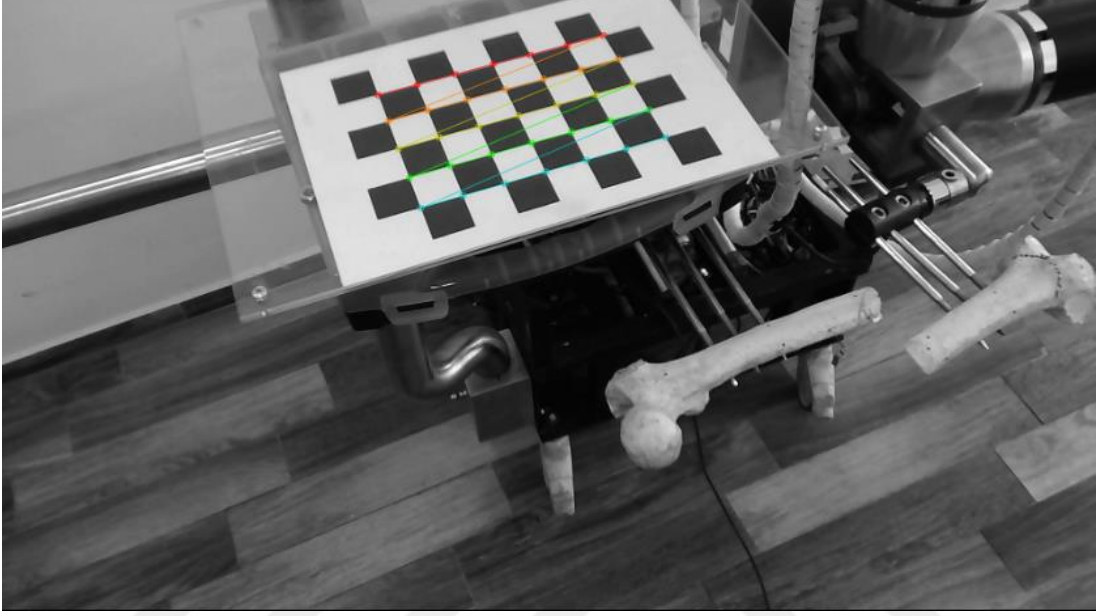
Resim üzerindeki bir noktanın 3D koordinatını bulabilmek için, iki farklı açıdan alınan görüntüler ve bu görüntüleri alırken kullanılan kameraların iç ve dış parametreleri gereklidir. Burada görüntü almak için kullanılan kamera aynıdır. Bu nedenle bir tane kamera matrisinin bulunması yeterlidir. Her iki görüntüyü alırken tek kamera kullanıldığından dolayı, kameranın konumu değişecektir. Bu nedenle de dış parametreler her iki görüntü için farklı olacaktır.

Gerekli olan hem iç hem de dış parametreleri bulabilmek için satranç tahtasından faydalanılmıştır. Kenar uzunluğu ve sayıları bilinen karelerden oluşan satranç tahtası, alınan görüntüdeki piksellerle uzaydaki koordinatlarının birimlerini birbirine uyarlamak için kullanılmıştır. Kullanılan satranç tahtasındaki karenin bir kenarının uzunluğu milimetre (mm) cinsinden bilindiği için, resimde bunların piksel cinsinden oranlarını bulunabilir. Böylece, kamera matrisi, iç ve dış parametreler bu sayede elde edilebilir [27]. Tablo 2.2.'de kullanılan satranç tahtasına ait özellikler verilmiştir.

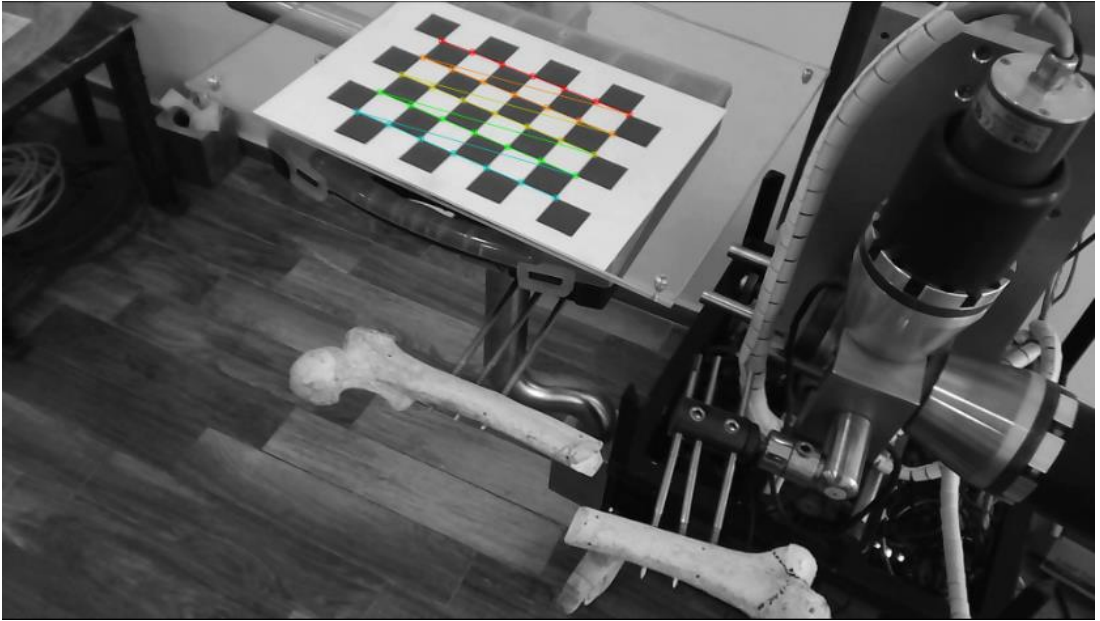
Tablo 2.2. Uygulamada kullanılan satranç tahtasının özellikleri

Satır sayısı	6 adet
Sütun sayısı	8 adet
Her bir karenin uzunluğu	29 mm

Python kodları ile OpenCV Kütüphanesi kullanılarak, satranç tahtası üzerindeki karelerin kesişim noktaları belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalar arasındaki mesafeler iç ve dış parametrelerin değerlerini bulmamızı sağlayacaktır. Şekil 2.14. ve Şekil 2.15.'de her iki görüntüdeki satranç tahtası üzerinde bulunan bu noktalar gösterilmiştir.

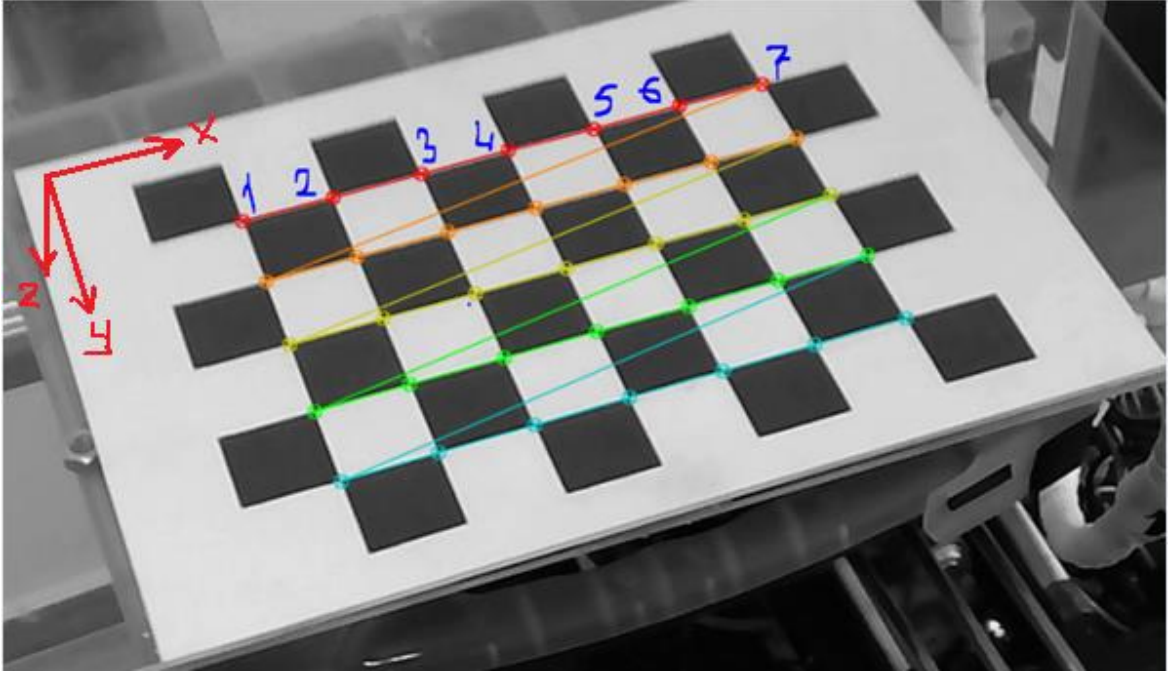


Şekil 2.14. Sol taraftan alınan görüntüde tespit edilen köşeler



Şekil 2.15. Sağ taraftan alınan görüntüde tespit edilen köşeler

OpenCV satranç tahtasının başlangıç noktası olarak Şekil 2.16.'da gösterildiği gibi, kırmızı çizginin ilk noktasını başlangıç olarak kabul eder. Bu noktanın koordinatı $(0, 0, 0)$ olarak işaretlenir. Satranç tahtasının düzlemi z-eksenine paralel olacak şekilde orijine yerleştirilmiştir. Tahta üzerinde tüm noktalar için $Z=0$ 'dır ve z-ekseninin yönü resme göre yukarıdan tahtanın içine doğrudur. Kareler de x ve y-eksenlerine paraleldir ve bu eksenlerin yönleri Şekil 2.16.'de gösterildiği gibidir. Bu kabullenmelerden sonra artık işaretlemiş her bir noktanın koordinatı bulunmuş olur, çünkü her bir karenin kenarları 29 mm'dir. Bu durumda kameraya ait tüm parametreler hesaplanabilir. Tabi ki burada görüntünün de piksel boyutları önemlidir. Çünkü mm ile piksel arasında bağıntı kurulmaktadır. Buradaki resimler 1920x1440 piksel ebatlarındadır.



Şekil 2.16. Eksen yönleri ve satranç tahtasında köşelerin numaralandırılması

Kesişim noktaları bulunduktan sonra yine OpenCV Kütüphanesi sayesinde kamera matrisi bulunur. Denklem (2.5)'de bulunan kamera matrisinin değerleri verilmiştir. Her iki görüntü aynı kamera ile çekildiğinden dolayı, bir tane kamera matrisi yeterlidir. Denklem (2.6)'da sol taraftan alınan görüntüyü çeken kameranın döndürme matrisi ve denklem (2.7)'de ise bu kameraya ait öteleme matrisi verilmiştir. Denklem (2.8)'de sağ taraftan görüntü alan kameranın rotasyon matrisi ve denklem (2.9)'da bu kameranın öteleme matrisi verilmiştir.

Kamera Matrisi:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1964.6738 & 0.0 & 963.16745 \\ 0.0 & 2132.6224 & 734.6156 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Birinci görüntüye ait döndürme (rotasyon) matrisi

$$[R^1] = \begin{bmatrix} 0.94137 & 0.3358 & 0.0318 \\ -0.2722 & 0.7004 & 0.6597 \\ 0.1992 & -0.6297 & 0.7508 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Birinci görüntüye ait öteleme (translation) matrisi

$$[t^1] = \begin{bmatrix} -124.0845 \\ -142.9427 \\ 808.6240 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

İkinci görüntüye ait döndürme matrisi

$$[R^2] = \begin{bmatrix} 0.8670 & -0.4943 & -0.0613 \\ 0.3807 & 0.5781 & 0.7216 \\ -0.3212 & -0.6490 & 0.6895 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

İkinci görüntüye ait öteleme (translation) matrisi

$$[t^2] = \begin{bmatrix} -89.6412 \\ -212.8966 \\ 930.0260 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Kamera matrisi ve kameralara ait dış matris Python içerisinde bir text dosyasına kaydedilirler. Delphi ile bu text dosyası okunarak, bu matrislerden projeksiyon matrisi elde edilir. Bundan sonraki tüm işlemler Delphi ile gerçekleştirilmiştir.

Öteleme matrisi, döndürme matrisinin sağına sütun olarak eklenerek dış parametre matrisi bulunmuş olur. Denklem (2.10)'da sol taraftan alınan görüntü alınırken kameraya ait dış parametre matrisi, denklem (2.11)'de ise sağ taraftan görüntü alan kameraya ait olanı verilmiştir.

$$[R^1|t^1] = \begin{bmatrix} 0.9413 & 0.3358 & 0.03181 & -124.0845 \\ -0.2722 & 0.7004 & 0.6597 & -142.9427 \\ 0.1992 & -0.6297 & 0.7508 & 808.6240 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

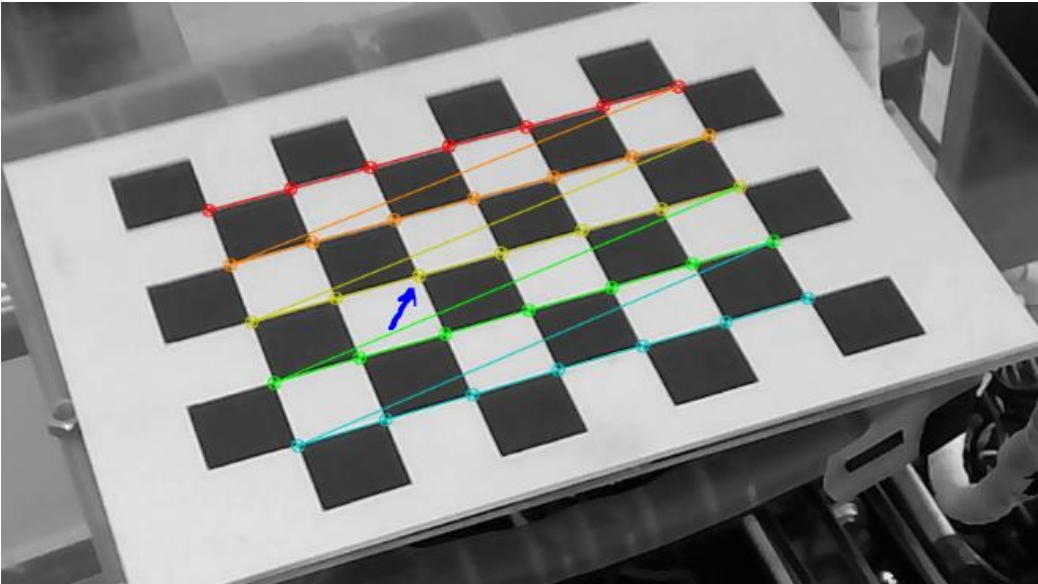
$$[R^2|t^2] = \begin{bmatrix} 0.8670 & -0.4943 & -0.0613 & -89.6412 \\ 0.3807 & 0.5781 & 0.7216 & -212.8966 \\ -0.3212 & -0.6490 & 0.6895 & 930.0260 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Projeksiyon matrisi de kamera matrisi ile dış parametre matrisinin çarpımı ile edilir. Denklem (2.12) ve (2.13)'de sırasıyla soldaki ve sağdaki kameralara ait elde edilen projeksiyon matrisleri yuvarlatılarak verilmiştir.

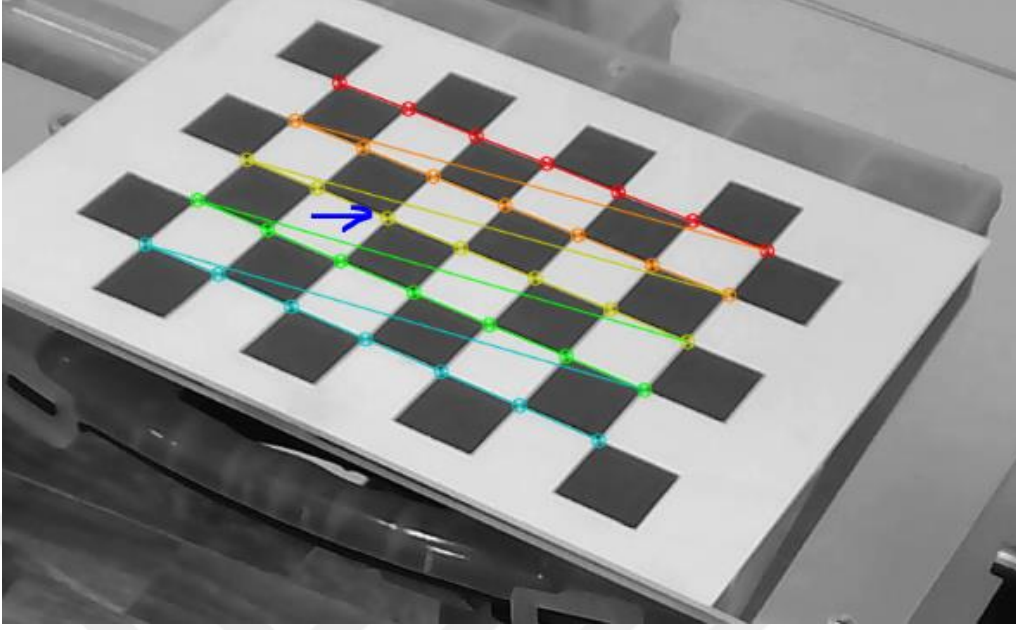
$$[P^1] = \begin{bmatrix} 2041,440 & 53,327 & 785,692 & 535054,749 \\ -434,118 & 1031,262 & 1958,514 & 289185,089 \\ 0,199 & -0,6297 & 0,75081 & 808,624 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[P^2] = \begin{bmatrix} 1394,044 & -1596,505 & 543,550 & 719655,033 \\ 575,928 & 756,135 & 2045,557 & 229183,631 \\ -0,321 & -0,649 & 0,689 & 930,026 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Bundan sonraki aşamada denklem (1.31)'de verilenlere göre A matrisi oluşturulur. Bunun için her iki görüntüde aynı noktanın işaretlenmesi gerekir. Şekil 2.17. ve Şekil 2.18.'de gösterilen nokta fare (mouse) ile tıklanarak seçilmiştir.



Şekil 2.17. Sol taraftan alınan görüntüde işaretlenen nokta



Şekil 2.18. Sağ taraftan alınan görüntüde işaretlenen nokta

Seçilen noktaların 2D resimlerdeki koordinatları sol taraftan çekilen için (838, 414) ve sağ taraftan çekilen için ise (810, 352) olarak bulunmuştur. Bu değerler denklem (1.31)'de yerine konulduğunda A ve B matrisleri için denklem (2.14) ve (2.15)'de verilen sonuçlar bulunmuştur.

$$[A] = \begin{bmatrix} -1874,441 & -581,023 & -156,492 \\ 516,621 & -1291,961 & -1647,668 \\ -1654,296 & 1070,739 & 14,964 \\ -689,025 & -984,616 & -1802,844 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 142572,19 \\ 45585,260 \\ 33666,093 \\ 98185,549 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Bu durumda $[A] [X] = [B]$ eşitliğindeki A ve B matrisleri bilinmektedir. A matrisi 4x3 boyutunda olduğu için tersi alınamaz, bu sorunu çözmek için transpozunu (evriği) ile kendisi çarpılarak A matrisi kare matris haline getirilir. Denklem (1.32), (1.33),(1.34)'deki eşitlikler uygulandığında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$A^T = \begin{bmatrix} -1874,441 & 516,621 & -1654,296 & -689,025 \\ -581,023 & -1291,961 & 1070,739 & -984,616 \\ -156,492 & -1647,668 & 14,964 & -1802,844 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.17)$$

$$X = \begin{bmatrix} -0,00037 & 0,00009 & -0,00014 & -0,00005 \\ -0,00062 & -0,00006 & 0,00063 & 0,00011 \\ 0,00043 & -0,00024 & -0,00041 & -0,00037 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 142572,19 \\ 45585,26 \\ 33666,093 \\ 98185,549 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 58,0346437 \\ 58,11949625 \\ 0,425397933 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'de görüldüğü üzere aradığımız 3D koordinatlarımız elde edilmiştir. Burada uygulanan çözüm için SVD (Tekil Değer Ayrışımı) yöntemi de kullanılabilir. Eşitliğin sağ tarafı sıfır olduğunda en kolay çözüm SVD yöntemidir. Buradaki örnekte sağ taraf sıfır olmadığından SVD yöntemine ihtiyaç duyulmamıştır.

Satranç tahtasının her bir karesinin bir kenarını 29mm olduğuna göre Şekil 2.17. ve Şekil 2.18.'de işaretlenen koordinat x ve y-yönlerinde ikişer kare mesafede olduğu görülür. Yani bulmamız gereken koordinatlar milimetre cinsinden (58, 58, 0) olmalıdır. Tablo 2.3.'de bu sonuçlar ve farkları verilmiştir.

Tablo 2.3. Seçilen noktanın gerçek ve hesaplanan değerleri

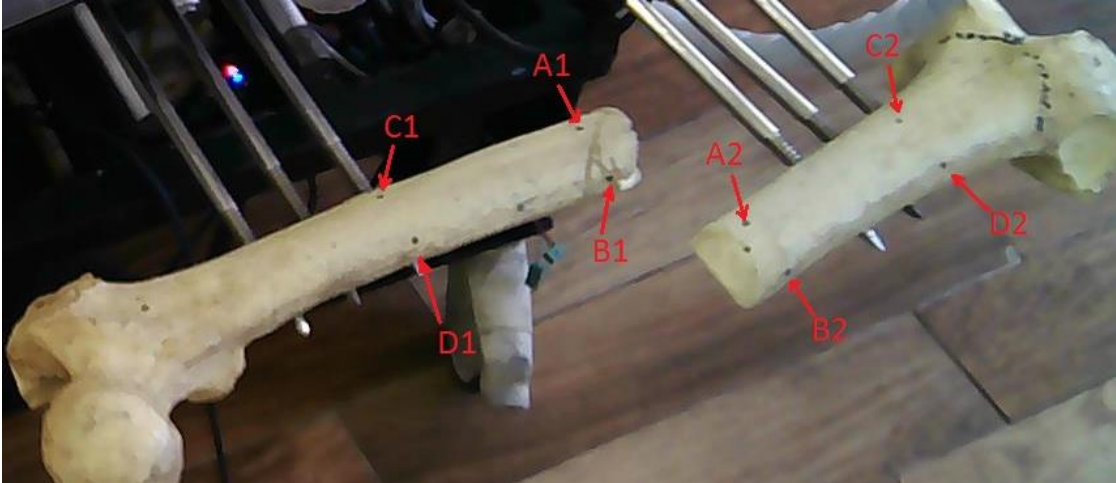
	Gerçek Konum (mm)	Hesaplanan Konum (mm)	Fark (mm)
X	58,0	58,034906057429	0,0349060574289979
Y	58,0	58,1203217331221	0,120321733122097
Z	0,0	0,42481738966539	0,42481738966539

Görüldüğü üzere gerçek değerler ile hesaplanan değerler arasındaki fark 1mm'den daha azdır. Bu farkın sebebi kameraya ait matrislerden kaynaklanabileceği gibi, işaretlerken yapılan hatadan da kaynaklanabilir. Herhangi nedenden olursa olsun buradaki hata kabul edilebilirdir ve sonuç oldukça başarılıdır. Daha hassas sonuçlar istenirse farklı açılardan alınan görüntü sayısı artırılarak aynı işlemler tekrarlanabilir. Bu durumda aynı noktayı işaret eden girdi sayısı artacağından daha iyi sonuçlar elde edilecektir.

2.4. Kırık Kemiklerin 3D Koordinatlarının Bulunması

Kırık kemiklerin bilgisayar ortamında görüntülenebilmesi ve otomatik redüksiyonun yapılabilmesi için 3D koordinatlara ihtiyaç vardır. Koordinatlar doğru olarak belirlendiğinde bilgisayardaki görüntü ile gerçekte kemiklerinin birbirlerine göre konumları aynı olacaktır. Bu nedenle kemiklerin konumlarını bilmek gereklidir. Kemikleri bilgisayar ortamında modelleyerek görüntülemek için değişik yöntemler kullanmak mümkündür. Bu çalışmada kullanılan yöntem aşağıda anlatılmıştır.

Kemiklerin konumlarını bilgisayar ortamına aktarabilmek için, kırık olan her bir parça üzerinde dört adet nokta işaretlenmiştir. Bu dört nokta ile kemikleri silindir şeklinde çizmek mümkün olacaktır. Yapılan denemelerde fotoğraf görüntüleri kullanılmıştır, fakat gerçekte röntgen görüntüleri kullanılacaktır. Röntgen görüntüleri renkli değil, siyah beyaz ve aradaki gri tonlamalardan oluşur. Kemiğe çakılan çiviler ile kemiğin dış kısmı iki yerde kesişir (giriş-çıkış). Bu noktaların röntgen görüntülerinden tespit edilmesi kolaydır. Bu nedenle bu benzetim yoluna gidilmiştir. Fakat çalışılan resim, röntgen görüntüsü olmadığı için, kesişim yeri tam olarak belirlenemez. Bu nedenle kemik üzerine kalem ile işaretlenmiş olan noktalar kullanılmıştır. Şekil 2.19.'da bu noktalar işaretlenerek gösterilmiştir. Bu işaretlemeler hem soldan hem de sağdan çekilmiş olan her iki görüntünün üzerinde işaretlenmesi gerekir.

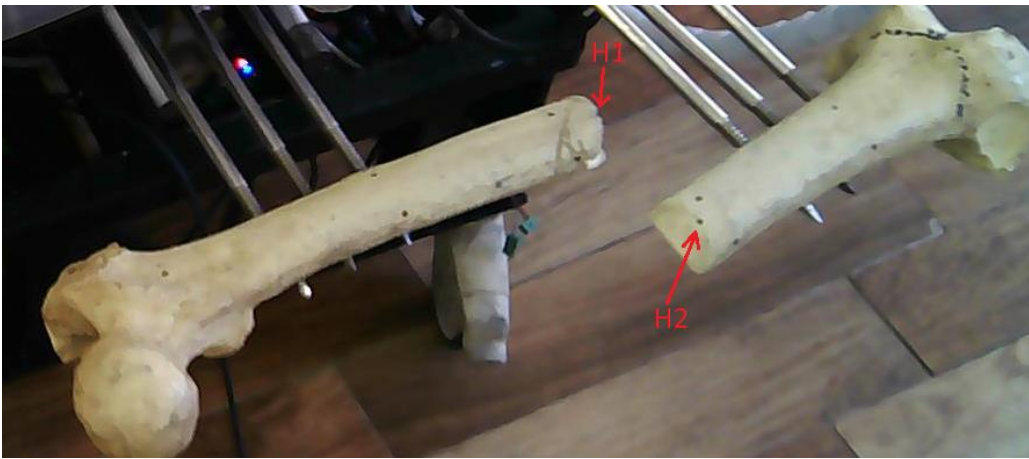


Şekil 2.19. Kemikler üzerinde işaretlenmesi gereken noktalar

Her iki resimde de işaretlenen bu noktalar sayesinde her bir noktanın 3D koordinatları elde edilmiş olur. A1, B1, C1, D1 noktaları ile temsil edilen kırık kemik parçası robotun sabit olan koluna bağlanmıştır, operasyon boyunca da bu kısım sürekli sabit kalacaktır. A2, B2, C2, D2 noktaları ile temsil edilen kemik parçası da robotun hareket edebilen koluna bağlanmıştır ve kemiklerin redüksiyonu için bu parça hareket ettirilmiştir. Buradan elde edilen noktalar Delphi Programlama Dili kullanılarak, OpenGL ile görüntülenmiştir. Görüntüleme işleminde kemiklerin şekilleri silindir olarak kabul edilerek çizdirilmiştir.

Bunun için A1 ve B1 noktaları çemberin karşılıklı iki noktası olarak kabul edilmiştir. Bu iki noktanın ortası çemberin merkezi, iki nokta arasındaki mesafe de çemberin çapı olarak belirlenmiştir. C1 ve D1 noktaları da bir başka çember olarak kabul edilmiştir ve aynı işlemler bu iki noktaya da uygulanarak merkezi ve çapı bulunmuştur. Daha sonra bu iki çember arasında silindir çizilmiştir. Silindir çizme işlemi aynı şekilde A2, B2, C2, D2 noktaları ile temsil edilen hareketli kemiğe de uygulanmıştır ve bu kemik için de OpenGL'de bir silindir çizilmiştir.

Kemiklerin otomatik redüksiyonu için bir noktaya daha ihtiyaç vardır. Bunun için de kırık kemiğin her iki parçası üzerinde birer nokta daha işaretlenmiştir. İşaretlenen bu noktaların otomatik redüksiyon işlemi sonucunda birbirlerine değmesi hedeflenmektedir. H1 ve H2 olarak adlandırılan bu noktalar, hekim tarafından kemiklerin birbirine değmesi gereken noktaları olarak, kemiğin uç kısımlarında uygun yerlerde işaretlenmelidir. Şekil 2.20.'de denemelerde kullanılan H1 ve H2 noktaları gösterilmiştir.

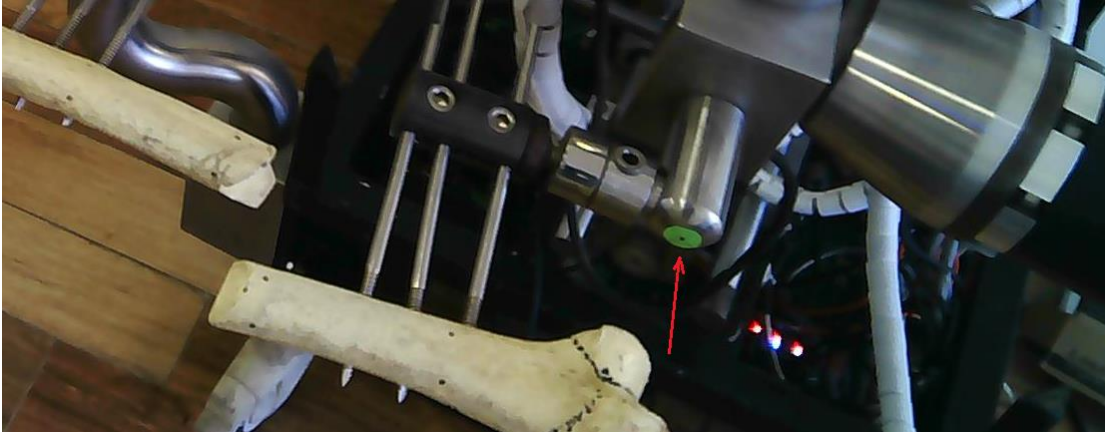


Şekil 2.20. Hareketli ve sabit kemik üzerindeki hedef noktalar

Kırık olan kemiğin her iki parçası üzerinde toplamda beşer tane nokta işaretlenmiştir. Bunların haricinde bir noktaya daha ihtiyaç vardır. Bu nokta satranç tahtasının koordinat sisteminden, robotun koordinat sistemine geçiş yapmak amacıyla kullanılmıştır. Sağ ve sol taraftan çekilen her iki resim üzerinde bu noktalar işaretlendikten sonra, artık otomatik redüksiyon için gerekli olan işaretlemeler tamamlanmış olur. Bundan sonraki hesaplama ve işlemler için başka bir işaretlemeye gerek yoktur.

2.5. Kemik Koordinatlarının Robot Koordinatlarına Uyarlanması

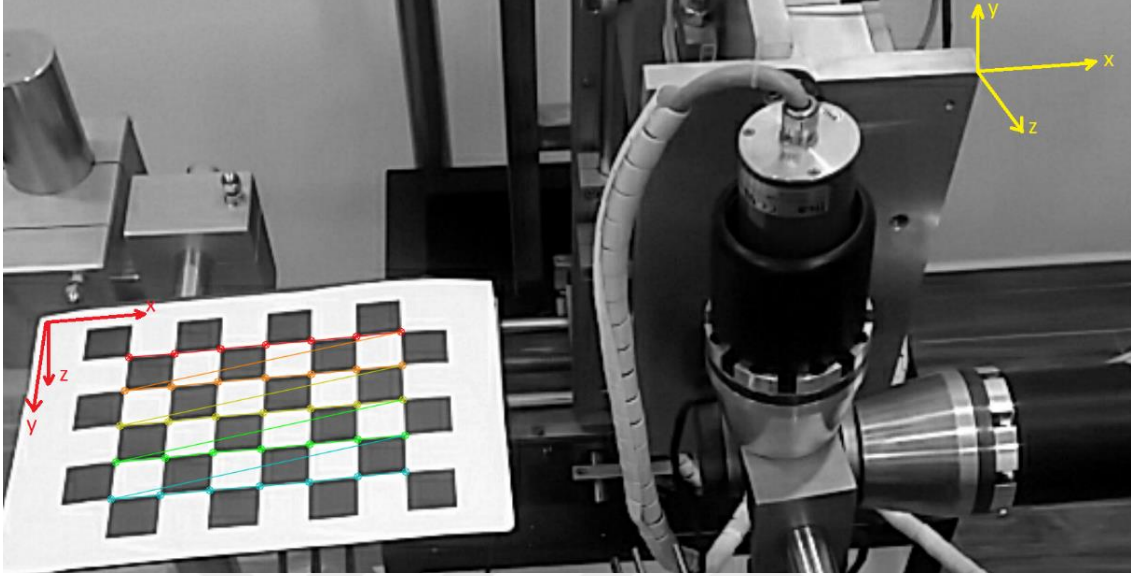
Kırık kemikler üzerindeki işaretlemelerle elde edilen noktaların 3D koordinatları, referans noktası olarak satranç tahtası üzerinde OpenCV kütüphanesi üzerinden Python yazılımı ile elde edilen ilk noktayı alır. Yani işaretlenen tüm noktaların koordinat bilgileri, referans olarak alınan bu noktayı (0, 0, 0) kabul ederek hesaplanmıştır. Fakat robota ait bir koordinat bilgisi henüz yoktur. Robot, kendi koordinatına göre bu noktaları bilmediği sürece herhangi bir işlem yapamaz. Bu nedenle elde edilen tüm koordinat bilgileri robotun koordinat sistemine göre uyarlanmalıdır. Bunun için de robot üzerinde bilinen bir noktaya ihtiyaç vardır. Bu amaçla robot üzerinde Şekil 2.21.'de gösterilen nokta, robota ait referans noktası olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.21. Robota ait referans noktası

Robotun koordinat sistemindeki x,y ve z-eksenleri ile satranç tahtasının eksenleri birbirlerinden farklıdır. Satranç tahtası robotun X-Z düzlemine paralel ve y-eksenine dik

olarak yerleştirilmiştir. Şekil 2.22.'de kırmızı renk ile satranç tahtasının ve sarı renk ile de robotunun eksenleri ve yönleri gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Eksen yönleri: kırmızı satranç tahtası, sarı robot

Resimlerden de görüldüğü üzere iki tane eksen takımı oluşmuştur. Bu durumda yapılması gereken, satranç tahtasının eksen takımını, robotun eksenlerine uyarlamaktır. x-ekseni her ikisi için de aynıdır, bir değişiklik yapmaya gerek yoktur. Satranç tahtasındaki y-ekseni, robotun koordinat sistemine geçirilirken z-ekseni olarak alınır. Her ikisinin de yönleri aynı olduğundan bir işaret değişimi olmaz. Satranç tahtasının z-ekseni ise, robota uyarlanırken y-ekseni olarak alınır, fakat yönleri ters olduğundan burada işaret de değişir.

Eksenler dönüştürüldükten sonra, robotun orijin noktasına göre ayarlama da gereklidir. Çünkü robot üzerinde işaretlenen nokta, orijin noktası değildir. Robot için belirlenen referans noktasının, robota göre koordinatları enkoderlerden okunarak hesaplanmaktadır. Görüntülerden bulunan bu noktaya ait koordinat da bilinmektedir. Bu durumda resimlerden okunan tüm noktalar, basit matematiksel işlemler ile robotun koordinat sistemine dönüştürülmüştür.

Gelinen bu aşamada kemiklerin OpenGL'de gösterimi ve otomatik redüksiyonu için gerekli olan tüm veriler elde edilmiş olur. Bundan sonraki kısımlar için başka bir veriye ihtiyaç yoktur, mevcut veriler ile otomatik redüksiyon için gerekli hesaplamalar yapılabilir.

2.6. OpenGL Üzerinden Modelin Gösterimi

Grafiksel gösterim için Delphi içerisinde OpenGL Kütüphanesi kullanılmıştır. OpenGL’de doku kaplama ve ışıklandırma gibi ayrıntılara girilmemiştir. Sadece grafiksel olarak kemiklerin pozisyonları hakkında fikir vermesi ile yetinilmiştir.

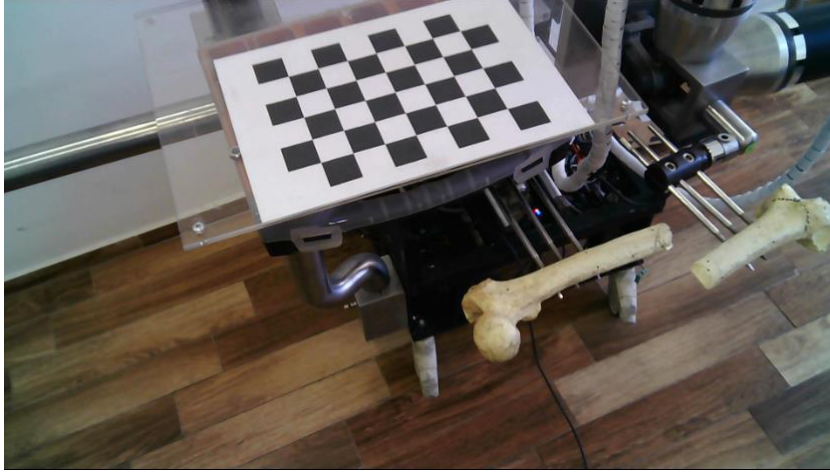
Grafik ortamda robot ve kemiklerin basit çizimleri yapılmıştır ve farklı açılardan bakma seçenekleri verilmiştir. Değişik yönlerden bakarak kemiklerin istenilen pozisyonlara gelip gelmediğini kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır.

Sabit tutulan ve hareket ettirilecek olan kemiklere ait A ve B noktalarından geçen çember ile B ve C noktalarından geçen çember, bir silindirin iki ucunda olacak şekilde çizdirilmişlerdir. Farklı açılardan bakıldığında anlaşılabilirliği artırmak ve redüksiyonun olup olmadığına karar vermeyi kolaylaştırmak için, kemikleri temsil eden silindirlerin ortasından birer doğru çizilmiştir. Şekil 2.23.’de kemikler ve OpenGL’deki görüntüleri ile ortalarından geçen doğru gösterilmiştir.

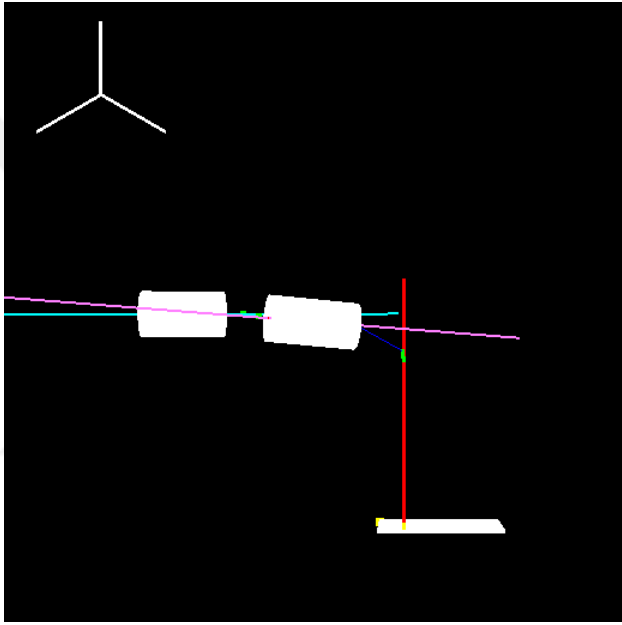
Şekillerde de görüldüğü üzere resimdeki kırık kemiklerin birbirlerine göre pozisyonları, OpenGL’deki pozisyonları ile aynıdır. Bunun anlamı; kemikler üzerinde yapılan işaretlemeler, bu işaretlemelerden okunan 3D koordinat bilgileri doğru bir şekilde okunmuşlardır. Aynı zamanda kamera ve projeksiyon matrisleri de doğru bir şekilde bulunmuşlardır. Eğer bunların birinde hata olsaydı, kemiklerin gerçekteki pozisyonları ile OpenGL’deki pozisyonları aynı olamazdı.

Resim 2.23.’de kemiklerin birbirleri tarafındaki yeşil noktalar, kemiklerin uç kısımlarında bulunan H1 ve H2 noktalarıdır. Redüksiyon sonunda bu iki nokta birbirlerine temas halinde olmalıdır.

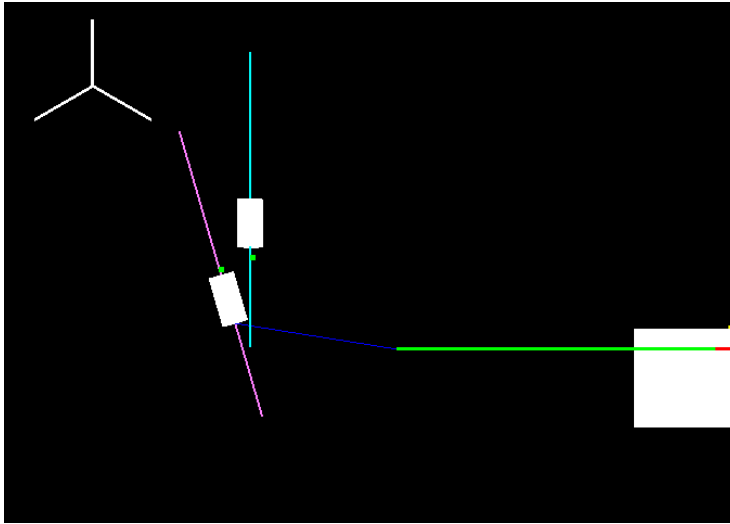
OpenGL görüntüsünde ekranın sol üst köşesinde bulunan gösterge, her üç eksen boyunca uygulanan kuvvetleri göstermektedir. Ana kontrol devresinin yük hücrelerinden okuduğu veriler bilgisayara gönderildikten sonra, yük hücrelerinin ve kemik ucunun koordinatlarına göre bilgisayar yazılımı tarafından hesaplanmışlardır. Şekil 2.24.’de deneme amaçlı uygulanan kuvvetlerin nasıl görüldüğü verilmiştir. Kırmızı renk x-ekseni, yeşil y-ekseni ve mavi ise z-ekseni boyunca uygulanan kuvvetleri vektörel olarak göstermektedir. Ayrıca program üzerinde bu kuvvetler Nm (Newton metre) cinsinden rakamlarla da gösterilmektedir.



(a)

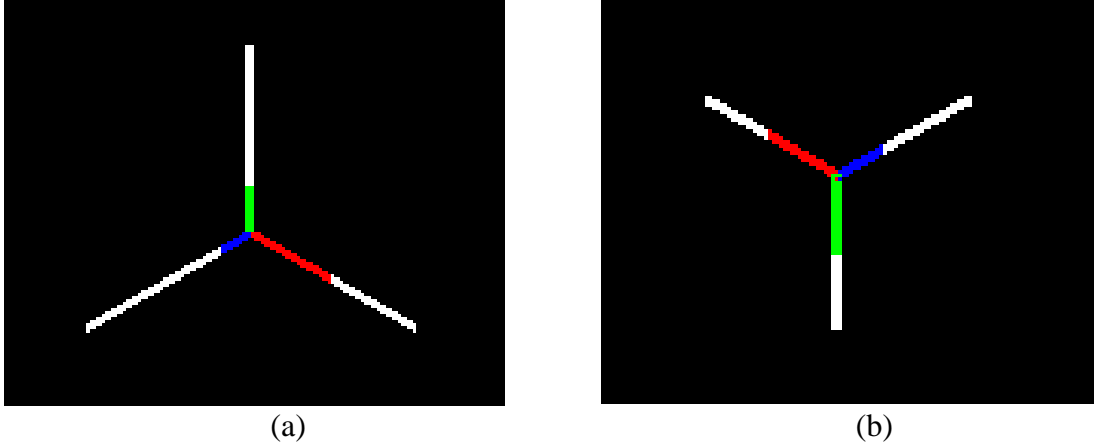


(b)



(c)

Şekil 2.23. Kırık kemikler ve OpenGL'deki grafikleri. a: Kemiklerin fotoğrafı, b:OpenGL'de önden görünüm, c:OpenGL'de üstten görünüm



Şekil 2.24. OpenGL'de robot manipulatöründeki kuvvetlerin gösterimi. a:pozitif yönde uygulanmış kuvvetler, b:negatif yönde uygulanmış kuvvetler.

2.7. Robot Uç İşlevcisinin Konumunu Bulma (İleri Kinematik)

Eklemlerin konumlarına göre manipulatörün konumunu bulmak ileri kinematik olarak adlandırılır ve bu işlem hiç de zor değildir. En yaygın kullanılan yöntem homojen koordinat sistemini kullanan Denavit-Hartenberg yöntemidir. Bu çalışmada kullanılan robot mekanizmasında eklemler birbirlerine dik olduklarından homojen koordinat sistemi uygulanmıştır, Denavit-Hartenberg yöntemine gerek duyulmamıştır. Bunun için öteleme ve dönme miktarları ile bu hareketlerin yönleri dönüşüm formüllerinde ilgili yerlere yazılarak bu işlem kolaylıkla gerçekleştirilmiştir.

Homojen koordinat sisteminde tüm hareketler 4x4 tipinde matrislerle yapılır. Her eklemler için elde edilen matris, baştan uca doğru çarpılarak uç işlevcisinin (manipulatör) konumu bulunur.

Öteleme hareketi denklem (2.19)'de verilen matris ile yapılır.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Öteleme Matrisi} \quad (2.19)$$

p_x : x-ekseni yönündeki öteleme miktarı

p_y : y-ekseni yönündeki öteleme miktarı

p_z : z-ekseni yönündeki öteleme miktarı

Dönme hareketleri için, hangi eksen etrafında döndüğüne göre farklı bir dönme matrisi kullanılır. Denklem (2.20)'de x-ekseni etrafında, (2.21)'de y-ekseni etrafında ve (2.22)'de z-ekseni etrafında dönme işlemi için kullanılan matrisler verilmiştir. Burada

α : x-ekseni etrafında dönme açısı

θ : y-ekseni etrafında dönme açısı

ϕ : z-ekseni etrafında dönme açısı

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Çalışmalarda kullanılan robot mekanizması üç eksende kayma (öteleme) ve üç eksende dönme hareketi yapmaktadır. Dönme hareketi, kayma hareketlerini yapan mekanizmanın ucuna eklenmiştir. Burada kullanılan kardan mekanizması ile manipülatör üç eksen etrafında da dönebilmektedir. Bu nedenle hareket mekanizması iki kısımdan oluşuyor gibi düşünülebilir. Birinci kısım öteleme hareketi yapan mekanizma, ikinci kısım ise dönme hareketi yapan mekanizma. Öteleme hareketleri sonunda elde edilen konuma, dönme hareketi ile elde edilen konum eklenir. Dönme hareketi koordinat sisteminin merkezinde (orijinde) yapılmış gibi hesaplanır. Bu durumda öteleme işlemi yapan matris ile dönme hareketlerini yapan matrislerin çarpımı manipülatörün konumunu verecektir. Robot mekanizmasında z-ekseni yönünde 440 mm uzunluğunda bir uzuv sabit haldedir. Bu nedenle bu uzunluk her işlemde eklenmiştir.

Aşağıda verilen hareket miktarları sonucunda, uç işlevcisinin elde edilen konumu örnek olarak hesaplanmıştır.

x-yönünde hareket: 10 mm

y-yönünde hareket: 15 mm

z-yönünde hareket: 05 mm

x-ekseni etrafında dönme açısı: 10°

y-ekseni etrafında dönme açısı: 15°

z-ekseni etrafında dönme açısı: 05°

Bu verilene göre öteleme matrisi denklem (2.23)'de verildiği gibi olur.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 1 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 1 & 445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Dönme matrisleri, denklem (2.24), (2.25) ve (2.26)'daki gibi ayrı ayrı hesaplanır ve sonuçta her üç matris çarpılarak denklem(2.28)'de görüldüğü gibi toplam dönme matrisi bulunur.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,985 & 0,174 & 0 \\ 0 & -0,174 & 0,985 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} 0,966 & 0 & -0,259 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0,259 & 0 & 0,966 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} 0,996 & -0,087 & 0 & 0 \\ 0,087 & 0,996 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$R = R_x R_y R_z \quad (2.27)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0,962 & -0,084 & -0,259 & 0 \\ 0,131 & 0,977 & 0,168 & 0 \\ 0,239 & -0,195 & 0,951 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Öteleme ve dönme matrisi çarpılarak, tüm sisteme ait dönüşüm matrisi denklem (2.29)'deki gibi hesaplanır.

$$[T] = [P][K] \quad (2.29)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0,962 & -0,084 & -0,259 & 10 \\ 0,131 & 0,977 & 0,168 & 15 \\ 0,239 & -0,195 & 0,951 & 445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Görüldüğü üzere matrisin en sağdaki sütünü, öteleme değerlerini aynen taşımaktadır. En alttaki satır da perspektif satırı olup, sonuca herhangi bir etkisi yoktur.

Yukarıda yapılan işlemlerde olmayan uç işlevcisinin uzunluğudur. Yani istavroz mekanizmasının merkezinden itibaren uç işlevcisi hesaba katılmamıştır. Çünkü birden fazla konum için aynı işlemler yapılacağından dolayı, lazım olduğunda işleme katılacaktır. Otomatik redüksiyon işleminde bu kısım detaylı olarak anlatılmıştır. Manipülatör uzunluğunun işleme katılması için sadece her üç ekseninde uzunluğun sütün matris olarak dönüşüm matrisi ile çarpılması yeterlidir.

Örnek olarak uç işlevcisinin eksenlere uzunluğu (0, 0, 10) olması durumunda denklem (2.31)'daki sonuç bulunur.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,962 & -0,084 & -0,259 & 10 \\ 0,131 & 0,977 & 0,168 & 15 \\ 0,239 & -0,195 & 0,951 & 445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,412 \\ 16,677 \\ 454,513 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.8. Yük Hücrelerinden Gelen Verilerin İşlenmesi

Ana kontrol devresi üzerinde üç adet yük hücresi kullanılmıştır. Bu yük hücrelerinin yerleştirilmeleri sırasında, her üç ekseninde oluşan kuvvetleri okuyabilecek şekilde bir tasarım yapılmıştır. Yük hücrelerinden her birinin sadece bir ekseninde kuvvete maruz kalmaları sağlanmaya çalışılmıştır. Böylece bir eksenden gelen kuvvetin bütün yük hücrelerini değil, sadece bir tanesini etkilemesi amaçlanmıştır.

Yük hücrelerinin kullanılmasındaki asıl amaç, robotun fazla güç uygulayarak kemiklere veya yumuşak dokuya zarar vermesinin engellenmesidir. Robotun uygulandığı

kuvveti hekim hissedemez ve robot zarar verebilecek kadar güçlüdür. Bu nedenle yük hücreleri ile kemiklere uygulanan yük ölçülmek istenmiştir. Fakat yük hücresi kendi üzerinde oluşan kuvveti ölçmektedir, kemiğe binen yük ise hesaplanarak bulunmuştur.

Kemikte oluşan kuvveti hesaplamak için her bir yük hücresinin kemiğin ucuna olan mesafesinin bilinmesi gerekir, böylece okunan kuvvet moment etkisinden arındırılabilir. Daha önce resim üzerinde işaretlenmiş olan H2 noktası sayesinde bu mesafe bulunabilmektedir. Her eksendeki mesafeler bilindiğinden, her bir yük hücresinden okunan veri sayesinde kemik üzerinde oluşan kuvvetler eksen bazında hesaplanmıştır.

Kemiğe uygulanan kuvvet bilgisayar yazılımı üzerinde gösterilmektedir. Böylece hekim, kemiğe hangi yönde ne kadar bir kuvvetin etki ettiğini görebilmektedir. Yazılım, kuvveti her üç ekseninde sınırlayabilmektedir. Belirlenen kuvvet sınırlarına erişildiğinde, kuvveti artıracak yönde robotun hareketi engellenir. Hekim isterse bu kuvvet sınırını değiştirebilmektedir. Böylece robotun yanlışlık hastaya zarar vermesi engellenmiştir.

2.9. Kırık Kemiklerin Uzaktan Kumanda ile Redüksiyonu

Asıl amaç kemiklerin otomatik redüksiyonu olsa da manuel olarak da bu işlem yapılabilmektedir. Kontrol tamamen hekimin elindedir. Hekim, istediği motoru istediği yönde hareket ettirerek redüksiyon işlemini yapabilir.

Eğer kemiklere ait görüntüler üzerinde gerekli işaretlemeler yapılmış ise, yapılan her hareket bilgisayar ekranından da görülebilir. Böylece sadece ekrana bakılarak redüksiyon yapılabilir. Eğer gerekli işaretlemeler yapılmamışsa, yapılan hareketin bilgisayar ekranında doğru bir şekilde görüntülenebilmesi mümkün değildir. Bu durumda ancak röntgen cihazı ile görüntüleme yapılarak kemiklerin pozisyonları ve redüksiyonun sonucu takip edilebilir. Bu şekilde, röntgen cihazı ile yapılan her hareket kontrol edilse de hekim radyasyona maruz kalmadan bu işlemleri yapabilir. Çünkü uzaktan kumanda aleti hasta ile aynı odada olmak zorunda değildir. Bu durumda sadece hasta radyasyona maruz kalacaktır.

Elle kumanda yapılması durumunda robot, herhangi bir hareketi komut almadan yapmaz. Hekim kumanda üzerindeki butonları kullanarak istediği hareketi robota yaptırabilir. Bu durumda redüksiyonun kalitesi sadece hekimin yeteneklerine bağlıdır. Eğer hekimde el titremesi gibi olumsuz bir özellik varsa, bu durumda robot hekimin yeteneklerini artırmış olacaktır.

Manuel kumanda yapılırken de yük hücreleri aktiftirler. Belirlenen yük sınırlarına erişildiğinde, robot kuvveti artıracak yöndeki hareketi yine de engelleyecektir. Böylece kumandanın takılması veya hekimin hatalı bir komut vermesi durumunda bile hastaya zarar verilmemiş olur.

Uzaktan kumanda ünitesi, hangi butonun hangi yönde harekete neden olacağını kolay anlaşılır olması dikkate alınarak tasarlanmıştır. Fakat hastanın sağ veya sol tarafından robota bağlanması durumunda, bazı butonları anlamak zor olabilmektedir. Bu karışıklık otomatik redüksiyon işlemi olmaz, çünkü gerekli hareketleri robotun kendisi yapar.

Yazılım üzerinde robotun hızını ayarlayacak olan üç kademeli seçenek vardır. Hekim bunlardan istediğini seçerek kullanabilir. Riski az olan ve uzun mesafeli hareketlerde yüksek hız, hassas veya riskli hareket gerektiren durumlarda ise düşük hızlar tercih edilebilir. Bu seçenek hekimin tercihinin bırakılmıştır.

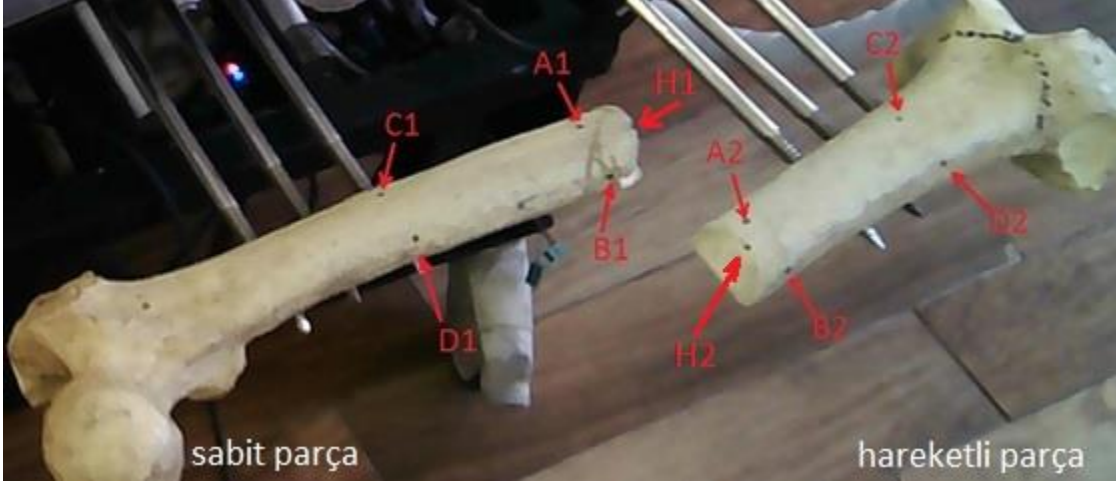
Otomatik redüksiyonun yapılırken de istenilen herhangi bir zamanda otomatik olan hareket durdurulup elle kontrole geçilebilir.

2.10. Kırık Kemiklerin Otomatik Redüksiyonu

Otomatik redüksiyon; kırık kemiklere ait görüntüler üzerinde gerekli noktalar işaretlendikten sonra, kemikleri olması gereken duruma elle müdahale etmeden robotun kendi kendine yapması işlemidir. Bunun için robotun manipülatörüne bağlı olan kemik hareket ettirilerek, sabit olan kemiğe uygun şekilde hizalanır.

Otomatik redüksiyon işleminin yapılabilmesi için, yazılımın her iki kemiğin konumlarını, doğrultularını ve uç noktalarını bilmesi gerekir. Bunların bulunabilmesi için de resimler üzerinde işaretlenen noktaların 3D koordinat bilgileri kullanılır.

Kemikler üzerinde işaretlenen noktaların koordinatları Bölüm 2.4.'de anlatıldığı üzere hesaplanmıştır. Yani her iki kemik parçası için beşer adet noktanın 3D koordinatları bilinmektedir. Şekil 2.25.'de işaretlenmiş olan noktalar görülmektedir.



Şekil 2.25. Kemikler üzerinde işaretlenmiş noktalar

Bu noktalardan A1,B1,C1, D1 ve H1 sabit kemiğe, A2, B2, C2, D2, ve H2 ise hareketli kemiğe aittir. Bu noktaların yerleri aşağıda verilmiştir.

- A1: Sabit kemiğin kırık tarafında çivinin kemiğe girdiği yerde
- B1: Sabit kemiğin kırık tarafında çivinin kemikten çıktığı yerde
- C1: Sabit kemiğin kırık olmayan tarafında çivinin girdiği yerde
- D1: Sabit kemiğin kırık olmayan tarafında çivinin çıktığı yerde
- H1: Sabit kemiğin kırık ucunda ve H2 ile birleştirilecek nokta
- A2: Hareketli kemiğin kırık tarafında çivinin kemiğe girdiği yerde
- B2: Hareketli kemiğin kırık tarafında çivinin kemikten çıktığı yerde
- C2: Hareketli kemiğin kırık olmayan tarafında çivinin girdiği yerde
- D2: Hareketli kemiğin kırık olmayan tarafında çivinin çıktığı yerde
- H2: Hareketli kemiğin kırık ucunda ve H1 ile birleştirilecek nokta

Kırık olan kemiğin hareketli parçasının doğrultusu, sabit olan parçanın doğrultuna getirilirse kemikler aynı doğrultu üzerinde olurlar. Fakat bu durumda dönük olma ihtimali vardır. Olası bu dönüklüğü düzeltmek için; mevcut olan doğrultu bozulmadan, yani hareketli kemik kendi eksenini etrafında döndürülerek H1 ve H2 noktaları birbirlerine değdirilmiştir. Böylece redüksiyon yapılmış olur.

Sabit olan kemiği istenilen konuma getirmek için rasgele bir yol takip edilemez. Çünkü rasgele bir yoldan gitmek kemiklere ve yumuşak dokulara zarar verebilir. Bu nedenle güvenli olan bir yolun bulunması ve takip edilmesi gerekir.

2.11. Redüksiyon İçin Yol Tasarımı

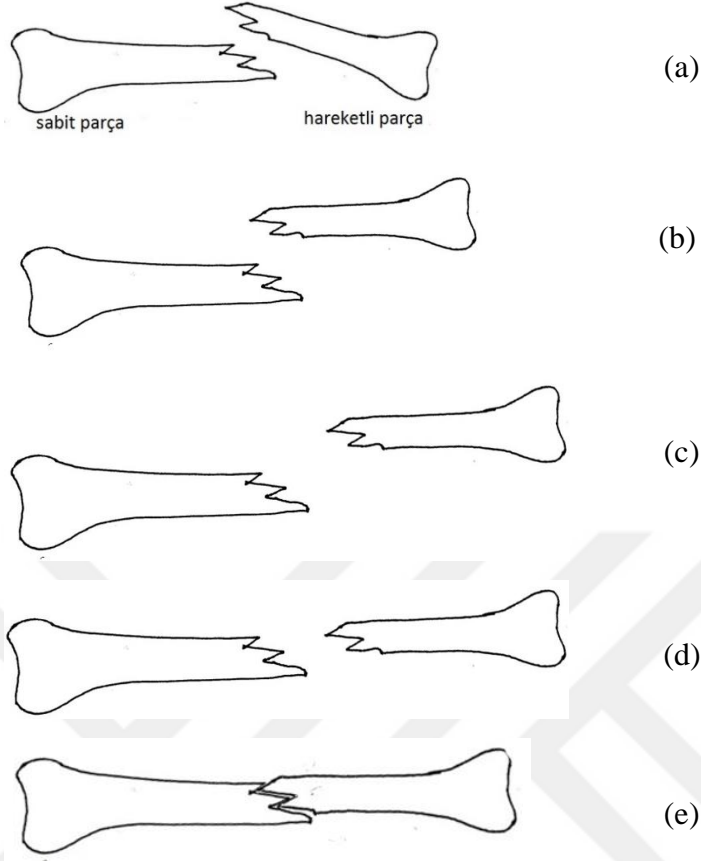
Bu çalışmanın asıl amacı hareketli olan kemiğin kırık olan ucu ile sabit olan kemiğin kırık ucunu birbirine değecek şekilde, robot manipülatörünün konumunu değiştirmektir. Kırık olan kemiklerin uçlarını birbirlerine değdirmek yeterli değildir. Aynı zamanda her iki kemiğin doğrultularının da aynı olması gerekir.

Hareketli olan kemiği sabit olan kemiğin ucuna getirerek, istenilen ve uygun olan redüksiyonu yapmak için güvenli bir yol takip etmek gerekir. Sonuçta geleceği son nokta aynı olsa bile, buraya gelene kadar kemiklere veya diğer dokulara zarar verme ihtimali vardır. Kemikler birbirlerinden fazla uzaklaşabilir, birbirlerine fazla yakınlaşarak birbirleri içinden geçmeye çalışabilir veya araya sinirleri sıkıştırabilir. Bu gibi olumsuz durumlarda kemiklerde yeni kırıklar veya çatlaklar oluşabilir, kaslar yırtılabilir, sinirler zedelenebilir.

Hastaya zarar vermeden redüksiyonu gerçekleştirmek için, her durumda güvenilebilecek ve uygulanabilecek bir yola ihtiyaç vardır. Bu amaçla 5 adımda tam redüksiyonu yapabilecek bir yol planlama yöntemi tasarlanmıştır.

Tasarlanan yöntemde, hareketli olan kemiğin kırık olan tarafındaki uç kısmı mümkün olduğunca sabit tutularak, diğer ucun hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Bu hareket ile kemiğin kırık ucunun başka yerlere hasar vermesi engellenmiştir. Aynı zamanda kırık olan parçaların da birbirlerine çarpması ve zarar vermesinin önüne geçilmiştir. Böylece hareketli olan kemiğin doğrultusu, sabit kemiğin doğrultusuna getirilir. Sonra kırık olan taraflar, aralarında bir açıklık oluşuncaya kadar birbirlerinden uzaklaştırılır. Kemikler artık birbirlerine uzak olduklarından her iki kemiğin doğrultusu aynı doğru üzerine getirilebilir. Bu amaçla hareketli kemiğin doğrultusu değiştirilmeden, sabit kemiğin doğrusu üzerine getirilir. Bu aşamada kemikler aynı hizaya gelmiştir. Doğrultuları aynı olmuştur, fakat kemik kendi eksenini etrafında dönük olabilir. Eğer ekseninde dönüklük varsa bu düzeltilir. Son adımda kemikler birbirlerine değene kadar, hareketli kemiğin doğrultusu bozulmadan hareket ettirilir.

Daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, önerilen bu yol için gerekli adımlar Şekil 2.26.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Otomatik redüksiyonun adımları

Bahsedilen beş adımlı bu yolun adımları aşağıda kısaca özetlenmiştir:

1. Hareketli olan kemiğin kırık ucu sabit tutularak, doğruğultusu sabit olan kemiğin doğruğultusuna paralel hale getirilir. (Şekil 2.26.b)
2. Kırık olan parçalar birbirlerinden yeteri kadar uzaklaştırılır. (Şekil 2.26.c)
3. Kırık parçalar arasındaki mesafe korunarak, hareketli kemiğin doğruğultusu sabit olanın doğruğultusu üzerine getirilir. (Şekil 2.26.d)
4. Hareketli kemiğin doğruğultusu bozulmadan, H2 noktası H1 noktasının hizasına getirilir. (Şekil 2.26.d)
5. Hareketli kemik üzerindeki H2 noktası, H1 noktasına değecek şekilde doğruğultusu bozulmadan hareket ettirilir. (Şekil 2.26.e)

2.11.1. Kemikleri Paralel Duruma Getirme

Kemiklerin pozisyonlarına ait istenen bir değişikliğin yapılabilmesi için koordinatlarının bilinmesi gerekir. Bunun için daha önce kemik görüntülerinin üzerinde yapılan işaretlemeler ile elde edilen 3D koordinatlar burada kullanılmıştır.

İlk aşamada kemikler paralel duruma getirilecektir. Bunun için kemiklerin doğrultuları bulunarak, bu doğrultular paralel hale getirilmiştir. Çünkü doğrultuları paralel olunca kemiklerin de paralel olması beklenmektedir. Doğrultuların paralel yapılması için gerekli işlemler aşağıda anlatılmıştır.

Kemiklerin paralel yapılabilmesi için önce doğrultularının bilinmesi gerekir. Bunun için de doğru denklemine ihtiyaç vardır. Bir doğru elde edebilmek için de iki tane nokta gereklidir. Gerekli olan bu iki nokta için, her iki kemikte de A, B ile C, D noktalarının ortası hesaplanarak bulunmuştur.

İki nokta arasındaki orta noktayı bulmak için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$M_x = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (2.32)$$

$$M_y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{2} \quad (2.33)$$

$$M_z = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{2} \quad (2.34)$$

$$M = (M_x, M_y, M_z) \quad (2.35)$$

Böylece her iki kemikte de ikişer adet orta nokta bulunmuştur ve aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir. İsimlendirmede “1” sabit kemiği, “2” hareketli kemiği ifade etmektedir. Üst indis ise adım numarasını göstermektedir. Sabit kemikte hareket olmayacağı için üst indisler sabit kemik için kullanılmamıştır.

$M1_{AB}$: A1 ve B1 noktalarının orta noktası (sabit kemik)

$M1_{CD}$: C1 ve D1 noktalarının orta noktası (sabit kemik)

$M2_{AB}^0$: A2 ve B2 noktalarının orta noktası (hareketli kemik)

$M2_{CD}^0$: C2 ve D2 noktalarının orta noktası (hareketli kemik)

Merkez noktalar bulunduktan sonra, her bir kemik için ikişer adet nokta elde edilmiş olur. İki noktadan geçen doğruyu bulmak için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Doğru denklemini bulmak için öncelikle doğrultu vektörleri bulunur:

$$\vec{u}_x = (x_2 - x_1) \quad (2.36)$$

$$\vec{u}_y = (y_2 - y_1) \quad (2.37)$$

$$\vec{u}_z = (z_2 - z_1) \quad (2.38)$$

$$\vec{u} = (u_x, u_y, u_z) \quad (2.39)$$

Bulunan bu doğrultu vektörleri aşağıda verildiği gibi isimlendirilmiştir:

$\vec{u1}$: Sabit kemiğe ait doğrultu vektörü

$\vec{u2}$: Hareketli kemiğe ait doğrultu vektörü

$$\vec{u1} = M1_{CD} - M1_{AB} \quad (2.40)$$

$$\vec{u2} = M2^0_{CD} - M2^0_{AB} \quad (2.41)$$

Doğrultu vektörleri bulunduktan sonra iki noktadan herhangi biri kullanılarak, doğru denklemini bulunabilir.

$$d: \frac{(x-x_1)}{\vec{u}_x} = \frac{(y-y_1)}{\vec{u}_y} = \frac{(z-z_1)}{\vec{u}_z} \quad (2.42)$$

Hem sabit hem de hareketli kemiğin doğrultuları bulunarak aşağıdaki şekilde isimlendirilmiştir.

$d1$: Sabit kemiğin ortasından geçen doğru denklemini

$d2^0$: Hareketli kemiğin ortasından geçen doğru denklemini

$$d1: \frac{(x-M1_{ABx})}{\vec{u1}_x} = \frac{(y-M1_{ABy})}{\vec{u1}_y} = \frac{(z-M1_{ABz})}{\vec{u1}_z} \quad (2.43)$$

$$d2^0: \frac{(x-M2_{ABx}^0)}{\vec{u2}_x} = \frac{(y-M2_{ABy}^0)}{\vec{u2}_y} = \frac{(z-M2_{ABz}^0)}{\vec{u2}_z} \quad (2.44)$$

Her iki kemiğin doğruları da artık bilinmektedir. Bu durumda hareketli olan kemiğe ait doğru (d2), sabit olan kemiğin doğrusuna (d1) paralel yapılabilir. Bu işlemi yaparken hareketli kemiğin kırk tarafındaki ucunun sabit kalması planlanmıştır. İlk bakışta $M2_{AB}^0$ noktasının yeri değişmeyecek, fakat $M2_{CD}$ noktası yer değiştirecek gibi gözükse de, bu doğru değildir. Çünkü $M2_{AB}^0$ noktası kemiğin uç kısmında değildir. Bu nedenle uç kısımda bir nokta kullanmak gereklidir. Bunun için $H2$ noktasını kullanmak daha doğru olacaktır. Bu durumda da eğer $H2^0$ noktası, $M2_{AB}^0$ ile $M2_{CD}^0$ noktalarından oluşan d2 doğrusunun üzerinde değilse, kemiğin uç kısmı bir miktar hareket edecektir. Bu nedenle $H2^0$ noktasının bu doğruyu kestiği yeri ($MH2^0$), yani uç kısmın orta noktasını bulmak gerekir. Çünkü aslında sabit kalması gereken yer burasıdır. Yani, $MH2^0$ noktası sabit tutulurken, $M2_{CD}$ noktasının yeri değiştirilecektir. Bu işlem kemiğe ait doğrultunun da değişmesini sağlayacaktır.

$H2^0$ noktasının $d2^0$ doğrusu üzerindeki en yakın yerin koordinatlarını bulmak için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

$$k_x = H2_x - M2_{CDx} \quad (2.45)$$

$$k_y = H2_y - M2_{CDy} \quad (2.46)$$

$$k_z = H2_z - M2_{CDz} \quad (2.47)$$

$$k_u = k_x u_x + k_y u_y + k_z u_z \quad (2.48)$$

$$MH2_x^0 = \frac{k_u u_x}{(u_x)^2 + (u_y)^2 + (u_z)^2} + M2_{ABx}^0 \quad (2.49)$$

$$MH2_y^0 = \frac{k_u u_y}{(u_x)^2 + (u_y)^2 + (u_z)^2} + M2_{ABy}^0 \quad (2.50)$$

$$MH2_z^0 = \frac{k_u u_{2z}}{(u_{2x})^2 + (u_{2y})^2 + (u_{2z})^2} + M2_{ABz}^0 \quad (2.51)$$

Gelinen aşamada $M2_{CD}^1$ noktasının olması gereken yerini bulmak için, önce $MH2^0$ ile $M2_{CD}$ noktaları arasındaki uzunluk bulunur ve bu mesafe $MH2^0$ noktasına, sabit kemiğin doğrultusu boyunca eklenir. Bu durumda bilinen bir noktadan geçen, doğruya paralel doğru denkleminin bulunması gerekir.

Noktadan geçen, doğruya paralel olan doğrunun denklemini bulmak (2.52)'deki formül kullanılmıştır. Doğrultu vektörü olarak sabit kemiğin doğrultu vektörü kullanılmıştır. Böylece hareketli kemiğin doğrultusu, sabit kemiğin doğrultusu ile aynı, yani ona paralel olacaktır. Hareketli kemiğin sabit olan noktası $MH2^0$ olduğundan, bu kemiğin yeni doğru denklemi aşağıdaki gibi bulunur:

$$d2^1 : \frac{x - MH2_{ABx}^0}{u1_x} = \frac{y - MH2_{ABy}^0}{u1_y} = \frac{z - MH2_{ABz}^0}{u1_z} \quad (2.52)$$

$d2^1$: Hareketli kemiğin yeni doğru denklemi

Bu aşamanın son adımı, $d2^1$ doğrultusu üzerinde $M2_{CD}^1$ noktasının alacağı koordinat değerini bulmaktır. Çünkü iki kemiğin doğrultularını paralel yapabilmek için, hareketli kemiğin $MH2^0$ noktası sabit kalırken, $M2_{CD}^0$ noktası hareket ederek yeni konumuna ($M2_{CD}^1$) gelecektir. Kemik hareket etse bile $MH2^0$ ile $M2_{CD}^0$ noktaları arasındaki mesafe değişmeyeceği için, $MH2^1$ noktasına bu uzunluk (d) eklenerek yeni koordinatları ($M2_{CD}^1$) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$d = \sqrt{(M2_{CDx}^0 - MH2_x^0)^2 + (M2_{CDy}^0 - MH2_y^0)^2 + (M2_{CDz}^0 - MH2_z^0)^2} \quad (2.53)$$

Aynı doğru üzerinde istenilen uzaklıktaki bir noktanın koordinatını bulmak için aşağıdaki formüller kullanılır:

$$k = \sqrt{\frac{d^2}{(u_x)^2 + (u_y)^2 + (u_z)^2}} \quad (2.54)$$

$$x_2 = x_1 - ku_x \quad (2.55)$$

$$y_2 = y_1 - ku_y \quad (2.56)$$

$$z_2 = z_1 - ku_z \quad (2.57)$$

$MH2^1 = MH2^0$ olduğu göz önüne alındığında, aranan koordinatlar aşağıdaki gibi bulunur.

$$k = \sqrt{\frac{d^2}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2}} \quad (2.58)$$

$$M2_{CDx}^1 = MH2_x^1 - ku1_x \quad (2.59)$$

$$M2_{CDy}^1 = MH2_y^1 - ku1_y \quad (2.60)$$

$$M2_{CDz}^1 = MH2_z^1 - ku1_z \quad (2.61)$$

$$M2_{CD}^1 = (M2_{CDx}^1, M2_{CDy}^1, M2_{CDz}^1) \quad (2.62)$$

$M2_{CD}^0$ Noktasının koordinatı değişecek ve bu nokta $M2_{CD}^1$ noktasına gelecektir. Fakat $MH2^0$ noktası yerinde kalacaktır. Burada $M2_{AB}^1$ ve $H2^0$ noktalarının da koordinatları değişmiş olacaktır. Aynı yöntemlerle bu noktaların koordinatları bulunabilir veya ileri kinematik ile manipülatör uzunluğu değiştirilerek verilirse, yine bu noktaların koordinatları bulunabilir.

Hedeflenen bu koordinatlara erişmek için, yani robot manipülatörünü bu koordinatlara taşımak için ters kinematik uygulanmıştır.

2.11.2. Kemikler Arasındaki Mesafeyi Ayarlama

Kırık olan kemikler, kasların etkisiyle birbirlerine doğru çekilirler. Redüksiyon yapılabilmesi için kemiklerin birbirlerinden uzaklaştırılması gerekir. Bir önceki adımda

birbirlerine paralel hale getirilen kemikler, bu adımda aralarında bir açıklık olacak şekilde ayarlanmışlardır. Kemikler birbirleri tarafına geçmemiş olsa dahi, yani aralarında zaten bir açıklık olması durumunda bile, planlanmış olan bu yolun çalışması etkilenmez.

Kemiklerin aralarında ne kadarlık bir açıklık oluşturulacağına hekim karar verebilir. Programda varsayılan bir değer olmakla beraber, hekim gerekli gördüğü durumlarda bu mesafeyi değiştirebilir. Kemiğin kırılma şekline göre, kemiklerin birbirlerinden uzaklaştırılma miktarı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle hekim, mevcut duruma göre uygun bir karar vermelidir.

MH1 ve MH2¹ noktaları, kemiklerin arasındaki mesafeyi ayarlamak için referans noktası olarak kullanılmıştır. Yazılım tarafından varsayılan olarak kemiklerin arasında olması gereken mesafe 10 mm olarak belirlenmiştir.

H1 ve H2¹ (H2¹=H2⁰) noktalarının arasındaki mesafeyi ayarlamak için her ikisinin de d1 doğrusu üzerindeki en yakın noktalar bulunur ve aralarındaki mesafenin, kemikler arasında istenilen uzaklık ile olan farkına bakılır. Bulunan bu fark kadar H2¹ noktası, d1 doğrultusu boyunca ötelenerek H2² noktasının koordinatları bulunmuştur. d2 ile d1 doğrultuları daha önce zaten eşitlenmişti, yani bu doğrular paraleldir.

İki kemik arasında olması istenilen mesafe “d” olsun. d1 doğrusunun H1 noktasına en yakın noktası MH1 ve H2¹ noktasına en yakın olan noktası ise p1 olsun.

d1 doğrusu için doğrultu vektörünü (u_{1x}, u_{1y}, u_{1z}) daha önce bulunmuştu. Aranılan nokta “MH1” noktası ve p1 noktalarıdır. Buna göre, doğru üzerindeki en yakın olan noktanın koordinatları denklem (2.45-2.51)’de verilmiş olan formüllere göre aşağıdaki gibi bulunmuştur.

MH1 noktasının koordinatlarını bulmak için:

$$k_x = H1_x - M1_{CDx} \quad (2.63)$$

$$k_y = H1_y - M1_{CDy} \quad (2.64)$$

$$k_z = H1_z - M1_{CDz} \quad (2.65)$$

$$k_u = k_x u1_x + k_y u1_y + k_z u1_z \quad (2.66)$$

$$MH1_x = \frac{k_u u1_x}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABx} \quad (2.67)$$

$$MH1_y = \frac{k_u u1_y}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABy} \quad (2.68)$$

$$MH1_z = \frac{k_u u1_z}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABz} \quad (2.69)$$

p1 noktasının koordinatlarını bulmak için:

$$k_x = H2_x^1 - M1_{CDx} \quad (2.70)$$

$$k_y = H2_y^1 - M1_{CDy} \quad (2.71)$$

$$k_z = H2_z^1 - M1_{CDz} \quad (2.72)$$

$$k_u = k_x u1_x + k_y u1_y + k_z u1_z \quad (2.73)$$

$$p1_x = \frac{k_u u1_x}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABx} \quad (2.74)$$

$$p1_y = \frac{k_u u1_y}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABy} \quad (2.75)$$

$$p1_z = \frac{k_u u1_z}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABz} \quad (2.76)$$

Bulunan “MH1” ve “p1” noktaları d1 doğrusunun üzerindedir. İki nokta arasında d kadar mesafe olması amaçlanmaktadır. Ne kadar öteleme yapılacağını bulmak için, bu iki nokta arasındaki uzaklık, istenile mesafeden çıkartılır. Bulunan değer kadar, H2¹ noktası d1 doğrultusu boyunca ötelenir. Bulunan koordinatlar H2² noktasını verir.

İki nokta arasındaki uzaklık “f2” olsun.

$$f2 = \sqrt{(MH1_x - p1_x)^2 + (MH1_y - p1_y)^2 + (MH1_z - p1_z)^2} \quad (2.77)$$

Bu durumda ötelenmesi gereken miktar f aşağıdaki gibi bulunur.

$$f = d - f_2 \quad (2.78)$$

H_2^2 noktasının koordinatlarını bulmak için, d_1 doğrultusu boyunca, H_2^1 noktasının koordinatlarına f değeri aşağıdaki gibi eklenmiştir. Doğru üzerinde mesafe ekleyerek koordinat bulma işlemi denklem (2.54-2.57) kullanılarak gerçekleştirilir. Burada d_2^1 'in doğrultusu d_1 ile aynı olduğundan, d_1 doğrusunun doğrultu vektörleri kullanılmıştır.

$$k = \sqrt{\frac{f^2}{(u_{1x})^2 + (u_{1y})^2 + (u_{1z})^2}} \quad (2.79)$$

$$H_{2x}^2 = H_{1x} - ku_{1x} \quad (2.80)$$

$$H_{2y}^2 = H_{1y} - ku_{1y} \quad (2.81)$$

$$H_{2z}^2 = H_{1z} - ku_{1z} \quad (2.82)$$

$$H_2^2 = (H_{2x}^2, H_{2y}^2, H_{2z}^2) \quad (2.83)$$

Bulunan bu yeni koordinatlara, yani hareketli kemiğin H_2^1 noktasını H_2^2 noktasına taşımak için sadece doğrusal hareketler yeterlidir. Döner hareketler doğrultuyu bozacaktır. Bu nedenle robotu kontrol eden motorlardan sadece doğrusal hareket yapanları kullanılarak bu noktaya gelinmiştir. Bu hareketin sonucu olarak MH_2^1 , M_{AB}^1 ve M_{CD}^1 noktalarının da koordinatları değişmiştir. Bu noktaların yeni konumlarını bulmak için, istavroz mekanizmasının merkezine olan uzaklıkları manipülatör uzunluğu olarak kabul edilerek, ileri kinematik denklemleri ile yeni koordinatları bulunmuştur. Bu adım tamamlandığında konumları değişen M_{AB}^1 noktasının yeni konumu M_{AB}^2 ve M_{CD}^1 noktasının yeni konumu ise M_{CD}^2 olarak isimlendirilmiştir.

2.11.3. Kemikleri Aynı Doğru Üzerine Getirme

Bu adımda hareketli kemiğin doğrusu, sabit kemiğin doğrusu üzerine getirilecektir. Önceki adımlar sonucunda paralel duruma getirilmiş olan kemiklere ait doğruları, üst üste bindirmek için, hareketli olan kemik taşınarak istenilen yere getirilir. Bunun için sadece doğrusal hareketler yeterlidir.

Hangi yönde ne kadar hareket yapılacağını bulmak bu aşamada kolaydır. Çünkü benzeri işlemler daha önce yapılmıştır. Taşınmak istenen hareketli kemiğin doğrultusu üzerindeki herhangi bir noktayı, bu doğru üzerine getirmek yeterli olacaktır. Bu amaçla $M2_{AB}^2$ noktası üzerinden işlem yapılmıştır.

$M2_{AB}^2$ Noktasının yeni konumu, sabit kemiğin doğrusu üzerindeki en yakın nokta olmalıdır ki aralarındaki mesafe bozulmasın. Bu noktayı bulmak için daha önce kullanılan yöntem, denklem (2.45-2.51)'de verildiği gibi burada da kullanılmış ve (2.84-2.90)'daki eşitlikler elde edilmiştir. Bulunan yeni noktanın adı $M2_{AB}^3$ olarak isimlendirilmiştir. Yine konumları değişen $H2^2$, MH^2 ve $M2_{CD}^2$ noktalarının da yeni koordinatları ileri kinematik denklemlerinden hesaplanarak bulunmuştur ve bu yeni koordinatlara $H2^3$, MH^3 ve $M2_{CD}^3$ isimleri verilmiştir.

$$k_x = M2_{ABx}^2 - M1_{CDx} \quad (2.84)$$

$$k_y = M2_{ABy}^2 - M1_{CDy} \quad (2.85)$$

$$k_z = M2_{ABz}^2 - M1_{CDz} \quad (2.86)$$

$$k_u = k_x u1_x + k_y u1_y + k_z u1_z \quad (2.87)$$

$$M2_{ABx}^3 = \frac{k_u u1_x}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABx} \quad (2.88)$$

$$M2_{ABy}^3 = \frac{k_u u1_y}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABy} \quad (2.89)$$

$$M2_{ABz}^3 = \frac{k_u u1_z}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2} + M1_{ABz} \quad (2.90)$$

Bulunan bu noktaya manipülatörü taşımak için, PSO algoritmasının bulduğu çözümde sadece doğrusal hareketi okuyan enkoderlere ait değerler değişmiştir.

2.11.4. Kemikleri Karşılıklı Denk Getirme

Buraya kadar olan adımlar ile kemiklerin merkezleri aynı doğru üzerine getirilmiştir. Hareketli kemiğin, sabit kemik ile aynı doğru üzerinde olması redüksiyon için yeterli bir durum değildir. Çünkü hareketli kemik, kendi eksenini etrafında dönmüş halde olabilir. Bu durumu düzeltme işlemi bu adımda yapılmıştır.

Her iki kemiği birbirlerinden uzakta iken, doğru bir şekilde hizalamak için, hareketli kemiğin “H2³” noktası, sabit kemiğin “H1” noktası karşısına getirilmelidir. Tabii ki bu işlem yapılırken, hareketli kemiğin doğrultusunun bozulmaması gerekir. Bu adımda iki adet nokta istenilen noktalara getirilmelidir. Farklı seçenekler olmakla birlikte, H2³ ve M2_{CD}³ noktaları kullanılarak, bu noktaların olması gereken yeni koordinatları bulunmuştur. Bulunan yeni noktalar H2⁴ ve M2_{CD}⁴ olarak isimlendirilmiştir. Bu noktaların yeni koordinatlarını bulmak için sabit kemiğin doğrultu vektörü kullanılmıştır.

MH2³ noktası ile M2_{CD}³ noktaları arasındaki uzaklık hep aynıdır. Bu mesafe ile kemikler arasında olması istenilen mesafe (d), MH1 noktasına sabit kemik doğrultusu boyunca eklenerek M2_{CD}⁴ noktasının koordinatları bulunur. Olması istenen mesafe, H1 noktasına yine sabit kemik doğrultusu boyunca eklenerek, H2⁴ noktasının koordinatlarına ulaşılmıştır. Denklem (2.53-2.57)'de verilen doğru üzerinde mesafe ekleme formülleri burada da kullanılmıştır. Aşağıda bu işlemlerin yapıldığı denklemler verilmiştir.

MH2³ noktası ile M2_{CD}³ noktaları arasındaki uzaklık f_2 olsun;

$$f_2 = \sqrt{(MH2_x^3 - M2_{CDx}^3)^2 + (MH2_y^3 - M2_{CDy}^3)^2 + (MH2_z^3 - M2_{CDz}^3)^2} \quad (2.91)$$

Bu durumda ötelenmesi gereken miktar f aşağıdaki gibi bulunur.

$$f = d + f_2 \quad (2.92)$$

$$k = \sqrt{\frac{f^2}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2}} \quad (2.93)$$

$$M2_{CDx}^4 = MH1_x - ku1_x \quad (2.94)$$

$$M2_{CDy}^4 = MH1_y - ku1_y \quad (2.95)$$

$$M2_{CDz}^4 = MH1_z - ku1_z \quad (2.96)$$

H2⁴ noktasının koordinatları aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$k = \sqrt{\frac{d^2}{(u1_x)^2 + (u1_y)^2 + (u1_z)^2}} \quad (2.97)$$

$$H2_x^4 = H1_x - ku1_x \quad (2.98)$$

$$H2_y^4 = H1_y - ku1_y \quad (2.99)$$

$$H2_z^4 = H1_z - ku1_z \quad (2.100)$$

Bu işlemi yapabilmek için, yani hareketli kemiği kendi eksenini etrafında döndürebilmek için hem doğrusal, hem de döner hareket yapan motorlar kullanılmak zorundadır. Aksi halde hareketli kemiğin doğrultusu bozulacak veya yer değiştirecektir.

Bu adım sonunda kemiklerin merkezleri aynı doğru üzerindedir ve hedef noktaların oluşturduğu doğru da kemiklerin ortasından geçen bu doğruya paraleldir. Bulunan yeni noktalar H2⁴, MH2⁴, M2⁴_{AB} ve M2⁴_{CD} olarak isimlendirilmiştir.

2.11.5. Kemikleri Birleştirme

Bundan önceki adımların sonucunda kırık olan kemikler, birbirlerinden uzakta fakat hizalanmış durumdadır. Yapılması gereken tek şey, hareketli olan kemiği, sabit olan kemiğe değene kadar yaklaştırmaktır. Bunun için H2⁴ noktasının yeni koordinat değerleri

H2⁵ ile temsil edilecek ve bu nokta H1 noktası ile aynı koordinat değerlerine sahip olacaktır. Hedef artık bellidir ve yapılacak iş, sadece doğrusal motorları hareket ettirerek istenilen konuma getirmektir. Dönme hareketi yapan motorlar bu adımda kullanılmamıştır.

Hareketli kemik sabit olan kemiğe yaklaşırken, olası hatalara karşı hastaya zarar vermemesi için gerekli önlemler de alınmıştır. Hareketli kemik, sabit kemiğe dokunmaya başladığında yazılım bunu yük hücrelerini okuyarak algılayabilmektedir. Kemiklerin birbirleri üzerine uyguladıkları kuvvet, belli bir değerin üzerine çıktığında robot bu hareketi durduracaktır. Hekim, belirlenmiş olan kuvvet sınırlarını değiştirmedeği sürece robot bu yönde harekete müsaade etmeyecektir. Hekimin kontrolünde, kemiklerin ne kadar bir baskı ile birbirlerine değeceği bu şekilde belirlenebilir.

Böylece, kemiklerin otomatik redüksiyon işlemi tamamlanmış olur. Bundan sonra fiksator, çakılı olan çivilere sabitlenir ve hastanın robot ile bağlantısı kesilerek, operasyon sonlandırılır.

2.12. Robotta Ters Kinematik

Kullanılan robotun asıl amacı kırık olan kemiklerin redüksiyonunu yapmaktır. Kırık olan her iki parça da robot tarafından tutulmaktadır. Fakat bu parçalardan biri hep sabittir. Diğer parça ise robot kolu ile hareket ettirilebilmektedir. Hareket ettirilen parça, hareketsiz olan parçanın konumuna göre yönlendirilir. Bu amaçla kemiğin istenilen konuma yönlendirilebilmesi için, motorların belirli yönde istenilen miktarlarda hareketleri sağlanmalıdır. Manipülatörü isten koordinatlara götürmek için ters kinematik çözüm gereklidir. Bu çalışmada, ters kinematik çözümü gerçekleştirmek için PSO yöntemi kullanılmıştır.

2.12.1. PSO ile Ters Kinematik

Kullanılan robotun ters kinematik çözümünde sadece manipülatörün uç noktası değil, doğrultusu da önemlidir. Bu doğrultuyu sağlayabilmek için bir noktanın değil, manipülatör üzerinde iki adet noktanın istenilen pozisyona getirilmesi sağlanmıştır. Böylece iki noktadan oluşturulacak doğru, manipülatörün doğrultusunun da istenildiği gibi olmasını sağlayacaktır.

PSO yönteminde, aranılan çözüme ulaşmak için gerekli iki adet kıstas oluşmuş olur. Bunların her ikisi de sağlandığı ölçüde hedefe yaklaşılmış olacaktır. Yeteri kadar yaklaşıldığında da PSO algoritmasının çalışması durdurulacaktır. Fakat çözüm sayısı birden fazladır ve hangi çözümün arandığı önemlidir. Bu çalışmanın konusu gereği en yakındaki çözümü bulmak gerekir. Böylece kemikler fazla hareket ettirilmeden, en kısa yoldan çözüm gerçekleştirilmiş olur.

Redüksiyon için yol tasarımının anlatıldığı bölümde, uygulanacak olan PSO algoritmasının sağlaması gereken kriter için gerekli olan iki noktaya ait koordinatların nasıl bulunduğu anlatılmıştır. Robot uzuvlarının hareketi ile bunun sağlanması için, PSO yöntemi ile altı uzvun da pozisyonları bulunmuştur. Bunu yaparken de en yakın çözüm aranmıştır. En yakındaki çözümü bulabilmek için klasik PSO yönteminde değişiklik önerilmiştir. Önerilen bu değişikliğin uygulanması ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2.12.2. Yeni Sürü ve Yeni Başlangıç ile PSO Algoritması

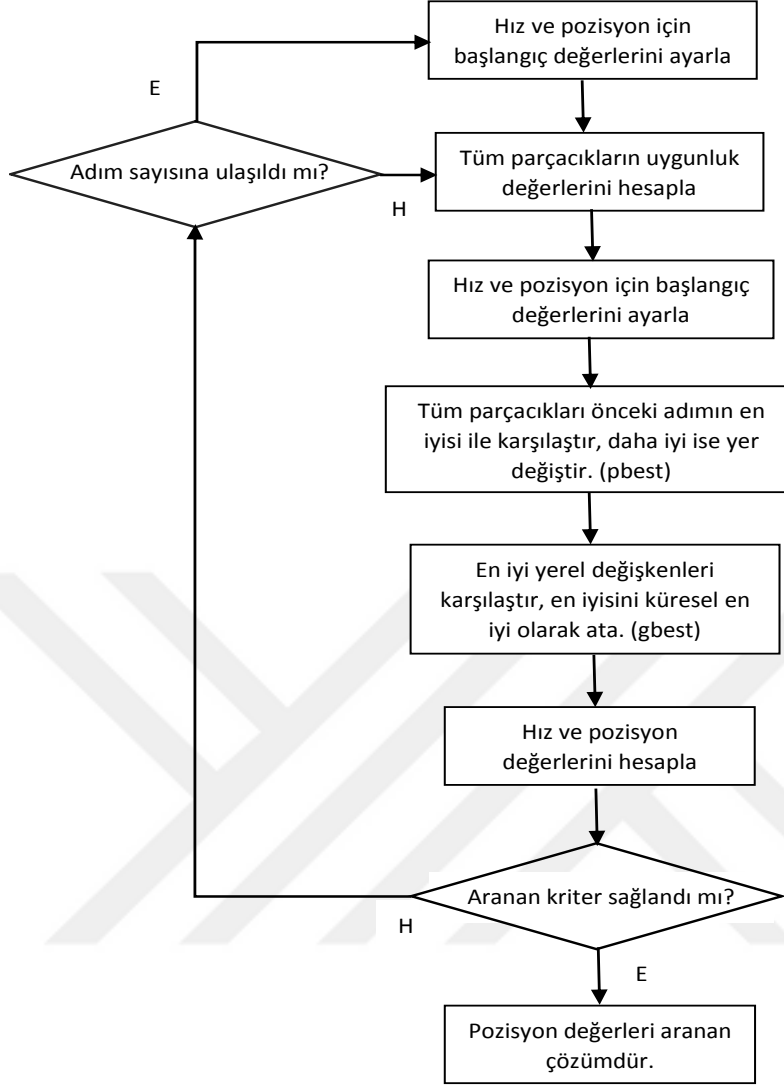
Klasik PSO algoritmasında değişiklik yapılarak bir çözüm önerilmiştir. Bu çözümde, klasik PSO daha iyi değerlere ulaşamadığı durumlarda algoritma durdurulmakta ve yeniden başlatılmaktadır.

Algoritmanın durdurulması için, PSO algoritmasının bulduğu en iyi değer kontrol edilir. Üst üste aynı değer iki defa okunmuşsa algoritma sonlandırılır. Çünkü daha iyi bir çözüm son adımda bulunamamıştır. Eğer çözüme ulaşamamışsa fakat algoritma durdurulmuşsa, PSO yeniden başlatılır.

Yeniden başlatma işleminde başlangıç noktası değiştirilerek, gelinen en iyi nokta yeni başlangıç yeri olarak kabul edilir. PSO algoritmasının önceki çalışmasından elde edilen hiçbir değer burada tekrar kullanılmaz. Parçacıklara ait tüm değerler sıfırlanır.

Denemelerde bu yöntemin daha hızlı çalıştığı görülmüştür. Üstelik bu yöntem ile tüm denemelerde sonuca ulaşılmıştır. Yerel minimuma takılma gibi bir sorunla da karşılaşılmamıştır. Şekil 2.27.'de bu yöntemin akış şeması verilmiştir.

Ters kinematik için olası çözümlerden en yakında olanı bulma amacı böyle bir yöntem arayışına sebep olmuştur. Bu yöntem sürekli minimumu takip etme yöntemine çok benzer bir mantıkla ilerlemektedir, fakat daha sağlıklı çalışmaktadır. Zira adım büyüklüğünden kaynaklanan, çözümü bulamama ve yerel minimum etrafında dolaşım takılma sorununu ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 2.27. Değiştirilmiş PSO akış şeması

2.12.3. PSO Algoritması İçin Maliyet Tanımları

Robotun manipülatörünün ters kinematik hesaplamaları için hedefin belli olması gerekir. Bu hedefler PSO algoritmasında maliyet hesabı olarak tanımlanır ve PSO en düşük maliyeti bulmak için çalışır. Yol planlaması kısmında hedeflenen noktalar, manipülatörün ulaşması istenilen noktalarıdır ve bu noktalar PSO için hedef olarak tanımlanmıştır.

Yol planlamasında da bahsedildiği üzere, robotun bazı adımlarda hem doğrusal hem de döner hareket yapması gerekirken, bazı adımlarda ise sadece doğrusal hareketler yeterlidir. Doğrusal hareketler manipülatörün doğrultusunu değiştirmez. Doğrultunun değişmeyeceği adımlarda PSO için tek hedef tanımlanmıştır ve bu hedefe yeteri kadar

yakınlık durdurma kriteri olarak belirlenmiştir. Fakat doğrultunun değişmesi gereken adımlarda, doğrultuyu sağlayabilmek için iki adet hedef tanımlanmıştır. Bu durumda PSO algoritması için, her iki hedefe birden yeteri kadar yaklaşılması durdurma kriteri olarak belirlenmiştir.

Redüksiyon için toplamda 5 adım tasarlanmıştır. Bu adımların ters kinematik çözümü için, hedef koordinatlara olan yaklaşma PSO algoritmasının maliyeti olarak belirlenmiştir. Aşağıda bu adımların özellikleri açıklanmış ve PSO'nun hedefleri verilmiştir.

1. Adım: İlk adımda iki kemik birbirlerine paralel hale getirileceği için, hareketli kemiğin doğrultusu değişecektir. Bu nedenle iki adet hedef noktası gereklidir. Bu hedefler $M2_{AB}^0$ ve $M2_{CD}^0$ noktalarını, $M2_{AB}^1$ ve $M2_{CD}^1$ noktalarına taşımaktır. PSO algoritması bu iki noktanın koordinatlarını aynı anda sağlayacak çözümü arar.
2. Adım: Bu adımda kemikler arasındaki mesafe ayarlanmaktadır. Doğrultu değişimi olmayacağından dolayı, PSO algoritmasının aradığı tek çözüm vardır. Bu hedef için $H2^1$ noktası, $H2^2$ noktasının koordinatlarına taşınacaktır.
3. Adım: Bu adımda hareketli olan kemik, sabit olan kemiğin doğrultusuna getirilmektedir. Zaten birbirlerine paralel olduklarından dolayı, kemiklerin doğrultularında bir değişiklik olmayacaktır. Sadece doğrusal hareketler yeterlidir. Bu nedenle doğrusal hareketler ile sağlanacak tek hedef PSO algoritması sonucunda bulunmuştur. Hedef olarak $M2_{AB}^2$ veya $M2_{CD}^3$ noktaları seçilebilir. Daha hassas konumlandırma için yine $M2_{AB}^3$ noktası hedef olarak seçilmiştir.
4. Adım: Eğer gerekliyse, bu adımda hareketli kemiğin kendi eksenini etrafında döndürülmesi işlemi yapılmaktadır. Bu adımda hareketli kemiğin doğrultusu değişmeyecektir. Fakat sadece doğrusal hareketler yaparak kemik kendi eksenini etrafında döndürülemez. Hareketli kemiği kendi eksenini etrafında döndürmek, fakat doğrultusunu kaybetmemek için, hem doğrusal hem de döner hareketler gereklidir. Bu nedenle PSO algoritmasının çözümü iki hedefe birden aynı anda erişimi sağlayacaktır. Bunlar $H2^4$ ve $M2_{AB}^4$ noktalarının koordinatlarıdır.
5. Adım: Hareketli kemiği aynı doğrultuda bulunan hareketsiz kemiğe yaklaştırma işlemi bu adımda yapılmıştır. Doğrultu değişimi olmayacağından sadece doğrusal hareketler yeterlidir. Bu nedenle PSO algoritmasının sağlayacağı hedef bir tanedir ve bu hedef $H2^5$ noktasının koordinatlarıdır. $H2^5$ noktası da zaten $H1$ noktası ile aynıdır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Gerçekleştirilen otomatik redüksiyon robotu ve bu robota ait yazılımların çalışması uygulamalı olarak model kemik üzerinde denenmiştir. Denemelerde röntgen görüntüleri yerine fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Fakat asıl amaç röntgen görüntüleri üzerinde işlem yapmak olduğundan dolayı, yapılan tüm işlemlerde röntgen görüntülerine uygun olacak şekilde yöntemler belirlenmiştir.

Manuel ve otomatik redüksiyon için birçok deneme yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Otomatik redüksiyonun yapıldığı denemelerden bir tanesi ayrıntıları ve sonuçlarıyla beraber bu bölümde anlatılmıştır.

3.1. Elektronik Kontrol Devresi

Robotu kontrol eden elektronik devrenin çalışmasında bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Sensörleri okuma, bilgisayar ile haberleşme ve aldığı komutları uygulama hızı robotun amacı için uygundur. Çok hızlı bir çalışma zaten istenmemektedir. Robotun motorları çalıştırma hızları için üç farklı seçenek belirlenmiştir. En hızlı olan seçenekte bile bir yavaşlatma mevcuttur.

Elektronik devre genel amaçlı bir devre değildir. Piyasada satılan bir devre de değildir. Yapılan bu robotu kontrol etmek için tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Üzerinde amacına uygun olarak programlanmış yedi adet mikrodenetleyici vardır. Medikal cihazlar için gerekli olan uluslararası standartla uygun olarak imal edilmiş ve malzeme seçimi de yine bu kriterlere uygun olarak yapılmıştır.

3.2. Uzaktan Kontrol Ünitesi

Uzaktan kontrol ünitesi, manuel kontrol amacıyla tasarlanarak imal edilmiştir. Ergonomik yapısı, robotu kontrol ederken anlaşılabilirliği ve kontrol kabiliyetini artıracak şekilde tasarlanmıştır. Hem ana kontrol devresi ile hem de bilgisayar ile haberleşmektedir. Uygulamalarda herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır.

3.3. İki Boyuttan Üç Boyuta Geçerken

2D görüntülerden 3D koordinat bilgilerini elde etmek için satranç tahtasına benzer, 6x8 boyutlarında, her biri 29mm olan siyah-beyaz karelerden oluşan görüntüler referans alınmıştır. Bu amaçla OpenCV kütüphaneleri, Python kodları yazılarak kullanılmıştır.

2D görüntü çiftleri üzerinde istenilen noktaların işaretlenmesi yapılarak 3D koordinatlar elde edilmiş ve robotun koordinat sistemine uyarlanmıştır. Literatürde aynı yöntemi takip eden bir çalışma bu alanda bulunamamıştır.

3.4. Kemikler Üzerindeki İşaretlemeler

Kemikler üzerinde yapılan işaretlemeler sayesinde satranç tahtası koordinatlarından, robot koordinatlarına geçiş sağlanmıştır. Aynı zamanda bu işaretlemeler ile kırık kemiklerin koordinat bilgileri okunmuştur. Okunan veriler sayesinde, Delphi Programlama ile OpenGL kütüphaneleri üzerinden kemik görüntüleri temsili olarak oluşturulmuştur.

Literatürde kırık kemiklerin redüksiyonunda aynı yöntemi kullanan bir çalışma mevcut değildir. Kullanılan yöntem bu alanda kendine özgüdür.

3.5. Kemikleri Konumlandırma

Görüntüler üzerinde yapılan işaretlemeler ile kemiklerin 3D konumları öğrenilerek bilgisayar ortamına aktarılmışlardır. Bu konumlar ile kemikler OpenGL ortamında basit olarak gösterilmişlerdir. Işıklandırma veya doku kaplama yapılmamıştır. Kemiklerin gerçekteki konumları ile bilgisayar ortamındaki koordinat verilerinin uyumlu olmasına çalışılmıştır. Elde edilen koordinat bilgilerinden, geometrik olarak kemiklerin birbirlerine göre konumları ve hangi pozisyonlarda oldukları tespit edilmiştir.

Elde edilen bu geometrik konumları sayesinde nasıl bir redüksiyon yapılacağı hesaplanmıştır. Bu amaçla kemiklerin redüksiyonu için bir yol tasarımı yapılmıştır.

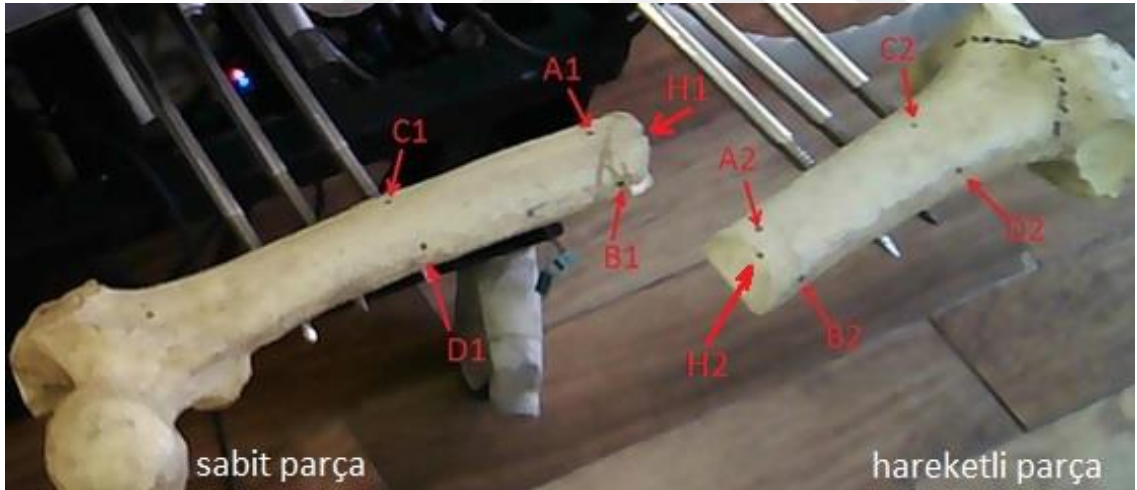
Burada ekrandaki görüntünün redüksiyonu yapılmamıştır. Redüksiyonu için gerekli ters kinematik çözüm bulunarak, robotun hareketi sağlanmıştır. Robot hareket ettikçe, enkoderlerden gelen verilere göre ekrandaki görüntü oluşturulmuştur. Böylece ekrana bakılarak, robotun uyguladığı işlemlerin sonucu görülebilmektedir.

Kemiklerin 3D koordinatları ne kadar sağlıklı ve doğru olarak aktarılmışsa, redüksiyon ve gerçek kemikler ile ekrandaki görüntülerin uyumu da o kadar başarılı olacaktır.

3.6. Robotun Redüksiyon Adımları

Tasarlanan yol sayesinde, robotun otomatik olarak yapacağı redüksiyon işlemi sırasında kemiklere ve diğer dokulara zarar verilmemesi hedeflenmiştir. Tanımlanan 5 adımlı yolda, her bir adım için ulaşılabilecek hedeflere ait ters kinematik çözümler PSO yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Otomatik redüksiyon sırasında elde edilen çözümler bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Başlangıç pozisyonları Şekil 3.1.'de verilen kemiklerin redüksiyon işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Kemikler üzerinde işaretlenen konumlara ait koordinatlar ve PSO algoritması ile elde edilen hedef koordinatlar her bir adımda verilmiştir.



Şekil 3.1. Kırık kemikler ve üzerindeki işaretlemeler

Kırık olan kemiğin her iki tarafındaki kemiklere çiviler sabitlendikten sonra, bu çiviler robotun kollarına monte edilir. Bu durum redüksiyon için başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir.

Başlangıç durumunda iken kırık kemiğin her iki parçasını da gösteren, farklı açılardan iki adet resim çekilir. Kırık kemikler üzerinde istenen noktalar her iki resimde de işaretlenir ve bu noktaların 3D koordinatları yazılım sayesinde elde edilir. Elde edilen bu

koordinatlar Tablo 3.1.'de verilmiştir. Yine başlangıç pozisyonunda iken mevcut enkoder konumları Tablo 3.2.'de, ve hareketli kemik üzerinde işaretlenmiş noktaların istavroz merkezine olan uzaklıkları (manipülâtör) Tablo 3.3.' verilmiştir.

Tablo 3.1. Görüntülerden elde edilen noktalar ve koordinatları

Sabit kemik koordinatları				Hareketli kemik koordinatları			
Nokta No	X	Y	Z	Nokta No	X	Y	Z
H1	-92,967	228,490	713,309	H2	-77,536	217,551	755,332
A1	-107,420	228,515	707,960	A2	-73,114	218,081	747,954
B1	-107,279	226,760	725,675	B2	-68,931	214,413	764,885
C1	-172,332	227,015	707,899	C2	-7,403	213,413	729,445
D1	-170,717	227,968	726,009	D2	-2,625	210,854	746,499

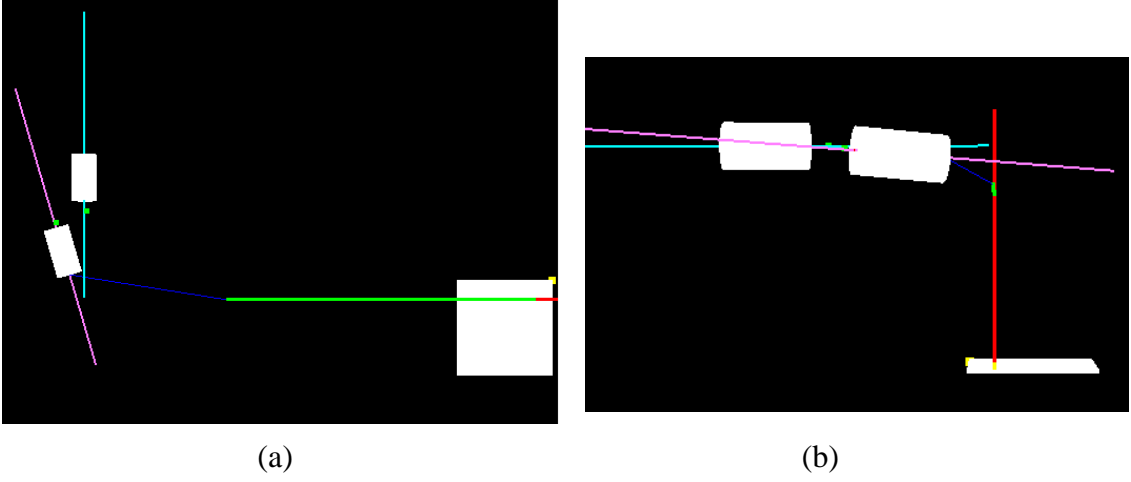
Tablo 3.2. Koordinatların okunduğu sırada enkoder değerleri

Okunan Encoder	Encoder Konumları
Yatay-X (mm)	31,1279296875
Yatay-Y (mm)	199,853515625
Yatay-Z (mm)	78,0029296875
Döner-X (°)	1,434814453125
Döner-Y (°)	8,703369140625
Döner-Z (°)	-4,831787109375

Tablo 3.3. Hareketli kemik üzerindeki noktaların istavroz mekanizmasına olan uzaklıkları (manipülâtör)

Nokta No	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
H2 ⁰	-144,728870541005	11,4849781060455	217,641910210086
A2	-139,288159281865	12,2910224429734	211,007136195405
B2	-137,46105459403	9,19139386177982	228,462285752024
C2	-71,3604473645451	12,8856797338428	202,776154163778
D2	-69,0554798709217	10,941265277587	220,414555185922

Elde edilen 3D koordinat bilgileri ile kemikler modellenerek OpenGL sayesinde ekranda gösterilmiştir. Şekil 3.2.'de bu görüntülerin önden ve üstten görünümü verilmiştir.



Şekil 3.2. Kemiklerin OpenGL’de gösterimi. a: üstten, b: önden

3.6.1. Robotun 1. Adımı Uygulaması

Kemik doğrultularının paralel olması için gerekli olan noktaların koordinatlarının bulunması hesabı bu adımda yapılmıştır. Bu hesaplamaları yapabilmek için $M1_{AB}$, $M1_{CD}$, $M2_{AB}^0$ ve $M2_{CD}^0$ noktalarının koordinatları bulunmuştur. PSO ile bulunan çözümü, aranan nokta ile kıyaslayabilmek için $M2_{AB}^0$ ve $M2_{CD}^0$ noktaların istavroz merkezine olan uzaklıklarının bilinmesi gerekir. Çünkü ileri kinematik ile o noktanın yerini bulabilmemiz için manipülatör uzunluğu gerekir. Denklem (2.30-2.33)’deki formüller uyguladığında, bu noktaların istavroz merkezine mekanizmasına olan uzaklıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Burada bulunan uzunluk ve mesafelerin birimi milimetredir.

$$M1_{ABx} = A1_x + \frac{B1_x - A1_x}{2} = -92,967 + \frac{-107,279 + 92,967}{2} = -107,3495 \quad (3.1)$$

$$M1_{ABy} = A1_y + \frac{B1_y - A1_y}{2} = 227,6375 \quad (3.2)$$

$$M1_{ABz} = A1_z + \frac{B1_z - A1_z}{2} = 716,8175 \quad (3.3)$$

Aynı yöntem uygulandığında C1 ile D1 noktalarının orta noktasının koordinatları aşağıdaki gibi olur.

$$M1_{CDx} = -171,524 \quad (3.4)$$

$$M1_{CDy} = 227,491 \quad (3.5)$$

$$M1_{CDz} = 716,954 \quad (3.6)$$

Aynı yöntemle $M2_{AB}^0$ ve $M2_{CD}^0$ noktalarının koordinatları bulunur. $H2^0$ noktası ve bu noktanın manipülatör uzunluğu, 3D koordinatları bulan yazılım tarafından üretilmişlerdir. Böylece elde edilen noktala ait koordinatlar Tablo 3.4’de bir arada verilmiştir.

Tablo 3.4. İşlem yapılan noktalar ve koordinatları

Nokta adı	Nokta koordinatları			Manipülatör koordinatları		
	X	Y	Z	X	Y	Z
M1 _{AB}	-107,349	227,637	716,817	-	-	-
M1 _{CD}	-171,524	227,491	716,954	-	-	-
H1	-92,967	228,490	713,309	-	-	-
MH1	-	-	-	-	-	-
$M2_{AB}^0$	-70,871	216,222	757,408	-138,374	10,741	219,734
$M2_{CD}^0$	-4,863	212,109	738,960	-70,207	11,913	211,595
$H2^0$	-77,385	217,526	756,320	-144,728	11,484	217,641
MH2 ⁰	-76,685	216,584	759,033	-144,378	10,637	220,451

Sabit kemiğin doğrultu vektörü için denklem (2.34-2.38)’de verilmiş olan formüller uygulandığında aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$u1_x = -171,524 - (-107,349) = -64,175 \quad (3.7)$$

$$u1_y = 227,491 - 227,637 = -0,146 \quad (3.8)$$

$$u1_z = 716,954 - 716,817 = 0,137 \quad (3.9)$$

Bu adımda hedeflenen noktaların koordinatları, Bölüm 2.11.1.’de anlatıldığı gibi hesaplanarak Tablo 3.5.’deki gibi bulunmuştur. Aynı tabloda aranan koordinatlara erişebilmek için PSO algoritmasının ürettiği çözümler ve ileri kinematik ile elde edilen koordinat bilgileri vardır. Bu tablo ile gerçekleştirilen işi kıyaslamak mümkün olmuştur. Yalnız unutulmamalıdır ki, PSO algoritması her çalıştırıldığında sonuca ulaşmakla beraber farklı değerler üretebilir. Yani aynı sonuca farklı değerlerle ulaşabilir.

Tablo 3.5. Şimdiki ve 1. adım sonunda olması gereken koordinatlar

Mevcut Koordinatlar				Hesaplanan Koordinatlar			
Nokta	X	Y	Z	Nokta	X	Y	Z
MH2 ⁰	-76,685	216,584	759,033	MH2 ¹	-76,836	216,609	758,044
M2 _{CD} ⁰	-4,863	212,109	738,960	M2 _{CD} ¹	-2,128	216,779	757,886

Tablo 3.6. Birinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü

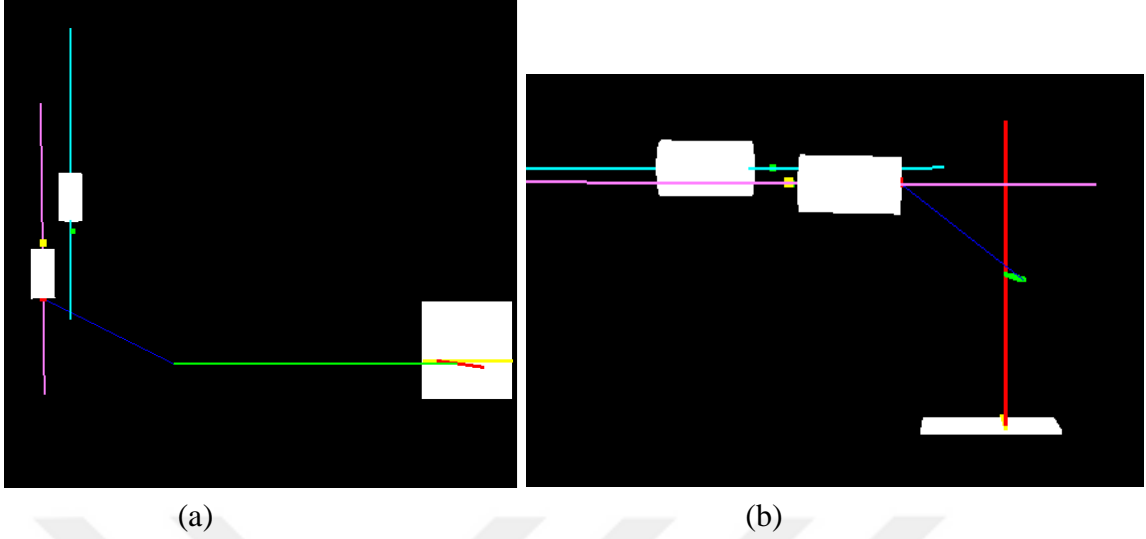
PSO çözümü			Çözüm sonucu	
Eksen	Doğrusal (mm)	Döner (°)	MH2 ¹	M2 _{CD} ¹
X	91,032	-14,490	-76,836	-2,128
Y	149,916	-6,391	216,609	216,779
Z	124,676	-0,655	758,044	757,886

Tablo 3.7. Birinci adım sonunda PSO ile bulunan çözümün robottaki sonucu

PSO çözümünün ileri kinematik sonucu			
Nokta	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
H2 ¹	-76,996	212,977	756,176
MH2 ¹	-76,859	216,613	758,166
M2 _{AB} ¹	-70,923	212,884	759,077
M2 _{CD} ¹	-2,154	216,890	757,534

Tablo 3.5.'de verilen koordinatlar mevcut koordinatlar (başlangıçta elde edilen koordinatlar) ile bu adımın sonunda hedeflenen koordinatlarıdır. Tablo 3.6.'da hesaplanan koordinatlara robot manipülatörünün taşınması için enkoderlerden okunması gereken konumları vermektedir. Bu konumlar PSO algoritması ile bulunmuştur. Tablo 3.7.'de ise PSO algoritmasından elde edilen çözümün, ileri kinematik denklemlere uyguladığında elde edilen koordinatlardır. Görüldüğü üzere hedeflenen koordinatlar ile çözüm sonucu gelinen koordinatlar ihmal edilebilecek kadar birbirlerine yakındır.

Şekil 3.3.'de PSO ile bulunan çözüm, robota uygulandığında ekranda oluşan görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.3. Birinci adım sonunda kemiklerin OpenGL’de gösterimi. a:üsten, b:önden

3.6.2. Robotun 2. Adımı Uygulanması

Bu bölümde kemiklerin arasındaki açıklık ayarlanmıştır. Kemiklerin arasındaki açıklığın nasıl ayarlandığı bölüm 2.11.2’de anlatılmıştır. Burada koordinatı aranan tek nokta vardır. Çünkü kemiğin doğrultusu değişmeyecektir. Bundan dolayı, sadece doğrusal hareket yapan motorların kontrolü gereklidir. PSO algoritması sadece o noktayı bulmak için çalıştırılmıştır ve sadece üç adet değişkenin değerini aramıştır. Çünkü doprusal hareketi yapan eklem sayısı üç tanedir. Döner hareket yapan motorların hareket etmesi gerekmez. Kemiklerin arasında 10 mm açıklık olması için aşağıdaki değerler elde edilmiştir ve sonuçlar tablolar halinde verilmiştir.

MH1 noktasının koordinatlarını bulmak denklem (2.61-2.67)’de verilen işlemler uygulandığında aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

$$MH1_x = -60,502 \quad (3.10)$$

$$MH1_y = 228,720 \quad (3.11)$$

$$MH1_z = 716,861 \quad (3.12)$$

Tablo 3.4.’de eksik olan değer artık bulunmuştur. Bu durumda son durum Tablo 3.8.’de verildiği gibi olur.

Tablo 3.8. İşlem yapılan noktalar ve koordinatlarının güncellenmiş hali

	Nokta	Nokta koordinatları			Manipülâtör koordinatları		
		X	Y	Z			
Sabit kemik	M1 _{AB}	-107,349	227,637	716,817	-	-	-
	M1 _{CD}	-171,524	227,491	716,954	-	-	-
	H1	-92,967	228,490	713,309	-	-	-
	MH1	-60,502	228,720	716,861	-	-	-
Hareketli kemik	M2 ⁰ _{AB}	-70,871	216,222	757,408	-138,374	10,741	219,734
	M2 ⁰ _{CD}	-4,863	212,109	738,960	-70,207	11,913	211,595
	H2 ⁰	-77,385	217,526	756,320	-144,728	11,484	217,641
	MH2 ⁰	-76,685	216,584	759,033	-144,378	10,637	220,451

Bu adımda H2¹ noktasının gideceği koordinatlar hesaplanmış ve H2² olarak isimlendirilmiştir. Denklem (2.77-2.81)'de verilen formüller uygulandığında Tablo 3.9'da verilen değerler elde edilmiştir.

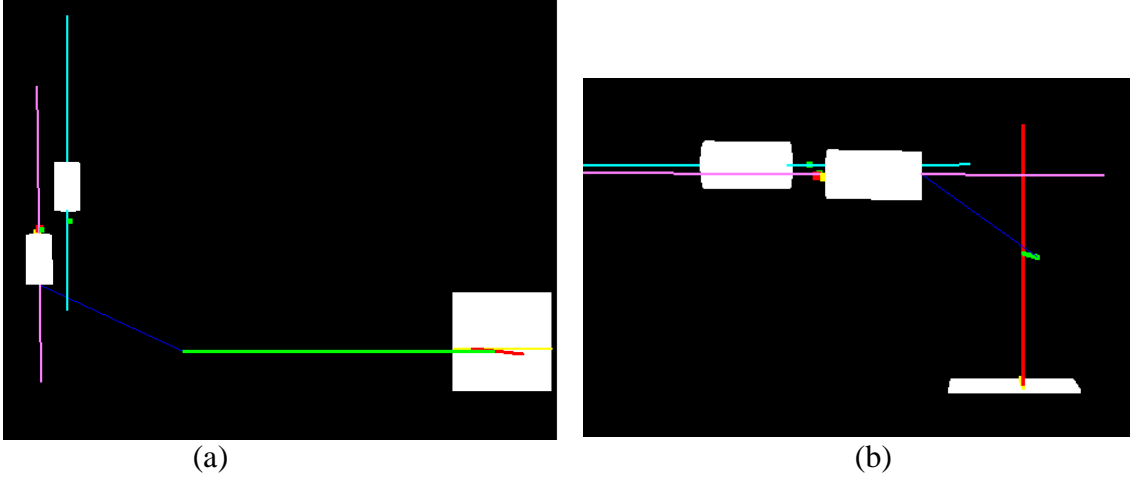
Tablo 3.9. Şimdiki ve 2. adım sonunda olması gereken koordinatlar

Nokta	Mevcut Koordinatlar			Nokta	Hesaplanan Koordinatlar		
	X	Y	Z		X	Y	Z
H2 ¹	-76,685	216,584	759,033	H2 ²	-82,853	217,539	755,343

Bu noktanın koordinatlarını bulmak için PSO algoritması, üç adet değişkenin değerini aramıştır ve tüm değişkenlerin değeri ile bu değerlere göre elde edilen sonuç Tablo 3.10.'da ve bu sonuca göre kemiklerin ekrandaki görüntüleri ise Şekil 3.4.'de verilmiştir.

Tablo 3.10. İkinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü

Eksen	PSO çözümü		Çözüm sonucu H2 ²
	Doğrusal (mm)	Döner (°)	
X	85,021	-14,000	-82,870
Y	152,584	-6,391	217,624
Z	121,290	-0,655	755,309



Şekil 3.4. İkinci adım sonunda kemiklerin OpenGL’de gösterimi. a: üstten, b:önden

3.6.3. Robotun 3. Adımı Uygulanması

Bu adımda hareketli kemiğin doğrusu, hareketsiz kemiğin doğrusu üzerine getirilmiştir. Zaten her iki kemik birbirlerine paralel durumdadırlar. Bu işlemi yapabilmek için doğrusal hareketlerle, hareketli kemik üzerindeki herhangi bir noktayı bu doğru üzerine getirmek yeterlidir. Bu uygulamada $M2_{AB}^2$ noktası, sabit kemik üzerine taşınmıştır ve $M2_{AB}^3$ olarak isimlendirilmiştir. Denklem (2.82-2.88)’de verilen formüller burada uygulandığında Tablo 3.11.’de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

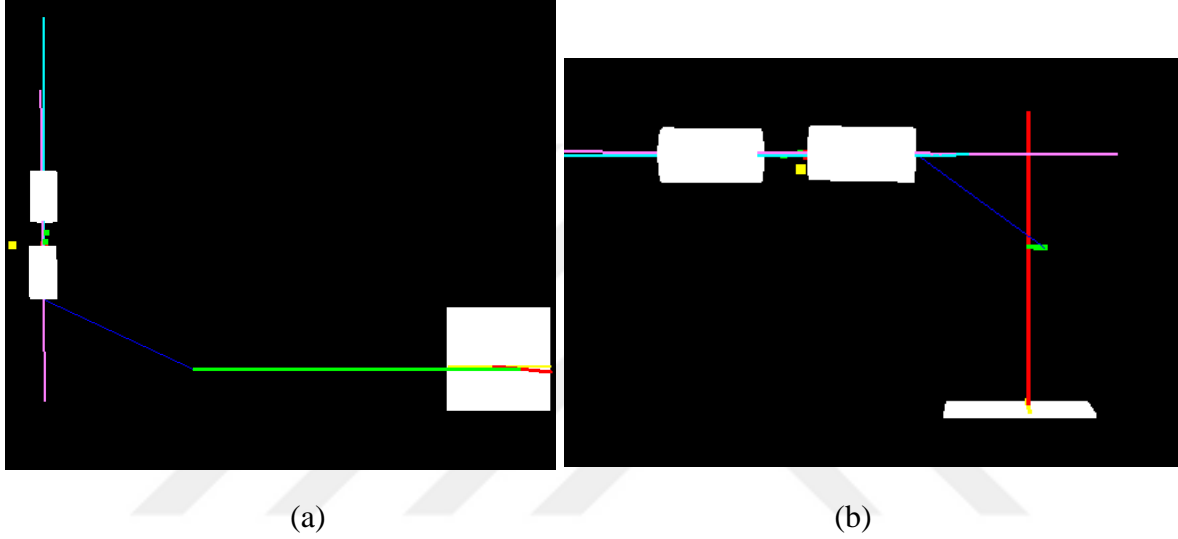
Tablo 3.11. Şimdiki ve 3. adım sonunda olması gereken koordinatlar

Nokta	Mevcut Koordinatlar			Nokta	Hesaplanan Koordinatlar		
	X	Y	Z		X	Y	Z
$M2_{AB}^2$	-76,934	213,887	756,223	$M2_{AB}^3$	-76,948	227,707	716,753

Bu noktanın koordinatlarını bulmak için PSO algoritması, üç adet değişkenin değerini aramıştır, çünkü sadece doğrusal hareket yapılması planlanmıştır. Bu durumda enkoder verilerinden sadece üç tanesinin değeri değişmiştir. PSO ile elde edilen çözüme ileri kinematik denklemleri uygulandığında bulunan sonuç Tablo 3.12.’ verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere döner hareket yapılmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre robot manipülatörü istenilen konuma taşınmıştır. Bu durumda ekranda oluşan kemiklere ait görünüm iki farklı açıdan Şekil 3.5.’ verilmiştir.

Tablo 3.12. Üçüncü adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü

PSO çözümü			Çözüm sonucu
Eksen	Doğrusal (mm)	Döner (°)	M_{2AB}^3
X	84,986	-14,000	-76,858
Y	162,857	-6,391	227,919
Z	83,151	-0,655	717,119



Şekil 3.5. Üçüncü adım sonunda kemiklerin OpenGL’de gösterimi. a: üsten, b:önden

3.6.4. Robotun 4. Adımı Uygulanması

Bundan önceki adımlar sonucunda, hareketli olan kemiğin doğrultusu sabit kemiğin doğrusu üzerine getirilmiştir. Yani kemiklerin merkezlerinden geçen doğrular artık aynı doğruyu ifade etmektedir. Kemiklerin aynı doğru üzerinde olması her zaman için yeterli bir sonuç değildir. Hareketli kemik kendi ekseninde dönük durumda olabilir.

Bu adımda, hareketli kemiğin kendi ekseninde bir dönüklük olması durumunda, bu dönüklüğün düzeltilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte düzeltme sırasında da mevcut doğrultusunun bozulmaması gerekir. Bu amaçla denklem (2.89-2.98)’de verilen formüller uygulandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve tablolar halinde verilmiştir.

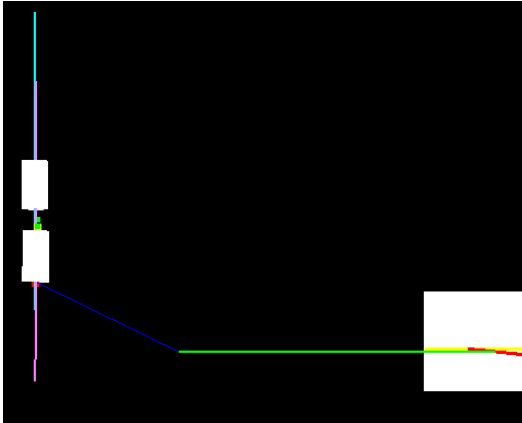
Tablo 3.13. Şimdiki ve 4. adım sonunda olması gereken koordinatlar

Mevcut Koordinatlar				Hesaplanan Koordinatlar			
Nokta	X	Y	Z	Nokta	X	Y	Z
$H2^3$	-83,042	224,278	715,183	$H2^4$	-82,967	228,512	713,288
$M2_{CD}^3$	-8,311	224,420	717,504	$M2_{CD}^4$	-8,249	227,863	716,608

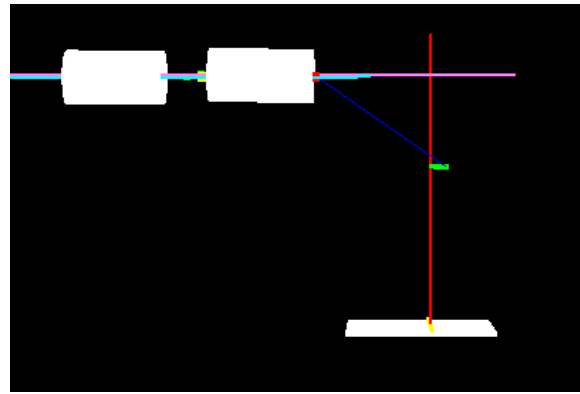
Burada bulunması gereken iki adet noktanın koordinatlarıdır. Hareketli kemiği kendi eksenini etrafında döndürebilmek için, hem doğrusal hem de döner hareket eden mekanizmaların çalışması gerekir. Sadece doğrusal hareket eden mekanizma ile kemik kendi eksenini etrafında döndürülemez, döner hareket bu aşamada zorunludur. Sadece dönme hareketi yapan uzuvların kullanılması durumunda da kemiğin doğrusu ve/veya doğrultusu bozulur. Bu nedenle tüm eklemlerde hareket beklenir. Bu amaçla PSO algoritması iki noktanın aynı anda sağlanması amacıyla altı adet değişkenin değerini arar. PSO algoritmasının bulduğu çözüm ve bunun sonucunda ileri kinematik ile bulunan koordinatlar Tablo 3.14.'de verilmiştir. Şekil 3.6.'da ise ekrandaki görüntünün gelinen son hali vardır.

Tablo 3.14. Dördüncü adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü

PSO çözümü			Çözüm sonucu	
Eksen	Doğrusal (mm)	Döner (°)	$H2^4$	$M2_{CD}^4$
X	85,702	-13,512	-83,047	-8,338
Y	163,540	-6,675	228,498	227,884
Z	83,228	-1,305	713,633	716,512



(a)



(b)

Şekil 3.6. Dördüncü adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b:önden

3.6.5. Robotun 5. Adımı Uygulanması

Önceki adımda, kırık kemikler birbirlerinden uzakta ama aynı doğru üzerinde hizalanmış duruma getirilmiştir. Doğrultuları, hatta üzerinde buldukları doğru aynıdır. Sadece doğruları boyunca birbirlerinden uzaktadırlar. Bu adımda amaç, işaretlenmiş olan hedef noktaları doğrultularını bozmadan birbirlerine yaklaştırmaktır. Bu amaçla $H2^5$ noktasının koordinatları aranmalıdır. Fakat her iki nokta birbirine değeceğinden dolayı, $H2^5$ 'in değeri $H1$ noktası ile olacaktır. Burada geometrik bir hesaba gerek kalmamıştır. Bu adımda sadece ters kinematik problemi çözmek yeterlidir.

Ters kinematik çözüm için sadece doğrusal hareket eden eklemlerin değeri aranacaktır. Çünkü doğrultuda bir değişiklik istenmemektedir. PSO algoritması bir adet noktanın koordinatı bulmak üzere çalıştırılmıştır ve sadece üç adet değişken için çözüm bulmuştur. Bu çözüm sonucunda elde edilen değerler ve bu çözümün ileri kinematik ile hesaplanan sonucu Tablo 3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.15. Şimdiki ve 5. adım sonunda olması gereken koordinatlar

Mevcut Koordinatlar				Hesaplanan Koordinatlar			
Nokta	X	Y	Z	Nokta	X	Y	Z
$H2^4$	-83,163	224,730	714,599	$H2^5$	-92,967	228,490	713,309

Tablo 3.16. Beşinci adım için PSO ile bulunan ters kinematik çözümü

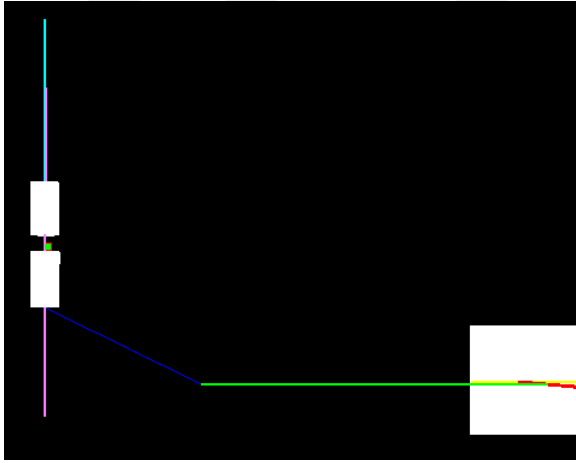
PSO çözümü			Çözüm sonucu
Eksen	Doğrusal (mm)	Döner (°)	$H2^5$
X	76,903	-13,512	-92,973
Y	163,573	-7,000	228,307
Z	83,805	-1,305	713,277

Bu adımla redüksiyon işlemi tamamlanmıştır. Sonuçta beklenen $H2$ noktasının, $H1$ noktasına taşınmasıdır. Görüldüğü üzere bu iki nokta yeterince ve kabul edilebilecek bir mesafe ile birbirlerine yaklaşmışlardır. Sabit kemiğin hedef noktası $H1$ ve hareketli kemiğin hedef noktasının son konumu olan $H2^5$ noktalarının koordinat değerleri Tablo 3.17.'de verilmiştir.

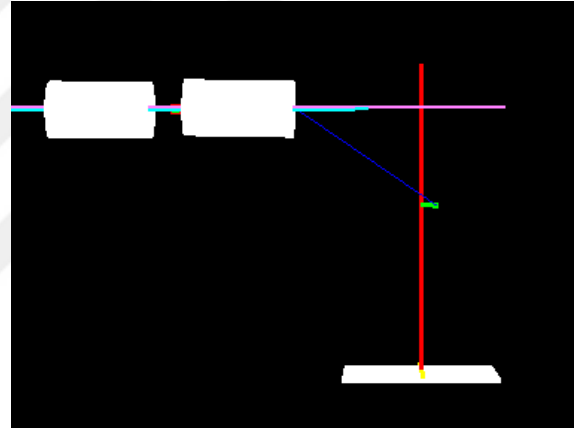
Elde edilen çözüme robotun eklemlerinin taşınması sonucu bilgisayardaki kemiklere ait son görüntü ise Şekil 3.7.'de verilmiştir. Ekrandaki görüntü bu halde iken, robotun hareketleri sonucu kemiklerin gerçek görüntüleri de Şekil 3.8.'de görüldüğü hali almıştır.

Tablo 3.17. İki hedef noktanın koordinatları ve üç eksendeki farkları

Nokta adı	X	Y	Z
H1	-92,967	228,490	713,309
H2 ⁵	-92,973	228,307	713,277
Fark	0,006	0,183	0,032



(a)



(b)

Şekil 3.7. Beşinci adım sonunda kemiklerin OpenGL'de gösterimi. a: üstten, b:önden



Şekil 3.8. Redüksiyonu yapılmış kemikler

3.6.6. Tasarlanan Yolun İrdelemesi

Yolun tasarlanmasında, başlangıç pozisyonu ne olursa olsun başarılı bir redüksiyonun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Kemiklerin hareketleri sırasında birbirlerine çarpma, sürtünme vb. yollarla hasar görmemesi ve aynı şekilde kemik olmayan yumuşak dokuların da fazla gerilmesi, esnemesi, yırtılması vb. olumsuz durumların oluşmaması hedeflenmiştir. Bu amaçla beş adımdan oluşan bir hareketler zinciri yol olarak tanımlanmıştır.

Yol tasarımındaki her bir adımın ters kinematik çözümü PSO algoritması ile çözülmüştür ve bulunan bu çözümü yazılımın gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Yapılan denemelerde olumsuz bir durumla karşılaşılmasıdır. Fakat uğraşılan konu insan sağlığı olmasından ötürü, her adımda hekimin onayı beklenmiştir. Bu amaçla, her adımda önerilen yol, OpenGL ile simüle edilerek gösterilmiştir. Bu gösterim sırasında robotta herhangi bir hareket olmaz. Eğer hekim simülasyonu gösterilen hareketi uygun görürse, bu adımı robotun yapmasına izin verir. Böylece, olası herhangi bir hatalı yol için önlem alınmış ve hekimin onayından geçen bir çözüm harekete dönüştürülmüş olur.

Daha az adımlı yol çözümleri tanımlamak mümkündür. Fakat adım sayısının artırılması ile hekimin kontrolü ve onayının da artırıyor olması, böyle bir yolun tercihinde etkili olmuştur.

Yazılım, her bir adımı gerçekleştirip bir sonraki adım için komut bekler. Fakat eğer hekim isterse, tüm adımları artarda da yaptırması mümkündür. Bunun için yazılım ara yüzü ile seçenek sunulmuştur.

Robotun ve uygulanan harici fiksator uygulamalı çözümün kendine özgün olmasından dolayı, doğal olarak tasarlanan ve uygulanan bu yol çalışması da özgün bir çalışma olmuştur. Literatür bölümünde bahsedildiği üzere, benzeri yol çalışmaları olsa da, önerilen bu yöntem bunlardan farklıdır.

3.7. Önerilen PSO Algoritmasının Kıyaslanması

Değişiklik yapılarak önerilen PSO ile klasik PSO algoritması, robotun ilk adımı için denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kemiklerin birbirlerine göre pozisyonları değiştirilerek, farklı başlangıç pozisyonlarında aynı çözüm aranmıştır.

Parçacık sayısı 3000 ve yaklaşma kriteri 0,2 mm seçilerek her iki algoritma ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Klasik PSO algoritmasının adım sayısı 500 ile sınırlanmış, bu adım sayısına kadar çözüme ulaşamamış ise başarısız sayılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.19.'da verilmiştir.

Tablo 3.18. Klasik ve önerilen PSO algoritmalarının kıyaslanması

	Yöntem	
	<i>Klasik PSO (Maks. 500 adım)</i>	<i>Otomatik sonlandırma</i>
<i>Deney adedi</i>	40	40
<i>Çözüme ulaşan deney adedi</i>	9	40
<i>Toplam adım sayısı</i>	15.733	2.491
<i>Ortalama adım sayısı</i>	393,325	62,275
<i>En erken çözüme ulaşma sayısı</i>	7	33
<i>Birincilik yüzdesi (%)</i>	17,5	82,5

Tablodan da görüldüğü üzere klasik PSO algoritması 40 adet denemeden sadece 9 tanesinde istenilen çözümü bulabilmiştir. Adım sayısı 500 ile sınırlandırıldığı için bazı çözümlere ulaşamamıştır. Oysa önerilen yöntem, tüm denemelerde çözüme ulaşmıştır ve bunların 33 tanesinde klasik PSO yönteminden daha hızlı çözüme ulaşmıştır.

Yerel minimuma takılma sorunu, birden fazla çözümü olan problemlerde klasik PSO algoritmasının başarısını olumsuz etkilemektedir. Fakat önerilen yöntem oldukça başarılı olmuştur. Robotun amacı olan kırık kemiklerin redüksiyonu işleminde, en yakındaki çözümü bulmak tercih sebebidir. Önerilen PSO algoritması, en yakındaki çözümü bulmada daha başarılı olmuştur. Yapılan tüm denemelerde bu yöntem başarılı bir şekilde çalışmıştır.

3.8. Kumanda ile Redüksiyon

Uzaktan kumanda ünitesi, kemiklerin redüksiyonunu manuel bir şekilde kontrol etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu nedenle tüm kontrol hekimin elindedir. Kumandanın şekli, her bir butonun hangi yönde harekete neden olacağını kolayca anlaşılabilir olması düşüncesiyle tasarlanmıştır. Fakat yine de bakış açısına göre bazı durumlarda alışılana kadar karışıklıklara neden olabilmektedir.

Her ne kadar tüm hareketler kumanda ile yapılabilir olsa da, hız ayarı ve uygulanabilecek maksimum güç ayarı yazılım tarafından kontrol edilmektedir.

3.9. Hayvan Deneyi Uygulaması

Harici fiksator uygulanan kırık kemiklerin tedavisinde kemiklerin redüksiyonu için geliştirilen bu robotun, çalışması esnasında kemiklere ve yumuşak dokuya zarar verip vermediğinin tespiti için deney hayvanı çalışması yapılmıştır.

Bu amaçla Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu'nun onayı ile koyun üzerinde gerekli testler yapılmıştır. Genel anestezi altında koyunun femur kemiği kırılmış ve kırığın her iki tarafındaki kemiklere ikişer adet çivi yerleştirilmiştir. Bu çiviler aracılığı ile kemikler robot manipülatörüne sabitlenmiştir. Değişik pozisyonlara getirilen kemikler hem elle, hem de robot vasıtasıyla manuel olarak redüksiyon işlemine tabi tutulmuştur.

Yapılan redüksiyon işlemlerinde, robotun daha başarılı olduğu ve kemiklere veya diğer dokulara herhangi bir zarar vermediği veya olumsuz herhangi bir duruma sebep olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca robot yardımı ile yapılan redüksiyon işlemlerinde hekimin sıfır radyasyona maruz kaldığı belirtilmiştir. Ek 1.'de Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu'nun onayı ile gerçekleştirilen uygulama sonucunda hazırlanan rapor verilmiştir.

İnsan deneyinin yapılabilmesi amacıyla, gerekli yasal prosedürlerin hazırlık çalışmaları devam etmektedir.

4. SONUÇLAR

Kırık kemiklerin harici fiksator uygulamalı tedavilerinde kemiklerin redüksiyonu için, duyulan ihtiyaç üzerine multidisipliner bir çalışma sonucunda otomatik redüksiyon robotu tasarlanarak prototipi imal edilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar genel hatlarıyla aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Üç eksen de öteleme ve üç eksen de dönme hareketi yapabilen medikal bir robot imal edilmiştir.
2. Altı serbestlik derecesine sahip robotu kontrol eden, elektronik devre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu devre, robota ait koordinat bilgilerini ve yük hücrelerinden alınan verileri bilgisayar yazılımına göndermektedir. Aynı zamanda, gelen komuta göre robotun uzuvlarını hareket ettiren motorları kontrol etmektedir. Üzerindeki yedi adet mikrodenetleyici için gömülü yazılımlar yapılmıştır.
3. Robotun uzaktan kontrolünü yapabilen bir kumanda devresi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikrodenetleyicinin yazılımı yapılmıştır. Hekim isterse; kemiklerinin redüksiyonunu bu kumandayı kullanarak yapabilmektedir.
4. Robottan gelen verileri işleyen ve robota komut gönderen Delphi tabanlı bilgisayar yazılımı gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım robotun tam kontrolünü yapabilmektedir. Üç eksen de robot manipülatörüne uygulanan kuvvetleri ekranda göstermektedir. Böylece hekim hangi yönde ne kadar bir baskı oluşturduğunu sürekli gözlemleyebilir. Aynı zamanda kemiklerin pozisyonları da OpenGL aracılığı ile gösterilmektedir. Hekim, her eksen için ayrı bir yük sınırı belirleyebilir. Robotun uyguladığı kuvvet bu sınırlara eriştiğinde, yazılım bu kuvveti artıracak yöndeki hareketleri engeller. Hekim uygun gördüğünde bu kuvvet sınırlarını değiştirebilir. Böylece kemiklerin veya diğer dokuların zarar görmemesi sağlanmıştır.
5. Kırık kemiklerin 2D görüntülerinden, 3D koordinat bilgileri elde edilmiştir. OpenCV kütüphanesi kullanılarak, Python ile program yazılmıştır. Bu program sayesinde iki adet farklı açıdan alınan 2D görüntüler üzerinde gerekli işaretlemeler yapılarak, 3D koordinat bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen bu koordinatlar, robotun koordinat sistemine dönüştürülmüşlerdir. Böylece,

kemiklerin pozisyonları yazılım tarafından elde edilmiştir ve bilgisayar ekranında da gösterilmiştir.

6. Gerçekleştirilen robotun ileri kinematik çözümü yapılmıştır. Her bir uzvun ne kadar hareket ettiği, enkoderler sayesinde ölçülmektedir. Encoderlerden gelen bu konum bilgileri, homojen koordinat sistemine dönüştürülmüş ve ileri kinematik için gerekli denklemler elde edilmiştir. Bu sayede herhangi bir anda robot manipülatörünün konumu belirlenebilmektedir. Her veri geldiğinde yazılım gerekli güncelleştirmeleri yapmaktadır.
7. Robotun ters kinematik çözümü için değiştirilmiş bir PSO algoritması geliştirilmiştir. Robot manipülatörünü istenen şekilde konumlandırabilmek için, ters kinematik çözüm birden fazladır. Kemikleri çok fazla ve uygunsuz bir hareket yapmadan istenilen pozisyona getirebilmek için, en yakında olan çözüm tercih edilir. Bu amaçla, PSO algoritmasının en yakındaki çözümü bulması amacıyla klasik PSO algoritmasında basit bir değişiklik yapılmıştır. Bu yöntem ile en yakındaki çözümü bulan ve sonuca daha çabuk erişen bir yöntem geliştirilmiştir. Yapılan tüm denemelerde bu algoritma istenilen çözüme ulaşmıştır.
8. Kırık kemiklerin otomatik redüksiyonu için yeni bir yol önerisi yapılmış ve denenmiştir. Bu öneride kırık olan kemiklerin, başlangıçta hangi pozisyonda olursa olsun herhangi bir hasara neden olmadan redüksiyonunu hedeflemektedir. Bu amaçla manipülatörün hareketi ile redüksiyon işlemini 5 adımda tamamlayan bir yol geliştirilmiştir. Yazılım, önerilen yol için her adımda nasıl bir hareket yapacağını OpenGL ortamında simülasyon yaparak gösterir. Eğer hekim de önerilen bu yolu uygun bulursa, yazılım robotu yönlendirir ve gösterilen yolu takip ederek redüksiyon işlemini yapar.
9. Kırık kemiklerin harici fiksator kullanılan tedavilerinde, redüksiyon işlemini elle redüksiyona kıyasla daha düzgün ve daha hızlı yapan bir çözüm üretilmiştir. Hem manuel hem de otomatik çözüm sunan robot, güçlü olduğu ve aynı gücü sürekli muhafaza edebildiği için kemiklerin hareket ettirilmesi çok daha kolay olmaktadır. Kemikler istenilen pozisyonda tutularak, röntgen üzerinden gerekli görüntüleme ve kontrol işlemleri çok daha rahat yapılabilmektedir. Redüksiyon süresince hekimin her iki eli de serbest kalmaktadır.

10. Redüksiyon sırasında, yapılan tüm hareketler kontrol altındadır. Gücü yetmeme, uzun süre tutamama vb. sorunlar yaşanmadığı için redüksiyon işlemi daha kararlı ve hassas yapılabilmektedir. Bu sayede operasyon süresi de oldukça kısalmaktadır. Bunlardan dolayı daha az röntgen görüntülerine ihtiyaç olmaktadır ve böylece hastanın alacağı radyasyon miktarı azaltılmıştır.
11. Robot marifetiyle yapılan redüksiyon işlemi sırasında, sağlık personelinin hasta ile aynı odada bulunması gerekmez. Uzaktan kumanda yeteneği sayesinde, hekim bir başka odadan robotu kontrol ederek istediği kalitede redüksiyon yapabilmektedir. Böylece sağlık personeli hiç radyasyona maruz kalmadan bu işlem gerçekleştirilebilmektedir.
12. Robot sayesinde redüksiyonun süresi kısalmıştır. Hem iş gücü, hem de zaman kazancı oldukça fazladır.
13. Redüksiyon için sağlık personelinin kas gücüne artık ihtiyaç kalmadığından dolayı, operasyon için ihtiyaç duyulan sağlık personelinin sayısı azalmıştır.
14. Robot sayesinde, küçük miktarlarda hareketleri yapmak mümkündür. Ayrıca kırık olan kemikler istenilen baskı ile sabitlenebilmektedir. Böylece anatomik tam redüksiyon yapılabilmektedir. Bu durum kırık kemiklerin iyileşme sürecini kısılacaktır.
15. Radyasyon altında çalışan sağlık personellerinin maruz kaldıkları radyasyon miktarı sürekli olarak ölçülmektedir. Belli süre içerisinde, belirlenen değerlerin üzerinde radyasyona maruz kalanların, daha fazla zararlı ışınlarla maruz kalmaları engellenmektedir. Bu nedenle radyasyona fazla maruz kalan sağlık personeli belli bir süre bu tür operasyonlara giremeyebilir. Robot sayesinde sağlık personeli redüksiyondan kaynaklı hiç radyasyon almayacağı için bu kısıtlanma durumuna olumlu katkı sağlanmaktadır. Doğal olarak bu durum sağlıkları için de faydalıdır.
16. Geliştirilen robot ile hem manuel, hem de otomatik redüksiyon mümkündür. Hekim isterse uzaktan kumanda ünitesi ile redüksiyonu kendi yapabilir veya görüntüler üzerinde gerekli yerleri işaretleyerek, redüksiyonu robotun yapmasına müsaade edebilir.
17. Hekimin hatalı bir komut vermesi durumunda bile, kemiklerin ve diğer yumuşak dokuların hasar görmesi engellenmiştir. Bunun için üç eksen de yük ölçümü yapılmaktadır.

18. Operasyon sırasında el titremesinden kaynaklanan sorunlar, robot sayesinde bertaraf edilmiştir.
19. Robotun manuel kumanda ile redüksiyon işlemi sırasında, hayvan deneyi uygulaması ile hastaya zarar vermediği, kullanılabilir olduğu, redüksiyonu başarabildiği ve hekimin hiç radyasyona maruz kalmadığı belgelenmiştir (Ek-2).
20. Sağlık sektöründe kullanıma sunulması amacıyla, insan deneylerinin yapılması için yasal ve bürokratik işlemler yerine getirilmeye çalışılmaktadır. Gerekli onaylar alındıktan sonra insan üzerinde deneylerin yapılması planlanmaktadır.
21. Geliştirilen robot mekanizmasının dönme hareketlerini gerçekleştirebilmesi için kullanılan kardan mekanizması hakkında incelemeli patent alınmıştır (Ek-2).
22. Geliştirilen robotun, “Roborto” adıyla marka tescili yapılmıştır (Ek-3).
23. Robotun mekanik kısımlarının geliştirilmesinde KOSGEB desteği vardır ve ticari bir ürün olması hedeflenmektedir..
24. Tüm yazılımlar “Samsun Teknoloji Geliştirme Bölgesi” içerisinde projelendirilerek yapılmıştır.

5. ÖNERİLER

1. Elektronik Devreler: Tasarlanan elektronik devrelerin çalışmasında bir sorun tespit edilememiştir. Bu haliyle kullanılabilir durumdadır ve ihtiyacı görmektedir. Uzaktan kumanda ünitesi ile ana devre arasındaki bağlantı RS485 katmanı ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantı türü, IP protokolü ile çalışan bir haberleşme sistemine dönüşebilir. TCP/IP kullanılması durumunda, bu haberleşme protokolü kendisi hata tespit ve düzeltme, yeniden gönderme gibi özelliklere sahip olduğundan, iletişim güvenliği bakımından daha sağlıklı olabilir.
2. Mekanizma: Robotun uzuvları, manipülatörün kemiklere kolayca takılabilecek şekilde, hastanın üzerinde bulunduğu sedye veya masaya uygun ve skopi cihazının kullanımı etkilemeyecek şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda ihtiyaç duyulacak olan kuvveti taşıyabilecek mukavemette ve ergonomide tasarlanmıştır. Robot frenlenebilen tekerler üzerinde hareket edebilmektedir. Bununla birlikte, daha kullanışlı ve daha ergonomik seçenekler üzerinde çalışılabilir. Robot kullanıldıkça karşılaşılabilecek sorunlardan elde edilecek olan tecrübe ile bu alanda geliştirmeler ve farklılıklar olabilir.
3. Loadcell Mekanizması: Kemiklere uygulanan yükü ölçmek için üç adet loadcell (yük hücresi) kullanılmıştır. Bu sayede her eksende kemiğe etki eden kuvvetler bulunmaya çalışılmıştır. Kullanılan yük hücreleri S-tipi olup, her iki yönde de kuvveti okuyabilmektedir. Yük hücreleri yerleştirilirken, sadece istenilen eksenlerdeki kuvvetleri okumaları hedeflenmiştir, fakat mekanizmadan ve imalattan kaynaklanan zorluklardan dolayı tam olarak istenildiği gibi olamamıştır. Kullanılabilir durumda olmakla beraber, daha iyileri üzerinde çalışılmalıdır. Yük hücrelerini daha hassas duruma getirebilmek amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Hatta buradan kaynaklı ihtiyaçtan dolayı, kuvvetin doğrultusunu ve şiddetini ölçebilen bir loadcell geliştirilmiştir. Tasarlanan bu loadcell için patent işlemleri devam etmektedir, fakat bu robota henüz uygulanmamıştır.
4. Uzaktan Kumanda: Tasarlanan uzaktan kumanda, kolay anlaşılabilir ve kullanılabilir şekilde imal edilmiştir. Daha farklı şekillerde de tasarlanabilir; daha esnek ve ergonomik yapıda kumanda ünitesi geliştirilebilir. Kırıgın şeklini alacak şekilde kumanda geliştirilebilir; kumandadaki temsili kemiklerin redüksiyonu

yapılınca, aynı hareketleri takip ederek gerçek kemiklerin de redüksiyonu yapılabilir. Hatta kemiğe uygulanan kuvveti kumandayı kullanana hissettirecek haptik kollar üzerinde çalışılabilir.

5. Röntgen Cihazından Okuma: Kırık kemiklerin mevcut pozisyonlarını görmek ve yapılan redüksiyon işleminin sonucunun kontrol edilmesi amacıyla C-kollu skopi cihazı kullanılmaktadır. MR gibi diğer görüntüleme cihazları genelde ameliyathaneler için pek kullanışlı olmamaktadır. Bu nedenle en yaygın kullanılan C-kollu röntgen cihazlarıdır. Kırık olan uzvun etrafında farklı açılardan alınan görüntüler ile kemiklerin pozisyonları her istenildiğinde görüntülenebilir. Yapılan çalışmada da bu C-kollu skopi kullanılarak, farklı iki açıdan görüntü almak suretiyle, kemiklerin pozisyonlarının tespit edilerek bilgisayara aktarılması hedeflenmiştir. Fotoğraf makinesi kullanılarak model kemik üzerinde çalışılmıştır. Röntgen cihazı üzerinde otomatik redüksiyon için çalışmalar mutlaka yapılmalıdır. Bunun için konum, açı, koordinat vb. bilgileri de veren skopi cihazları üzerinde denemeler gereklidir.
6. Görüntü İşleme: Kırık kemiğin her iki parçasının 3D koordinatlarını öğrenmek için, farklı iki açıdan çekilen görüntü çiftleri üzerinde gerekli işaretlemeler yapılmaktadır. 3D koordinatları öğrenmek için farklı yöntemler denenmelidir. Kemikler, silindirik şekillere benzetilerek ekranda modellenmiştir. Bunun yerine, kenar işleme algoritmaları kullanılarak, kemikler elipsoid şekillere benzetilerek daha uygun görüntüler elde edilebilir. Görüntü çiftleri üzerinde işaretleme yapılmadan da kemiklerin konumlarının öğrenilmesi üzerine çalışmalar yapılmalıdır. OpenGL ile gösterimlerde doku kaplama ve ışıklandırma özellikleri eklenerek daha kolay anlaşılabilir ve daha fazla ayrıntı veren görüntüler üretilmelidir.
7. Yapay Zekâ: Kemiklerin redüksiyonu için, hareket ettirilen kemiğin izleyeceği yolu belirlemek amacıyla, robotun ters kinematik çözümünde değiştirilmiş PSO algoritması kullanılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. Bir ihtiyaç olmamakla birlikte, farklı sezgisel algoritmalar ve yapay zekâ çözümleri denenebilir.
8. Tam Otomatik Redüksiyon: Kırık kemik görüntüleri üzerinde işaretlemeler yapılmasına ihtiyaç kalmayacak çözümler üretilebilir ve üretilmelidir. Bu alanda çalışmalar yapılmalıdır. Bu amaçla, aynı anda iki farklı açıdan görüntü alan, 3D modelleme yapan sistemler incelenerek, yapılan cihaz bunlara uygun hale

getirilebilir. Hatta skopi cihazı üreten firmalarla görüşülerek, robot ile aralarında daha fazla uyum sağlayacak çözümler üretilebilir.

9. Teleoperation: Yapılan çalışmada uzaktan operasyon yapan bir sistem geliştirilmiştir. Gerekli güvenlik önlemleri alınarak, internet üzerinden de bu işlemlerin yapılabilmesi hiç de zor değildir. Yapılan işlemleri uzakta bulunan uzman veya ilgili kişilerin izlemesi ve gerektiğinde müdahale edebilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir.



6. KAYNAKLAR

1. Anderson, K. ve Waxman, M., Law and Ethics for Robot Soldiers, Policy Review,176 (2012) 35-49.
2. Allen, C., Wallach, W. ve Smit, I., Why machine ethics?, Ieee Intelligent Systems, 21,4 (2006) 12-17.
3. Mitchell, B., Koo, J., Iordachita, I., Kazanzides, P., Kapoor, A., Handa, J., Hager, G. ve Taylor, R., Development and Application of a New Steady-Hand Manipulator for Retinal Surgery, Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 10-14 Nisan 2007, Roma, Italy, 623-629.
4. Üneri, A., Balicki, M.A., Handa, J., Gehlbach, P., Taylor, R.H. ve Iordachita, I., New steady-hand Eye Robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery, 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 26-29 Eylül 2010, Tokyo, Japan, 814-819.
5. Taylor, R., Jensen, P., Whitcomb, L., Barnes, A., Kumar, R., Stoianovici, D., Gupta, P., Wang, Z.X., deJuan, E. ve Kavoussi, L., A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation, International Journal of Robotics Research, 18,12 (1999) 1201-1210.
6. Tian, W., Wang, H. ve Liu, Y.J., Robot-assisted Anterior Odontoid Screw Fixation: A Case Report, Orthopaedic Surgery, 8,3 (2016) 400-404.
7. <https://www.intuitivesurgical.com/>. 12 Şubat 2018.
8. <https://spectrum.ieee.org/biomedical/devices/heart-surgeons-adapting-to-robots>. 12 Şubat 2018
9. Lum, M.J.H., Friedman, D.C.W., Sankaranarayanan, G., King, H., Fodero, K., Leuschke, R., Hannaford, B., Rosen, J. ve Sinanan, M.N., The RAVEN: Design and Validation of a Telesurgery System, International Journal of Robotics Research, 28,9 (2009) 1183-1197.
10. Griss, P., Concepts in External Fixation - Seligson,D, Pope,M, Biomaterials, 4,2 (1983) 142-142.
11. Ilizarov, G.A., The Principles of the Ilizarov Method, Bulletin of the Hospital for Joint Diseases Orthopaedic Institute, 48,1 (1988) 1-11.
12. Ilizarov, G.A., Clinical-Application of the Tension-Stress Effect for Limb Lengthening, Clinical Orthopaedics and Related Research,250 (1990) 8-26.
13. Lesniewska, A., Choromanski, W., Deszczynski, J. ve Dobrzynski, G., Modeling and simulation of physical performance of a External Unilateral Mechatronic

- Orthopaedic Fixator - Bone system, 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 30 Ağustos 2006 - 3 Eylül 2006, New York, NY, USA, 1533-1536.
14. <http://www.simeks.com.tr/wp-content/uploads/arcadis-orbic-overview-0002731810.jpg>, 11 Ocak 2018.
 15. <http://www.teknobeyin.com/step-motorlar-hakkinda-her-sey.html>, 12 Şubat 2018
 16. Bradski, G. ve Keahler A., Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library, 2008.
 17. Bradski, G. ve Keahler A., Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library, O'Reilly Media, USA, 2008.
 18. Hartley, J. ve Branthwaite, A., The applied psychologist, 2nd, Open University Press, Buckingham ; Philadelphia, PA, 2000.
 19. Luong, Q.T. ve Faugeras, O.D., The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis, International Journal of Computer Vision, 17,1 (1996) 43-75.
 20. Tsai, R.Y., A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3d Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf Tv Cameras and Lenses, Ieee Journal of Robotics and Automation, 3,4 (1987) 323-344.
 21. Birchfield, S. ve Tomasi, C., A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling, Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20,4 (1998) 401-406.
 22. MATLAB calibration tool. Available from: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, 11 Ocak 2018.
 23. Hartley, R.I., Theory and practice of projective rectification, International Journal of Computer Vision, 35,2 (1999) 115-127.
 24. Hirschmuller, H., Stereo processing by Semiglobal Matching and Mutual Information, Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30,2 (2008) 328-341.
 25. Slabaugh, G., Computing Euler angles from a rotation matrix, 1999.
 26. Zhang, Z.Y., A flexible new technique for camera calibration, Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22,11 (2000) 1330-1334.
 27. https://docs.opencv.org/3.1.0/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html, 12 Şubat 2018
 28. https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html, 12 Şubat 2018

29. Hillman, P., <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.386.3757&rep=rep1&type=pdf> White paper: Camera calibration and stereo vision. <http://citeseerx.ist.psu.edu>, 12 Şubat 2018.
30. Küçük, S. ve Bingül, Z., Robot Sistemlerinde Kinematik Yöntemlerin Karşılaştırılması, Politeknik Dergisi, 7,2 (2004).
31. Aspragathos, N.A. ve Dimitros, J.K., A comparative study of three methods for robot kinematics, Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, 28,2 (1998) 135-145.
32. Maxwell, E.A., General Homogeneous Coordinates in Space of Three Dimensions, Cambridge University Press, 1961.
33. Tonbul, T.S. ve Sarıtaş, M., Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar Ve Yörünge Planlaması, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18,1 (2003).
34. Kucuk, S. ve Bingul, Z., The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators, Mechatronics, 2004. ICM '04. Proceedings of the IEEE International Conference on, 3-5 Haziran 2004, Istanbul, Turkey, 274-279.
35. Husty, M.L., Pfurner, M. ve Schrocker, H.P., A new and efficient algorithm for the inverse kinematics of a general serial 6R manipulator, Mechanism and Machine Theory, 42,1 (2007) 66-81.
36. Manocha, D. ve Yunshan, Z., A fast algorithm and system for the inverse kinematics of general serial manipulators, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 8-13 Mayıs 1994, San Diego, CA, USA, 3348-3353 vol.3344.
37. Tourassis, V.D., Principles and Design of Model-Based Robot Controllers, International Journal of Control, 47,5 (1988) 1267-1275.
38. Paden, B.E., Kinematics and control of Robot manipulators, University of California, 1986.
39. Lee, C.S.G. ve Ziegler, M., Geometric Approach in Solving Inverse Kinematics of Puma Robots, Ieee Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 20,6 (1984) 695-706.
40. Paul, R.P., Shimano, B. ve Mayer, G.E., Kinematic Control Equations for Simple Manipulators, Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics, 11,6 (1981) 449-456.
41. Tejomurtula, S. ve Kak, S., Inverse kinematics in robotics using neural networks, Information Sciences, 116,2-4 (1999) 147-164.

42. Paul, R.P., Shimano, B. ve Mayer, G.E., Differential Kinematic Control Equations for Simple Manipulators, Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics, 11,6 (1981) 456-460.
43. Goldenberg, A., Benhabib, B. ve Fenton, R., A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots, IEEE Journal on Robotics and Automation, 1,1 (1985).
44. Parker, J.K., Khoogar, A.R. ve Goldberg, D.E., Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms, Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, 14-19 Mayıs 1989, Scottsdale, AZ, USA, 271-276 vol.271.
45. Chiaverini, S. ve Siciliano, B., Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2,2 (1994) 123 - 134.
46. Shi, Y. ve Eberhart, R., A modified particle swarm optimizer, 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360), 4-9 Mayıs 1998, Anchorage, AK, USA, 69-73.
47. Özsağlam, M.Y. ve Çunkaş, M.Ç., Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçaçık sürü optimizasyonu algoritması, Politeknik Dergisi, 11,4 (2008).
48. Karaboğa, D., Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, 2017, Nobel Yayınevi.
49. Maeda, Y., Tamura, Y., Saito, M., Yamamoto, T., Yonenobu, K., Warisawa, S., Mitsuishi, M. ve Sugano, N., Measurement of traction load and torque transferred to the lower extremity during simulated fracture reduction, CARS 2005: Computer Assisted Radiology and Surgery, 1281 (2005) 674-679.
50. Gosling, T., Westphal, R., Faulstich, J., Sommer, K., Wahl, F., Krettek, C. ve Hufner, T., Forces and torques during fracture reduction: Intraoperative measurements in the femur, Journal of Orthopaedic Research, 24,3 (2006) 333-338.
51. Skjeldal, S. ve Backe, S., Interlocking Medullary Nails - Radiation-Doses in Distal Targeting, Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 106,3 (1987) 179-181.
52. Kazanzides, P., Zuhars, J., Mittelstadt, B., Williamson, B., Cain, P., Smith, F., Rose, L. ve Musits, B., Architecture of a surgical robot, [Proceedings] 1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 18-21 Ekim 1992, Chicago, IL, USA, 1624-1629 vol.1622.
53. Kazanzides, P., Zuhars, J., Mittelstadt, B. ve Taylor, R.H., Force sensing and control for a surgical robot, Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 12-14 Mayıs 1992, Nice, France, 612-617 vol.611.

54. Jakopec, M., Rodriguez y Baena, F., Harris, S.J., Gomes, P., Cobb, J. ve Davies, B.L., The hands-on orthopaedic robot "Acrobot": Early clinical trials of total knee replacement surgery, Ieee Transactions on Robotics and Automation, 19,5 (2003) 902-911.
55. Mitsuishi, M., Sugita, N., Warisawa, S., Ishizuka, T., Nakazawa, T., Sugano, N., Yenenobu, K. ve Sakuma, I., Development of a computer-integrated femoral head fracture reduction system, IEEE International Conference on Mechatronics, 2005. ICM '05., 10-12 Temmuz 2005, Taipei, Taiwan, 834-839.
56. Graham, A.E., Xie, S.q., Aw, K.c., Xu, W.l. ve Mukherjee, S., Design of a Parallel Long Bone Fracture Reduction Robot with Planning Treatment Tool, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 9-15 Ekim 2006, Beijing, China, 1255-1260.
57. Buschbaum, J., Fremd, R., Pohlemann, T. ve Kristen, A., Introduction of a computer-based method for automated planning of reduction paths under consideration of simulated muscular forces, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 12,8 (2017) 1369-1381.
58. Ruihua, Y. ve Yonghua, C., Development of a six degree of freedom (DOF) hybrid robot for femur shaft fracture reduction, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 22-25 Şubat 2009, Bangkok, Thailand, 306-311.
59. Lin, H., Wang, J.Q. ve Han, W., Parallel Manipulator Robot assisted Femoral Fracture Reduction on Traction Table, 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 3-7 Temmuz 2013, Osaka, Japan, 4847-4850.
60. Westphal, R., Winkelbach, S., Hufner, T., Faulstich, J., Martin, P., Krettek, C. ve Wahl, F.M., A surgical telemanipulator for femur shaft fracture reduction, International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2,3 (2006) 238-250.
61. Gosling, T., Westphal, R., Hufner, T., Faulstich, J., Kfuri, M., Wahl, F. ve Krettek, C., Robot-assisted fracture reduction: A preliminary study in the femur shaft, Medical & Biological Engineering & Computing, 43,1 (2005) 115-120.
62. Dagnino, G., Georgilas, I., Morad, S., Gibbons, P., Tarassoli, P., Atkins, R. ve Dogramadzi, S., Image-Guided Surgical Robotic System for Percutaneous Reduction of Joint Fractures, Annals of Biomedical Engineering, 45,11 (2017) 2648-2662.
63. Dagnino, G., Georgilas, I., Kohler, P., Morad, S., Atkins, R. ve Dogramadzi, S., Navigation system for robot-assisted intra-articular lower-limb fracture surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 11,10 (2016) 1831-1843.

64. Douke, T., Nakajima, Y., Mori, Y., Onogi, S., Sugita, N., Mitsuishi, M., Bessho, M., Ohhashi, S., Tobita, K., Ohnishi, I., Sakuma, I., Dohi, T., Maeda, Y., Koyama, T., Sugano, N., Yonenobu, K., Matsumoto, Y. ve Nakamura, K., Control of fracture reduction robot using force/torque measurement, 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 20-25 Ağustos 2008, Vancouver, BC, Canada, 3265-3268.
65. Sun, X., Zhu, Q., Wang, X. ve Liang, B., A remote control robotic surgical system for femur shaft fracture reduction, 2015 Ieee International Conference on Robotics and Biomimetics (Robio), 6-9 Aralık 2015, Zhuhai, China, 1649-1653.
66. Cakiroglu, M.S., Sancaktar, I., Ulutas, M. ve Ertas, A.H., Design of an assistant robot for alignment of fractured bones in medical operations, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 17 (2014) 188-189.
67. Öztürk, M. ve Kayıkçıoğlu, T., Üç-Boyutlu Koroner Damar Parçalarının Üç Keyfi Açıdan Alınmış Anjiyo Görüntülerindeki Kenarlardan Elde Edilmesi, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 2008, 1-4.
68. Ozturk, M. ve Kayikcioglu, T., A model-based edge estimation method with increased edge localization accuracy for medical images, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 23,4 (2015) 1127-1141.
69. Champlébox, G., Lavalée, S., Sautot, P. ve Cinquin, P., Accurate calibration of cameras and range imaging sensor: the NPBS method, Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 12-14 Mayıs 1992, Nice, France, 1552-1557 vol.1552.
70. Tockus, L., Joskowicz, L., Simkin, A. ve Milgrom, C., Computer-aided image-guided bone fracture surgery: Modeling, visualization, and preoperative planning, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - Miccai'98, 1496 (1998) 29-38.
71. Lavalée, S., Sautot, P., Troccaz, J., ve Cinquin, P., Computer-Assisted Spine Surgery: A Technique for Accurate Transpedicular Screw Fixation Using CT Data and a 3-D Optical Localizer, Journal of Image Guided Surgery, 1,1 (1995) 65-73.
72. Brandt, G., Radermacher, K., Lavalée, S., Staudte, H.W. ve Rau, G., A compact robot for image guided orthopedic surgery: Concept and preliminary results, Cvrmed-Mrcas'97, 1205 (1997) 767-776.
73. Bohner, P., Holler, C., ve Haszlig, S., Operation planning in craniomaxillofacial surgery, Computer Aided Surgery, 2,3-4 (1997) 153-161.
74. Taylor, R.H., Mittelstadt, B.D. ve Paul, H.A., An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery, Ieee Transactions on Robotics and Automation, 10,3 (1994).

75. Brandt, G., Zimolong, A., Carrat, L. ve Merloz, P., CRIGOS: a compact robot for image-guided orthopedic surgery, Ieee Transactions on Information Technology in Biomedicine, 3,4 (1999) 252 - 260.
76. Klanke, S., Lebedev, D., Haschke, R., Steil, J. ve Ritter, H., Dynamic Path Planning for a 7-DOF Robot Arm, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 9-15 Ekim 2006, Beijing, China, 3879-3884.
77. Ting, Y., Lei, W.I. ve Jar, H.C., A path planning algorithm for industrial robots, Computers & Industrial Engineering, 42,2-4 (2002) 299-308.
78. Tarokh, M., Fast path planning for robot manipulators by formation-posture decomposition, Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 5-9 Ağustos 1995, 2, Pittsburgh, PA, USA, 138-143 vol.132.
79. Qin, C. ve Henrich, D., Path planning for industrial robot arms-A parallel randomized approach, Proc. of the Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS 96), 1996, Lissabon, Portugal, 65-72.
80. Khatib, O., Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, International Journal of Robotics Research, 5,1 (1986) 90-98.
81. Stentz, A., The focussed D^{*} algorithm for real-time replanning, Proc. Fourteenth Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Ağustos 1995, 1652-1659.
82. Koyuncu, E., Ure, N.K., Inalhan, G., A probabilistic algorithm for mode based motion planning of agile unmanned air vehicles in complex environments, The International Federation of Automatic Control, (2008).
83. Ayari, A. ve Bouamama, S., A new multiple robot path planning algorithm: dynamic distributed particle swarm optimization, Robotics and Biomimetics, (2017).
84. Ridao, M.A., Camacho, E.F., Riquelme, J. ve Toro, M., An evolutionary and local search algorithm for motion planning of two manipulators, Journal of Robotic Systems, 18,8 (2001) 463-476.
85. Li, T.Y. ve Latombe, J.C., On-line manipulation planning for two robot arms in a dynamic environment, International Journal of Robotics Research, 16,2 (1997) 144-167.
86. Cheng, X., On-line collision-free path planning for service and assembly tasks by a two-arm robot, Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 21-27 Mayıs 1995, 2, Nagoya, Japan, 1523-1528 vol.1522.
87. Lebedev, D.V., Steil, J.J. ve Ritter, H.J., An on-line neural network-based approach to dynamic path planning and coordination of two robot arms, 2005 IEEE/RSJ

- International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2-6 Augustos 2005, Edmonton, Alta., Canada, 2411-2416.
88. Sanchez, G. ve Latombe, J.C., Using a PRM planner to compare centralized and decoupled planning for multi-robot systems, Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292), 11-15 Mayis 2002, 2, Washington, DC, USA, 2112-2119 vol.2112.
 89. LaValle, S.M., Branicky, M.S. ve Lindemann, S.R., On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps, International Journal of Robotics Research, 23,7-8 (2004) 673-692.
 90. Ferguson, D., Likhachev, M. ve Stentz A., A guide to heuristic-based path planning, Proc. of the Workshop on Planning under Uncertainty for Autonomous Systems, Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling (ICAPS'05), (2005).
 91. Su, K., Wang, Y.J. ve Hu, X.N., Robot Path Planning Based on Random Coding Particle Swarm Optimization, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 6,4 (2015) 58-64.
 92. Niu, L. ve Zhuo, G., An improved real 3D A* algorithm for difficult path finding situation, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII, Part B4 (2008).
 93. Tian, L.F. ve Collins, C., Motion planning for redundant manipulators using a floating point genetic algorithm, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 38,3-4 (2003) 297-312.
 94. Bugmann, G., Taylor, J.G. ve Denham, M, M Denham, Route finding by neural nets, Neural Networks, J. G. Taylor, (1995) 217-230.
 95. Kassim, A.A., ve Kumar, B.V.K.V., Path planning for autonomous robots using neural networks, Journal of Intelligent Systems, 7 (1997) 33-56.
 96. Likhachev, M., Gordon, G. ve Thrun, S., ARA*: Anytime A* with provable bounds on sub-optimality, Advances in Neural Information Processing Systems 16, 16 (2004) 767-774.
 97. Jalel, S., Marthon, P. ve Hamouda, A., A New Path Generation Algorithm Based on Accurate NURBS Curves, International Journal of Advanced Robotic Systems, 13 (2016).
 98. Lebedev, D.V., Steil, J.J. ve Ritter, H.J., The dynamic wave expansion neural network model for robot motion planning in time-varying environments, Neural Networks, 18,3 (2005) 267-285.
 99. Buschbaum, J., Fremd, R., Pohlemann, T. ve Kristen, A., Computer-assisted fracture reduction: a new approach for repositioning femoral fractures and planning

- reduction paths, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 10,2 (2015) 149-159.
100. Ye, R. ve Chen, Y., Path planning for robot assisted femur shaft fracture reduction : A preliminary investigation, 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, 11-13 Mayıs 2009, Hong Kong, China, 113-117.
 101. Kennedy, J. ve Eberhart, R., Particle swarm optimization, Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on, Kasım/Aralık 1995, 4, Perth, WA, 1942-1948 vol.1944.
 102. Eberhart, R. ve Kennedy, J., A new optimizer using particle swarm theory, Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on, 4-6 Ekim 1995, Nagoya, Japan, 39-43.
 103. Eberhart, R.C. ve Shi, Y.H., Particle swarm optimization: Developments, applications and resources, Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, Vols 1 and 2, 27-30 Mayıs 2001, Seoul, South Korea, 81-86.
 104. Eberhart, R.C. ve Shi, Y.H., Special issue on particle swarm optimization, Ieee Transactions on Evolutionary Computation, 8,3 (2004) 201-203.
 105. Eberhart R.C., Shi Y., Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: Porto V.W., Saravanan N., Waagen D., Eiben A.E. (eds) Evolutionary Programming VII. EP 1998. Lecture Notes in Computer Science, vol 1447. Springer, Berlin, Heidelberg, 611-616.
 106. Karpat, Y. ve Ozel, T., Multi-objective optimization or turning processes using neural network modeling and dynamic-neighborhood particle swarm optimization, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35,3-4 (2007) 234-247.
 107. Zhan, Z.H., Zhang, J., Li, Y. ve Chung, H.S.H., Adaptive Particle Swarm Optimization, Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, 39,6 (2009) 1362-1381.
 108. Xie, X.F., Zhang, W.J. ve Yang, Z.L., A dissipative particle swarm optimization, Cec'02: Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, Vols 1 and 2, 12-17 Mayıs 2002, Honolulu, HI, USA, 1456-1461.
 109. van den Bergh, F. ve Engelbrecht, A.P., A cooperative approach to particle swarm optimization, Ieee Transactions on Evolutionary Computation, 8,3 (2004) 225-239.
 110. Tillett, J., Rao, T., Sahin, F. ve Rao, R., Darwinian particle swarm optimization, Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Artificial Intelligence, 2005, 1474-1487.

111. Lovbjerg, M. ve Krink, T., Extending Particle Swarm Optimisers with Self-Organized Criticality, *Cec'02: Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, Vols 1 and 2, 12-17 Mayıs 2002, Honolulu, HI, USA, 1588-1593.
112. Løvbjerg, M., Rasmussen, T.K. ve Krink, T., Hybrid Particle Swarm Optimiser with breeding and subpopulations, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2001, San Francisco, California 469-476.
113. Liang, J.J. ve Suganthan, P.N., Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer, *Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2005. SIS 2005., 8-10 Haziran 2005, Pasadena, CA, USA, 124-129.
114. Chen, W.N., Zhang, J., Lin, Y., Chen, N., Zhan, Z.H., Chung, H.S.H., Li, Y. ve Shi, Y.H., Particle Swarm Optimization with an Aging Leader and Challengers, *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 17,2 (2013) 241-258.
115. Garcia-Nieto, J. ve Alba, E., Restart particle swarm optimization with velocity modulation: a scalability test, *Soft Computing*, 15,11 (2011) 2221-2232.

7. EKLER

Ek 1. Hayvan Deneyi Raporu

T.C
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ HAYVAN
DENEYLERİ YEREL ETİK KURULU



FORM09

TARİH: 12/2/2018

Proje Sonuç Raporu

PROJE KABUL NO: 2017/28

PROJE ÖZETİ

PROJE BAŞLIĞI: Robot yardımı kırık redüksiyonu-Koyun femurlarında deneysel çalışma

Proje YÜRÜTÜCÜSÜ: Doç.Dr. Ferhat SAY

TC NO: 15818509546

SONUÇ ÖZETİ

Bu çalışmada koyun denek olarak kullanılmıştır. Tek hayvan üzerinde mükemmer biyomekanik testler yapılmıştır. Koyuna genel anestezi uygulanmıştır. Premedikasyon için kas içi 0.1 mg/kg ksilazın uygulanmıştır. İndüksiyon maske yardımıyla oksijen içinde İzofluran verilerek sağlanmıştır ve koyun entübe edilmiştir. Anestezi oksijen içerisinde İzofluran ile idame edilmiştir. Analjezi için preoperatif flunixin meglumün damar içi yolla 1.1mg/kg doza uygulanmıştır. Epidural analjezi için ise 2 ml, lidokain uygulaması yapılmıştır. Sağ femur kemiğine osteoklasti yapılmıştır. İki çivi kırığın proksimaline, iki çivi de distaline şanz çivisi yerleştirilmiştir. Elle ve robot yardımıyla iki farklı yöntem uygulanarak, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Farklı pozisyonlardan başlayarak aynı hekim tarafından toplam yedişer adet redüksiyon işlemi hem elle hem de robot yardımıyla yapılmıştır. Redüksiyon işlemleri skopi cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Redüksiyonun tamamlandıktan sonra, kemikler sabit halde iken diğer hekim tarafından dokular açılarak ölçüm yapılmıştır. Kemik uçlarının arasındaki mesafe ve birbirlerine göre hizalanması her işlem sonunda ölçülmüştür. Ayrıca bacadaki nabız varlığı kontrol edilmiştir.

Robot ile yapılan yöntemde çiviler robotun kollarna bağlanmış ve farklı pozisyonlardan başlayarak yedi defa kırık kemiğin redüksiyonu, robot yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm redüksiyon işlemleri yan odadan uzaktan kumanda ile skopi ekranına bakılarak yapılmıştır.

Elle yapılan yöntemin sonuçları Tablo 1.'de ve robot yardımı ile yapılan redüksiyonun sonuçları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Elle redüksiyon sonuçları

Elle deney no	Ekzen kayması (mm)	Hekimin maruz kaldığı radyasyon süresi (sn)	Anatomik redüksiyon	Nabız
E1	2	4	Yok	Var
E2	3	10	Yok	Var
E3	0	8	Var	Var
E4	4	16	Yok	Var
E5	2	7	Yok	Var
E6	0	5	Var	Var
E7	1	9	Yok	Var

Tablo 2. Robot ile redüksiyon sonuçları

Robot deney no	Ekzen kayması (mm)	Hekimin maruz kaldığı radyasyon süresi (sn)	Anatomik redüksiyon	Nabız
R1	2	0	Yok	Var
R2	0	0	Var	Var
R3	0	0	Var	Var
R4	0	0	Var	Var
R5	0	0	Var	Var
R6	1	0	Yok	Var
R7	0	0	Var	Var

Tüm redüksiyon denemelerinin sonunda nabızın varlığı görülmüştür. Elle redüksiyon yönteminde, hem hasta hem de hekim radyasyona maruz kalmaktadır.

Robot ile yapılan redüksiyon işlemlerinin hiçbir aşamasında hekim radyasyona maruz kalmamaktadır. Çünkü redüksiyon bir başka odada, uzaktan kumanda ile gerçekleştirilmektedir. Sadece hasta radyasyon almaktadır.

Yapılan her iki yöntemde, kemikler ve yumuşak dokularda herhangi bir zarar tespit edilememiştir.

Ek 1.'in devamı

PROJEYE GENEL BAKIŞ

GÖREV/ETAP/AŞAMA	TAMAMLANAN %	BAŞLAMA TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ	NOTLAR
		9/11/2017	9/11/2017	Deneyisel işlem gerçekleştirildi

BÜTÇE ÖZETİ

KATEGORİ	HARCANAN	TOPLAMDAKİ %	BÜTÇE SEYRİ NORMAL Mİ?	NOTLAR

RİSK VE SORUN SEÇİMİ

Herhangi bir sorun yaşanmamıştır.


SONUÇLAR/ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma ile robot ile yapılan kırık redüksiyonunu elle yapılan redüksiyondan daha iyi saptanmıştır. Robot ile yapılan redüksiyon esnasında cerrah işlemi bir başka odadan kumanda ettiği için radyasyon almamaktadır. Robot kemik veya yumuşak dokularda daha fazla hasara yol açmamaktadır. Ekstremitenin dolaşımında etkilenme saptanmamıştır. Sonuç olarak robot ile yapılan kırık redüksiyonu güvenli, hızlı ve cerrahin radyasyondan korunması için iyi bir yöntemdir.

Ek 2. İncelemeli Patent



Ek 3: Marka Tescil Belgesi




80172

T.C.
TÜRK PATENT ENSTİTÜSÜ

MARKA TESCİL BELGESİ

Marka No : 2012 23512 - Ticaret



ROBORTO®

Marka Sahibi : TAMİŞ OTOGAZ SANAYİ TİCARET VE
MÜHENDİSLİK HİZMETLERİ İTHALAT
İHRACAT LİMİTED ŞİRKETİ
TÜRKİYE CUMHURİYETİ
Sanayi Sitesi Kılıçaslan Cd. 44 55080 SAMSUN

Emlak : 07
İlişiktir.

Markaların Korunması Hakkında 556 Sayılı Kanun Hükmünde
Kararnameye göre 13/03/2012 tarihinden itibaren ON YIL müddetle
04/02/2013 tarihinde tescil edilmiştir.

EM B. AKIN
Enstitü Başkanı
Markalar Dairesi Başkanı

TÜRK PATENT [●] ENSTİTÜSÜ

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Trabzon ili Köprübaşı ilçesinde doğdu. İlköğrenimimi Trabzon Kanuni Süleyman İlkokulu'nda, ortaöğretimi ise 1988 yılında Sürmene Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden Elektronik Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 1994 yılında Ordu Üniversitesi Meslek Yüksekokulu'na öğretim görevlisi olarak atandı. 2005 yılında On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladıktan sonra, 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimime başladım. Halen Ordu Üniversitesi Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve 3 çocuk babasıdır.

Yürüttüğü görevler:

1994 - Ordu Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi

1994 – 1995 Delaware Tech.& Community College, Visitor Instructor, Dover, DE, USA

1996 – 1998 Meslek Yüksekokulu Müdür Yardımcısı

2001 – 2004 Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölüm Başkanlığı

2004 – 2007 Meslek Yüksekokulu Müdür Yardımcısı

2007 – 2011 Ordu Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı

2011 - 2012 Ordu Üniversitesi İdari Mali İşler Daire Başkanlığı

Katıldığı kurs ve seminerler:

- Stratejik Planlama Semineri Anakara Üniversitesi Çankırı MYO – Çankırı (1996)
- II. Ulaknet Eğitim ve Çalıştayı 2008 – Selçuk Üniversitesi – Konya
- III. Ulaknet Eğitim. Ve Çalıştayı 2009 – Adnan Menderes Üniversitesi – Aydın
- Kafkas Ülkeleri, Türk Cumhuriyetleri ve Türkiye Araştırma İşbirliğini Geliştirme Toplantısı – BSI'2009, Elazığ
- IV. Ulaknet Eğitim ve Çalıştayı 2010 – Süleyman Demirel Üniversitesi – Isparta
- Ağ Güvenliği Eğitimi 2010 – Karadeniz Teknik Üniversitesi – Trabzon
- Kafkas Ülkeleri, Türk Cumhuriyetleri ve Türkiye Araştırma İşbirliğini Geliştirme Toplantısı – BSI'2011, Gence Azerbaycan

Yayınlar:**SCI-Expanded Dergi:**

Cakiroglu, M. S., **Sancaktar, I.**, Ulutas, M., & Ertas, A. H. (2014). Design of an assistant robot for alignment of fractured bones in medical operations. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, 17(sup1), 188-189.

Gerçekleştirilmiş Projeler:

BSTB P. Kodu	Proje Adı	Süresi (Ay)	Başlangıç Tarihi	Bitiş Tarihi
029870	OTOMATİK REDÜKSİYON ROBOTU	37	28.10.2014	31.10.2017
032248	Araç ve Sürücü Kayıt Kontrol Sistemi	3	5.5.2015	31.8.2015
035727	Otomobil Ekspertiz Yazılımı	2	1.4.2016	31.5.2016
043506	ŞasiMetre	2	23.5.2017	31.7.2017

Devam Eden Projeler:

BSTB P. Kodu	Proje Adı	Süresi (Ay)	Başlangıç Tarihi	Bitiş Tarihi
046744	Konum Bulucu	12	15.12.2017	-