

**BİR ENDÜSTRİYEL ROBOTUN İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN
ATALETSEL ÖLÇÜMÜ İLE UZAKTAN KONTROLÜ**

YUSUF GÜLTEKİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2012
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Anabilim Dalı Başkanı

Yusuf GÜLTEKİN tarafından hazırlanan “Bir Endüstriyel Robotun İnsan Kolu Hareketlerinin Ataletsel Ölçümü ile Uzaktan Kontrolü” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : _____

Üye : _____

Üye : _____

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yusuf GÜLTEKİN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2012

Yusuf GÜLTEKİN

BİR ENDÜSTRİYEL ROBOTUN İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN ATALETSEL ÖLÇÜMÜ İLE UZAKTAN KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada; insan kolu hareketlerini Stäubli Rx160 model bir endüstriyel robot kola eşzamanlı olarak taklit ettirmek amacıyla, kompakt, taşınabilir ve düşük maliyetli bir ölçüm sistemi geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. İnsan kolu hareketleri, omuza yerleştirildiği varsayılan referans çerçeveye göre algılanmış, omuz ekleminin birbirine dik üç eksen etrafındaki dönüşleri dirsek arkasına, dirsek ekleminin dönüşleri de bilek üzerine sabitlenen ataletsel ölçüm birimleri ile ölçülmüştür. Ataletsel ölçüm birimi tasarımı ayrıca ele alınmış, dijital ivmeölçer ve jiroskoplar içeren mikrodenetleyici tabanlı birimler geliştirilmiştir. İnsan bileğinin konumu ve yöneliminin ataletsel ölçüm birimi verilerinden hesaplanması için iki ayrı yöntem incelenmiş, kuaterniyon cebiri tabanlı yöntemin Euler açıları ve Kalman filtresi kullanılan yöntemle göre daha sade ve hızlı olduğu sonucuna varılmıştır. İnsan kolu ve robot kol çalışma uzayları robot çalışma uzayından azami faydalanacak şekilde eşlenmiş, insan bileğinin durumuna göre robot kol uç işlevcinin bulunması gereken konum ve yönelim hesaplanmıştır. Endüstriyel robot kolun düz ve ters kinematik denklemleri analitik olarak çözümlenerek uç işlevcinin istenilen durumu için gerekli eklem açıları bulunmuş ve robot konumlanmıştır. Örneklem periyodu 0,04 sn, hassasiyeti $\pm 1^\circ$ ve zaman gecikmesi 0,5 sn olan uzaktan kontrol sisteminin performansı bilgisayar benzetimleri ve testler ile incelenmiş, çalışmanın devamına ilişkin öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan Kontrol, Stäubli Rx160, Ataletsel Ölçüm Birimleri, Kuaterniyon, Düz Kinematik, Ters Kinematik

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2012

Yusuf GÜLTEKİN

**TELEOPERATION OF AN INDUSTRIAL ROBOT BY INERTIAL
MEASUREMENTS OF HUMAN ARM MOTION**

ABSTRACT

In this study; a compact, portable and low-cost measurement system has been developed in order to make a Stäubli Rx160 model of industrial robot arm simulate simultaneously the movements of human arm. Movements of human arm are perceived according to a reference frame assumed to be placed on shoulder, rotations of the shoulder joint around three axes perpendicular to each other are measured by inertial measurement units fixed to back of elbow, rotations of the elbow joint are also measured by the same units fixed to wrist. Design of the inertial measurement units has been examined separately and microcontroller-based units with digital accelerometer and gyroscopes have been developed. Two different methods have been analyzed in order to calculate position and orientation of the human ankle using inertial measurement unit data and it is concluded that quaternion algebra-based method is simpler and faster than the Euler angles and the Kalman filter method. Workspaces of human arm and robot arm matched to take advantage of robot workspace at maximum level. Position and orientation where robot arm end functional unit has to stand according to the human wrist have been calculated. Solving analytically forward and inverse kinematics equations of industrial robot arm, joint angles which are required for the targeted position of the end functional unit have been found and the robot has been positioned. Performance of the remote control system whose sampling period is 0,04 second, sensitivity is $\pm 1^\circ$, time delay is 0,5 second has been analyzed with computer simulations and tests; recommendations regarding the continuation of the study are presented.

Key Words: Teleoperation, Stäubli Rx160, Inertial Measurement Unit, Quaternion, Forward Kinematik, Inverse Kinematik

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasının her aŐamasında değerli yardımlarını, zamanını ve hoŐgörösünü benden esirgemeyen, baŐta kıymetli hocam ve danıŐmanım Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOğLU'na olmak üzere, laboratuvarının imkânlarını seferber edip konu mankenliğini üŐenmeden yapan değerli meslektaŐım ve dostum Deniz KARACA'ya, birikimlerinden her an faydalandığım Koray KERİMOğLU'na, gerek lisans gerek yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgilerinden faydalandığım tüm öğretim üyelerine, sağladığı AR-GE bursu ile hem akademik birikimimin hem de iŐ hayatımın eŐ zamanlı devamını sağlayan TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsüne teŐekkürü borç bilirim.

Yusuf GÜLTEKİN

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN ALGILANMASI İÇİN ALTERNATİF SİSTEMLER.....	3
2.1 Görüntü Algılayan Sistemler.....	3
2.2 Dış İskeletli Sistemler	4
2.3 Ataletsel Ölçüm Sistemleri.....	5
3. ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ TASARIMI	7
3.1 Jiroskop	7
3.2 İvmeölçer.....	11
3.3 Manyetikölçer.....	17
3.4 Tasarımlanan Ataletsel Ölçüm Birimi.....	18
4. İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN ATALETSEL ÖLÇÜMÜ.....	20
4.1 Euler Açılımları ve Direkt Kosinüs Matrisi (DKM).....	21
4.1.1 Kalman Filtresi.....	23
4.2 Kuaterniyon Cebiri	30
4.3 Ataletsel Ölçüm Birimlerinde Kullanılan Hareket Ölçümü Algoritması	34
4.4 İnsan Kolu Hareketinin Ölçülmesi	39
5. STÄUBLİ RX160 ROBOT KOL	45
5.1 Stäubli Rx160 Robot Kolun Düz Kinematik Çözümü	48

5.2	Stäubli Rx160 Robot Kolun Ters Kinematik Çözümü.....	55
6.	İNSAN KOLU İLE ROBOT KOLUN EŞLENMESİ.....	64
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	70
	KAYNAKLAR	73
	EKLER.....	77
	ÖZGEÇMİŞ	78

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Jiroskop kaçıklık değerini ayıklayan algoritmanın sahte kodu.....	10
Çizelge 4.1. İnsan kolu hareketlerini taklit eden programın sahte kodu.....	41
Çizelge 5.1. Stäubli Rx160 robot kol eklemlerinin hareket limitleri.....	46
Çizelge 5.2. Stäubli Rx160 robot kol için Denavit-Hartenberg parametreleri.....	49
Çizelge 5.3. Şekil 5.5 ile verilen pozlar için eklem açıları.....	63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sabit konumlu dış iskelet.....	4
Şekil 2.2. Omuza sabitlenen dış iskelet.....	4
Şekil 3.1. Kaçıklık düzeltme algoritması uygulanmış ve uygulanmamış jiroskop integralleri ve gerçek açı grafiği	10
Şekil 3.2. İvmeölçer ile açı ölçümü.....	12
Şekil 3.3. Normalleştirme yordamı öncesi ve sonrasında ivmeölçer verileri	14
Şekil 3.4. Filtreleme öncesi ve sonrasında hareketli ivmeölçer verileri	16
Şekil 3.5. Z-ekseni etrafında $-\pi/2$ radyan dönen eksen takımı.....	17
Şekil 3.6. Atmega328P'li okuyucu kart	18
Şekil 3.7. Ataletsel ölçüm birimi algılayıcı kart.....	19
Şekil 3.8. Ölçüm kartı ve okuyucu kart birleştirilmiş ataletsel ölçüm birimi	19
Şekil 4.1. İnsan kolu hareket ölçüm sistemi ve tanımlanan çerçeveler.....	20
Şekil 4.2. Koordinat eksen dönüşleri	22
Şekil 4.3. Kalman filtresi test düzeneği	27
Şekil 4.4. İvmeölçer, jiroskop integrali ve Kalman filtresi çıkışları	28
Şekil 4.5. Gerçek açı ve Kalman filtresi çıkışı açıları.....	28
Şekil 4.6. Üç boyutlu bir noktanın düzlemlerle beraber hareketi	33
Şekil 4.7. Sarkaçlı AÖB test düzeneği	37
Şekil 4.8. Serbest salınan sarkacın açı ölçümleri	38
Şekil 4.9. Kontrollü sarkacın açı ölçümleri.....	39
Şekil 4.10. İnsan kolu hareket ölçüm sistemi veri akış şeması	40
Şekil 4.11. İnsan kolu hareketlerini taklit eden programın arayüzü	41
Şekil 4.12. Hareket eden insan kolunun bilgisayar programı ile takliti.....	43
Şekil 5.1. Staubli Rx160 robot kolun eklemleri.....	45
Şekil 5.2. CS8C kontrolcüsü ve elle kontrol paneli	46
Şekil 5.3. Staubli Rx160 robot kolu için geliştirilen program arayüzü.....	47
Şekil 5.4. Staubli Rx160 Robot kolun bağ çerçeveleri.....	50
Şekil 5.5. Aynı hedefe farklı açılarla ulaşmış Staubli Rx160 robot kolu gösterimleri	62
Şekil 6.1. İnsan kolu çerçeveleri ve Staubli Rx160 referans çerçevesi gösterimi	64
Şekil 6.2. İnsan kolu hareketlerini gösteren ve robot kola ileten programın arayüzü.....	66
Şekil 6.3. Robot kol ve insan kolunun eşlenmiş konum ve yönelimleri.....	69

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

AÖB	Ataletsel ölçüm birimi
MEMS	Mikro elektro-mekanik sistemler
SÇBA	Seri çevre birimleri arayüzü
SDY	Sonsuz dürtü yanıtı
DKM	Direkt kosinüs matrisi
VSA	Vücuda sabitlenen algılayıcı
DH	Denavit Hartenberg
ADA	Alçak düzey arayüz

1. GİRİŞ

Robot teknolojisi sürekli gelişim gösteren ve üzerinde dünyanın her yerinde araştırma yapılan oldukça geniş bir çalışma alanına sahiptir. Algılayıcı ve eyleyici birimlerindeki gelişmeler, robotları insan hareketlerini oldukça başarılı bir şekilde taklit edebilir hale getirmiştir. İnsanın çalışmasına elverişli olmayan sıcaklık ve basınçlarda basmakalıp halinde yapılan montaj işlemlerinde, yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulan işlemlerde insan yerine; bu işlemleri yapabilecek robotların kullanımı tercih edilmektedir. Geliştirilen robot sistemlerinde esas amaç robot kollarının kendi iradeleri ile yapılacak işlere karar vermesi olmasına rağmen; günümüz için, bir robot farklı ortamlarda kendi kararlarını alabilecek kapasiteden oldukça uzaktır. Bu alandaki yapay us çalışmaları devam etmekle birlikte robot araştırmalarının ağırlığını robotların bir insan operatöre bağlı olarak uzaktan kontrolü oluşturmaktadır [1].

Robotlar, otonom olarak veya programlandıkları şekilde; kendileri için tanımlanan görevleri yerine getiren elektro-mekanik cihazlardır [2]. Gerek kullanım alanına göre, gerekse boyut ve işlev olarak bakıldığında robotlar oldukça geniş bir yelpazede çeşitlilik arz etmektedir. Sanayide en yaygın rastlanan robot türü şüphesiz robot koludur. Robot kolu, sabit bir gövdeden başlayarak uç uca eklenmiş bağlardan ve bir uç işlevciden (maşa) oluşur. Uç işlevci, uygulamaya göre bir tutucu, kaynak elektrodu, boya tabancası vs. olabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan robot kol, altı serbestlik derecesine¹ ve 30 kg'a kadar yük taşıma kapasitesine sahip, altı adet dönel eklem bulunduran Stäubli Rx160'tır.

Robotlar dışarıdan veri okumaya ve okudukları verilere göre hareket edebilme kabiliyetlerine sahiptir. Bu uygulamada, robot kolun maşa pozisyonunun bilgisayar üzerinden gönderilecek konum bilgisine göre ayarlanması amaçlanmıştır. Bilgisayarın göndereceği açı bilgisi ise insan kolu pozisyonu ölçülerek

¹ ing: degrees of freedom

hesaplanmaktadır. Merkez-uydu² olarak adlandırılan bu yöntemde; robot kolun maşa konumu (uydu), insan kolunun bilek konumuna (merkez) göre gerçek zamanda ayarlanmaktadır. Literatürde bu tarz uygulamalara uzaktan kontrol³ uygulamaları adı verilmektedir.

Uzaktan kontrol uygulamaları, merkez konumunun ölçümü ve robot kolun konumlandırılması olarak iki ana alt sistem olarak incelenebilir. Bu çalışmada robot kolun konum kontrolcüsüne müdahale şansı bulunmamaktadır. Stäubli Rx160 kendi içerisinde gömülü bir sistem olarak çalışmakta ve sadece gideceği konum verileri sisteme girdi olarak verilebilmektedir. Robot kolu konumlayan kontrol algoritmaları kullanıcı müdahalesine kapalıdır. Bu sebeple robot kol üzerinde uygulanabilecek kontrol yöntemleri bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Robot kolun kontrol algoritmalarının dışarıdan müdahaleye izin vermemesi sebebiyle, çalışmada ağırlıklı olarak insan kolu hareketi ölçüm sistemlerine, iletişim yöntemlerine, insan kolunun ve robot kolun çalışma uzaylarının eşlenmesine odaklanılmıştır.

İnsan kolu hareketlerinin algılanması için alternatif ölçüm sistemleri Bölüm 2’de özetlenmiştir. Ataletsel ölçüm birimi tasarımı Bölüm 3’te, insan kolu hareketlerinin ataletsel ölçümünde kullanılan yöntemler Bölüm 4’te açıklanmıştır. Bölüm 5, uydu sistem olan Stäubli Rx160 robot kola ayrılmış; robot özellikleri, düz ve ters kinematik çözümleri detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 6’da insan kolu ve robot kolun eşlenmesi ve yapılan deneyler açıklanmış, Bölüm 7’de sonuçlar tartışılmış ve bu çalışmanın devamına yönelik öneriler sunulmuştur.

² ing: master-slave

³ ing: teleoperation

2. İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN ALGILANMASI İÇİN ALTERNATİF SİSTEMLER

İnsan kolu hareketlerinin algılanması için literatürde üç ana yöntem bulunmaktadır. Bunlar; görüntü algılama yöntemi, dış iskelet yöntemi ve ataletsel ölçüm yöntemidir. Bu yöntemleri kullanan ölçüm sistemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

2.1 Görüntü Algılayan Sistemler

İnsan bedeni ve uzuvlarının hareket ölçümü sadece uzaktan kontrol uygulamalarında değil; tıbbi uygulamalarda ve film endüstrisinde de sıklıkla yapılmaktadır. Görüntü algılama sistemlerinde beden ve uzuv konumları iki boyutlu kamera görüntülerinin işlenmesi sonucunda elde edilir, üç boyutlu uygulamalar için çoklu kamera sistemleri gereklidir [3].

Yönelim ölçümü yapılacak nesne, insan kolunda olduğu gibi, birden fazla dönme eksenine sahip ise dönme eksenlerine farklı renklerde işaretçiler yerleştirilir. İşaretçilerin takibi görüntü analizinin yapılabilmesini daha kolay hale getirir [4]. Bu yöntemle işaretçili hareket yakalama yöntemi adı verilir. Diğer bir yöntem ise işaretçisiz hareket yakalama yöntemidir. Böyle çalışan sistemlerde algılanan görüntü siyah beyaza çevrildikten sonra, boyutları bilinen insan gövdesinden uzunlukları ve geometrisi bilinen el ve kol parçaları ayırt edilir [5].

Görüntü algılama ile kurulacak bir pozisyon ölçüm sistemi oldukça başarılı sonuçlar vermesine karşın bir takım kısıtları vardır. Çoğunlukla ihtiyaç duyulan üç boyutlu analiz için gerekli olan birden fazla kamera ve bu kameralardan alınan görüntülerin eşlenmesi oldukça yüksek maliyetli donanım gerektirmektedir. Kurulan sistemin taşınamaması sistemin kullanılabilirliğini kısıtlamakta ve sistem sadece kurulduğu yerde çalışmaktadır. Görüntü algılama ile çalışan bir sistemin değişken ışık karşısında sürekli kalibre edilmesi ya da sürekli aynı ışık ortamının olduğu bir stüdyo ortamının hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada değişik koşullarda

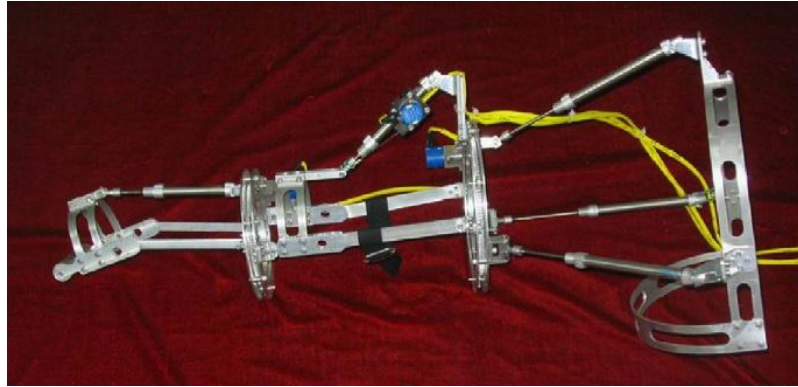
ölçümlemeye gerek duymayan, taşınabilir bir sistem tasarımı amaçlandığından, görüntü algılama ile pozisyon ölçüm sistemi tercih edilmemiştir.

2.2 Dış İskeletli Sistemler

Literatürde kol dış iskeleti adı verilen sistemler, insan koluna giyilmek suretiyle sabitlenerek eklem açılarını ölçen mekanik yapılardır. Dış iskeletlerin Şekil 2.1'deki gibi yere veya duvara monteli veya Şekil 2.2'deki gibi insan omuzuna monteli uygulamaları bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Sabit konumlu dış iskelet [6]



Şekil 2.2. Omuza sabitlenen dış iskelet [7]

Dış iskeletlerin başlıca avantajı, robot kolun çevresindeki objelerle etkileşimini kuvvet geri beslemesi yoluyla operatöre iletebilmesidir [8]. Kuvvet geri beslemeli sistemlerde, robot kolda kuvvet algılayıcılarına, dış iskelette ise eyleyicilere gerek duyulmaktadır.

Mutlak ve doğru ölçüm yapabilen dış iskelet sistemleri hassas, karmaşık ve yüksek maliyetli tasarımlar içermektedir. Ayrıca, bu sistemlerin operatöre göre tasarlanması ve uyarlanması gerekir. Düşük maliyetli, küçük boyutlu ve taşınabilir bir ölçüm sisteminin amaçlandığı bu çalışmada kuvvet geri beslemesi de incelenmediğinden dış iskelet alternatifi tercih edilmemiştir.

2.3 Ataletsel Ölçüm Sistemleri

Ataletsel ölçüm birimleri⁴ (AÖB) jiroskop ve ivmeölçerler yardımıyla nesnelere yönelimlerini ölçen algılayıcı takımlarıdır [9]. Ölçümlerin mutlak bir referans kazanması amacıyla AÖB'lere manyetikölçerlerin eklendiği uygulamalar da vardır [10]. AÖB'lerin insan uzuvlarının konum ve yönelim analizinde kullanımı oldukça yaygındır. Literatür taramasında, AÖB'lerde bulunabilen üç farklı algılayıcının değişik kombinezonlarla kullanıldığı çeşitli çalışmalara rastlanmıştır. Yönelim ölçümünde sadece ivmeölçer kullanılan bir çalışma [11]'de, sadece jiroskop kullanılan [12]'de, jiroskop-manyetikölçer çifti [13]'de, ivmeölçer-manyetikölçer çifti de [14]'de detaylandırılmıştır. En yaygın kullanım ise ivmeölçer, jiroskop ve manyetikölçerlerin beraber kullanıldıkları uygulamalardır [15], [16], [17].

Algılayıcı verilerinden yönelimin belirlenmesi için başlıca iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar Euler açıları yöntemi ve kuaterniyon cebridir. [18]'de, ayak bileğine ve dize takılan iki adet AÖB'den gelen veriler ile yürüme analizi yapılmıştır. Euler açıları ile çalışan sistemde altı-durumlu Kalman filtresinden yararlanılmıştır. [19]'da anlatılan çalışmada, insan ayak bileğine ve diz üzerine takılan iki adet AÖB, kuaterniyon cebiri ile kullanılarak yürüme ve koşma esnasında insan dizinin açısı tespit

⁴ ing: Inertial Measurement Units

edilmiştir. Her AÖB'nin kendi eksen takımı olması sebebiyle, birden fazla AÖB kullanıldığında birimlerin birbirlerine göre başlangıç konumlarının bilinmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

İnsan kolu hareketlerinin ölçümü için AÖB tabanlı bir sistemin; maliyet, boyut, taşınabilirlik ve uyarlanabilirlik açılarından bu çalışmanın amaçlarına uygun olduğu kararlaştırılmıştır. Tasarımlanan sistemde kullanılan algılayıcıların özellikleri ve algoritmalar bir sonraki bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

3. ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ TASARIMI

Ataletsel ölçüm birimleri piyasadan donanımı ve yazılımı hazır olarak elde edilebilmektedir [20]. Görece yüksek maliyetli olan bu alternatifin yanı sıra çeşitli kurumlarda özgün tasarımlara da rastlanmaktadır [21]. Bu çalışmada, Atmel Atmega328P mikrodenetleyici tabanlı, üç-eksen jiroskop ve ivmeölçer içeren modüler ve geliştirmeye açık AÖB'ler tasarlanmış ve üretilmiştir. Mikrodenetleyicideki gömülü yazılımlar ile mikrodenetleyicinin gönderdiği verileri yorumlayan bilgisayar yazılımları da gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün devamında kullanılan donanım ve tasarım faaliyetleri detaylandırılmıştır.

3.1 Jiroskop

Jiroskoplar dönen cisimlerin yönelimlerini, açısal momentum korunumu ilkesinden faydalanarak, ölçen cihazlardır. Mekanik olarak tasarlanan ilk jiroskop Alman bilim adamı Johann Bohnenberger tarafından 1817 yılında icat edilmiştir [22]. Günümüzde bu tip mekanik jiroskoplara alternatif olarak MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistemler) jiroskop adı verilen daha küçük algılayıcılar da bulunmaktadır. Ölçüm için sabit bir referansa ihtiyaç duymayışı, küçük boyutu ve düşük enerji sarfiyatı MEMS jiroskop tercihinin başlıca sebepleridir [23]. Ancak MEMS jiroskoplar mekanik benzerlerinin aksine dönme açılarını değil, dönme hareketinin açısal hızını ölçmektedir. Bu çalışmada tercih edilen MEMS jiroskoplar $\pm 5\pi/6$ rad/sn azami ölçüm kapasitesine sahip Sparkfun MLX90609 üniteleridir.

MLX90609 açısal hız verisini analog veya 12 bit sayısal olarak sağlayabilmektedir. Sayısal veri iletimi için Seri Çevre Birimleri Arayüzü⁵ (SÇBA) iletişim protokolü kullanılarak iletişim sağlanabilmektedir. Standart bir mikrodenetleyici analog-sayısal dönüşümünü 10 bit olarak gerçekleştirir. MLX90609 jiroskopların SÇBA protokolü aracılığıyla verdiği veri ise 12 bittir. MLX90609 jiroskopun daha yüksek analog-sayısal dönüşümü çözünürlüğüne sahip olması nedeniyle açısal hız verileri

⁵ ing: Serial Peripheral Interface

mikrodenetleyici üzerinde hazırlanan 1 Mb/sn veri iletim hızına sahip SÇBA protokolü aracılığıyla okunmuştur. MLX90609 jiroskopun sayısal çıkışının kazandırdığı hızlı iletişim ve yüksek çözünürlük getirilerine ek olarak, analog-sayısal dönüşümünün mikroişlemci yerine jiroskop üzerinde gerçekleşmesi devre kartı tasarımından kaynaklanabilecek bozucu etkilerinden de sistemin korunmasını sağlamaktadır. MLX90609 hakkında detaylı bilgi EK 1’de verilmiştir.

Mutlak dönüş açısı, MEMS jiroskopun ölçtüğü açısal hızın integrali alınarak elde edilir. Mikrodenetleyici tabanlı yapılan bu çalışmada, gerçekleştirilen nümerik integrasyon işlemi (3.1)’de verilmiştir.

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \dot{\theta}_i dt \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

- i : yineleme sayısı
- θ : açı (rad)
- $\dot{\theta}$: açısal hız (rad/sn)
- dt : birim zaman (sn)

değişkenlerini göstermektedir.

Dönüş açılarının MEMS jiroskop verilerinin nümerik integrali alınarak kolaylıkla elde edilmesine karşın, ölçülen değerlerin farklı türden bir algılayıcı tarafından doğrulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır [24]. Bu gereksinim kaçıklık⁶ sorunundan kaynaklanır. Kaçıklık, MEMS jiroskoplardaki küçük sapmalardır, algılayıcı kalitesine göre değişmekle beraber yaklaşık değerler olarak 0.5 rad/sn ile 0.01 rad/sn arasında değişmektedir. Geçen süre ile birlikte, integralde toplanan bu küçük sapmalar birikerek açı ölçümündeki hatayı çok büyük değerlere taşımaktadır.

⁶ ing: bias

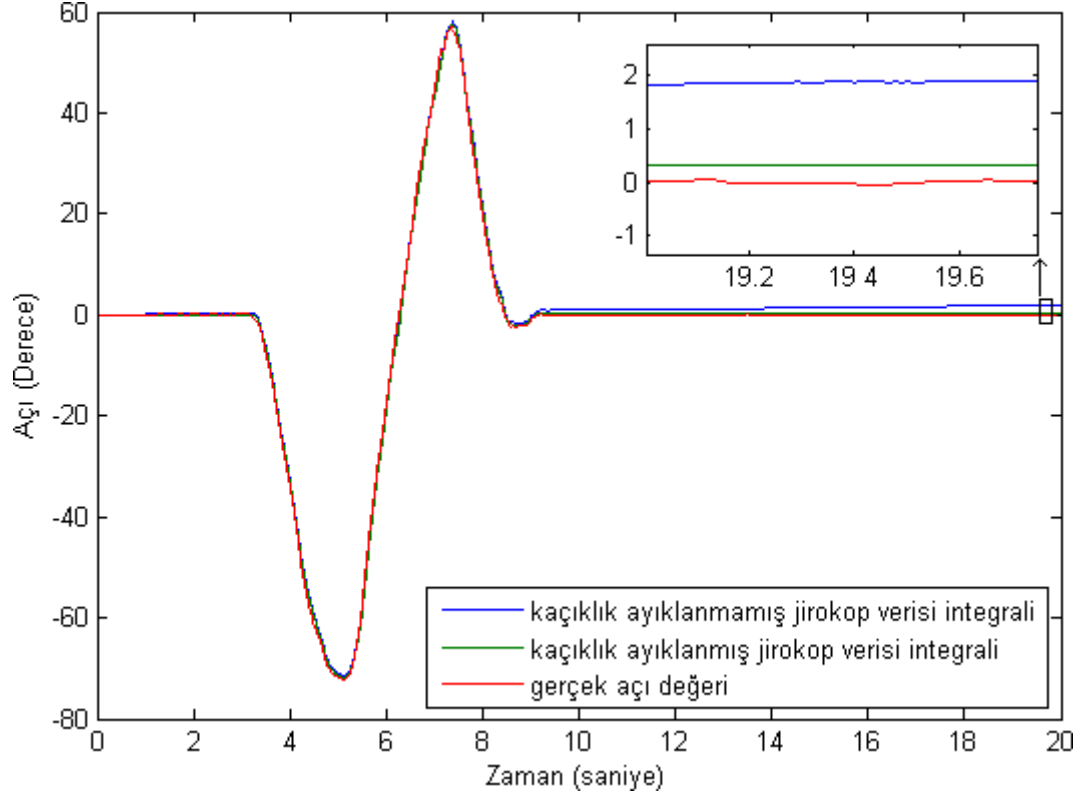
Örneğin; 0.1 °/sn kaçıklık bulunan bir MEMS jiroskoptan alınan açı ölçümünde her 10 saniyede bir ölçülen açı değeri gerçek değerinden 1 derece daha uzaklaşmaktadır. Kaçıklık miktarının tespiti, MEMS jiroskopu hareketsiz olarak bir yüzeye sabitleyip geçen sürede (3.1) ile verilen denklemin sonucundaki değişim gözlenerek yapılabilir.

Kaçıklık sorununu önlemek için literatürde başvurulmuş öncelikli yöntem yüksek geçiren filtredir. Bu yöntemde MEMS jiroskop hareketsiz konumda iken kaçıklığı sıfırlayacak bir yüksek geçiren filtre tasarlanır [12]. MEMS jiroskobun doğruluğuna göre derecesi çok yüksek veya düşük filtreler gerekebilmektedir. Bu çalışmada tercih edilen jiroskoplar için gereken dördüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin hareketin açısının ölçümünü etkilediği görülmüş bu sebeple yüksek geçiren filtre yöntemi tercih edilmemiştir. Bu çalışmada yapılan ölçümler sonucunda tüm jiroskoplardaki açısal hız kaçıklığının 0.05 rad/sn değerinden küçük olduğu görülmüş ve açısal hız ölçümünü alan mikrodenetleyiciye (3.2)'deki koşul eklenmiştir.

$$\begin{aligned} |\dot{\theta}_i| \geq 0.05 & \Rightarrow \theta_i = \theta_{i-1} + \dot{\theta}dt \\ |\dot{\theta}_i| < 0.05 & \Rightarrow \theta_i = \theta_{i-1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Bu şartla toplanan jiroskop verilerinde ise hareketin çok yavaş olduğu durumlar için kaçıklık sorunu aşılmışken, hareketin hızlı olduğu durumlarda gerçek açısal hıza ek olarak kaçıklık değeri de okunmuştur. Bu sorunun aşılması için ilk 200 okumada (3.2) ile verilen açısal hız değerlerinin 0.05 rad/sn değerinden küçük olduğu verilerin ortalaması alınmış, alınan ortalama her jiroskop ölçüm verisinden çıkarılarak hareket halindeki jiroskop ölçümlerindeki doğruluk artırılmıştır. İlk 200 okuma esnasında MEMS jiroskopun zaten hareketli olduğu durumlarda algoritmanın kaçıklık ölçümü yapabilmesi mümkün değildir. Bu sebeple kaçıklık sorunun düşürülebilmesi için başlangıç anında jiroskopun hareketli olmaması gerekmektedir. Kaçıklık çıkarıldıktan sonraki durağan hallerde ise olası hatalı kaçıklık ölçümlerinden korunmak için güvenliği artırıcı bir koşul getirilerek, jiroskop verisinin 0.03 rad/sn değerinden küçük olduğu durumlarda jiroskop verisi 0'a eşitlenerek algoritma

tamamlanmıştır. Şekil 3.1 bu algoritmayla filtrelenmiş jiroskop verilerinin integralini ve gerçek açıyla karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 3.1. Kaçıklık düzeltme algoritması uygulanmış ve uygulanmamış jiroskop integralleri ve gerçek açı grafiği

Şekle göre; filtreleme algoritması uygulanmış jiroskop çıkışında kaçıklık değeri düşmüş, %80'lere varan iyileştirmeler elde edilmiştir. Çizelge 3.1 algoritmanın sahte kodunu vermektedir.

Çizelge 3.1. Jiroskop kaçıklık değerini ayıklayan algoritmanın sahte kodu

```
Parametreleri ilklendir
Döngü değişkenini ilklendir DD=0
Kaç kere 0.03'den küçük veri okunduğunu sayan değişkeni ilklendir dd=0
Kaçıklık değerini ilklendir kaçıklık=0
while (1)
    Jiroskop verilerini oku
```

```
Döngü değişkenini arttır DD++
if (DD<201 ) then
    if ( abs(jiroskop_verisi) < 0.05 ) then
        toplam_kaçıklık = kaçıklık + jiroskop verisi
        Kaç kere kaçıklık ölçüldüğünü dd++ şeklinde say
    end if
else
    jiroskop_verisi = jiroskop_verisi – (toplam_kaçıklık/dd)
    if ( abs(jiroskop_verisi) < 0.03)
        Jiroskop verisi = 0
    end if
end if
end while
```

3.2 İvmeölçer

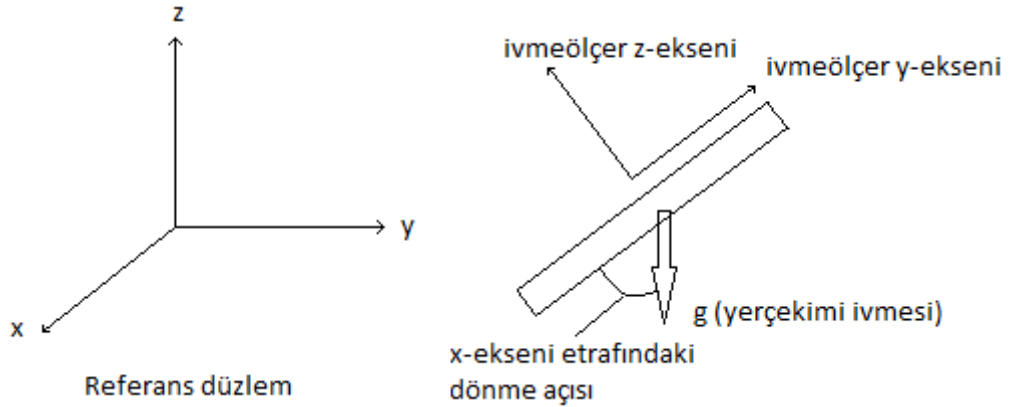
Mekanik ivmeölçer, içerisinde bulunan kütlesi bilinen bir nesnenin hangi ekseninde ne kadar kuvvete maruz kaldığını ölçen, ölçülen kuvvet değerini Newton'un birinci yasası yardımıyla ivmeye çeviren bir algılayıcıdır. Önceleri yaylarla sabitlenen kütleler yardımıyla yapılan ivmeölçerler, günümüzde MEMS teknolojisi sayesinde kapasitif ve piezoelektrik malzemeler kullanılarak çok daha küçük boyutlarda tasarlanmakta ve üç ekseninde ivme ölçümü yapabilmektedir [25]. Bu çalışmada tercih edilen MEMS ivmeölçerler Sparfun SCA3000-D01 üniteleridir.

SCA3000-D01 üç ekseninde ölçüm yapabilen ve sadece sayısal çıkışa sahip yüksek hassasiyetli bir ivmeölçerdir. Her bir eksen için ivme değeri bilgisi 11-bit çözünürlükle 1 Mbit/sn hızındaki SÇBA protokolü üzerinden aktarılmaktadır. Jiroskop ve ivmeölçerin aynı iletişim protokolüne sahip olması ataletsel ölçüm biriminin daha küçük tasarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. SCA3000-D01 $\pm 2g$ ölçüm aralığına sahiptir. İvmeölçerin her bir ekseninde ölçtüğü ivme değerlerinin n_x ,

n_y, n_z ve yerçekimi ivmesinin g olduğu durumda (3.3)'deki denklem ivmeölçerin aldığı her ölçümde sağlanmaktadır SCA3000-D01 ile ilgili detaylı bilgi EK 2'de verilmiştir.

$$\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \leq 2g \quad (3.3)$$

Yerçekimi, ivmeölçerlerin açı ölçümü yapabilmesini sağlayan temel bileşendir. İvmeölçerin yerçekimi ivmesini de algılaması nedeniyle, yapılacak her ölçümde, ivmeölçerin yer düzlemine göre yönelimi büyük önem taşımaktadır. Sabit yerçekimi ivmesinin z -ekseni doğrultusunda olduğunun bilindiği Şekil 3.2'deki gibi bir durumda, ivmeölçerin eksenleri üzerindeki ivme değerleri ölçülerek yönelim hesaplanabilmektedir [9].



Şekil 3.2. İvmeölçer ile açı ölçümü

Burada; x eksenini etrafındaki dönme açısının bulunması için (3.4), (3.5) ve (3.6)'daki formüller kullanılır [16].

$$\psi = \arcsin\left(\frac{n_z}{g}\right) \quad (3.4)$$

$$\psi = \arccos\left(\frac{n_y}{g}\right) \quad (3.5)$$

$$\psi = \arctan 2(n_z, n_y) \quad (3.6)$$

Bu eşitliklerde;

ψ : x eksenini etrafındaki dönme açısı

n_z : İvmeölçerin kendi z eksenini üzerinde ölçtüğü ivme (m/sn^2)

n_y : İvmeölçerin kendi y eksenini üzerinde ölçtüğü ivme (m/sn^2)

g : yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

değişkenlerini göstermektedir.

Tüm algılayıcılar gibi ivmeölçer ölçümlerinde de düzeltilemeyen hata payı ve gürültü bulunmaktadır., İvmeölçerle gerçekleştirilen dönüş açısı ölçümlerinde, ivmeölçerlerin yapısal gürültüsüne ek olarak, doğrusal hareketlerden gelen ivme verileri de gürültü olarak kabul edilmektedir. Gerçek sayılarla yapılan sinüs ve kosinüs işlemlerinin sonucu $[-1,1]$ aralığındadır. İvmeölçerler verileri gürültü nedeniyle g değerinden büyük veya küçük olabilmekte, bunun sonucunda yapılan arcsin veya arccos işlemleri tanımsız olmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla ivmeölçer verileri normalleştirilmiştir. Normalleştirme yordamı (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)'da gösterildiği gibi uygulanmaktadır.

$$\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = g' \quad (3.7)$$

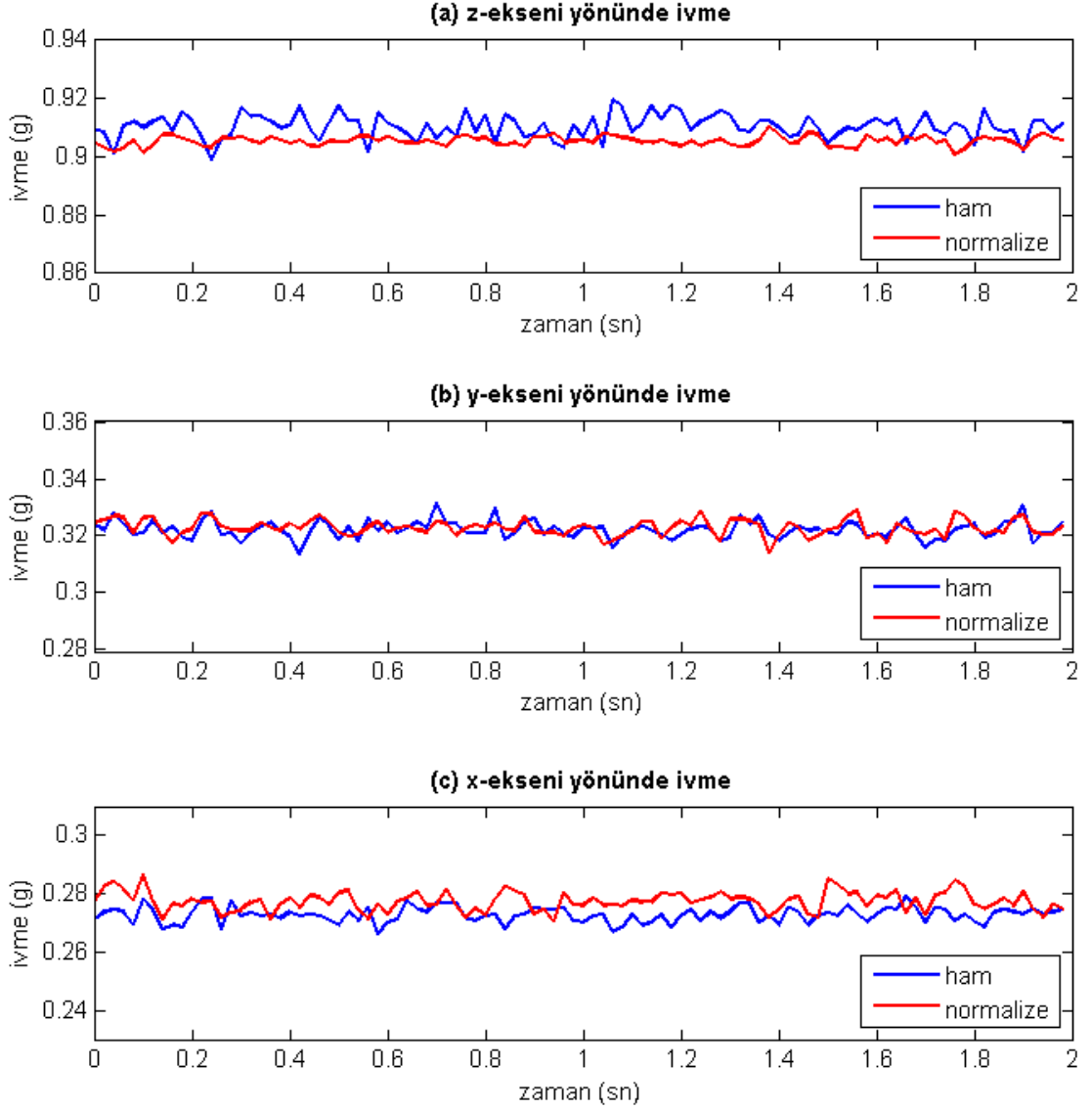
$$n_x = \frac{n_x}{g'} \quad (3.8)$$

$$n_y = \frac{n_y}{g'} \quad (3.9)$$

$$n_z = \frac{n_z}{g'} \quad (3.10)$$

Normalleştirme işleminin ardından arccos ve arcsin işleminde hatalı sonuç elde etmenin önüne geçilmesinin yanında ivmeölçer verilerindeki salınımların da düştüğü

gözenmiştir. Şekil 3.3, SCA3000-D01 ivmeölçerinden elde edilen ham ve normalleştirilmiş verileri göstermektedir.



Şekil 3.3. Normalleştirme yordamı öncesi ve sonrasında ivmeölçer verileri

Normalleştirme işlemi sabit konumdaki bir ivmeölçer için yeterli olsa da, hareket halinde bu verilerdeki gürültü miktarının artması beklenmektedir [26]. Gürültüyü düşürmek amacıyla ivmeölçer verilerine mikrodenetleyicide sonsuz dürtü yanıtı⁷

⁷ ing: Infinite Impuls Response

(SDY) alçak geçiren Butterworth sayısal filtreler eklenmiştir. Kesme frekansı ω_c Hz, örnekleme zamanı dt olarak seçilen filtrelerin ifadeleri (3.10), (3.11), (3.12)'de verildiği gibidir.

$$A_z = \frac{a_0 n_z + 2a_1 z^{-1} n_z + a_2 z^{-2} n_z - b_1 z^{-1} A_z - b_2 z^{-2} A_z}{b_0} \quad (3.10)$$

$$A_y = \frac{a_0 n_y + 2a_1 z^{-1} n_y + a_2 z^{-2} n_y - b_1 z^{-1} A_y - b_2 z^{-2} A_y}{b_0} \quad (3.11)$$

$$A_x = \frac{a_0 n_x + 2a_1 z^{-1} n_x + a_2 z^{-2} n_x - b_1 z^{-1} A_x - b_2 z^{-2} A_x}{b_0} \quad (3.12)$$

Bu eşitliklerde;

z^{-1} : birim zaman gecikmesi

z^{-2} : iki birim zaman gecikmesi

$n_{x,y,z}$: ivmeölçerden okunan veriler

$A_{x,y,z}$: filtrelenmiş ivmeölçer çıkışları

$a_{0,1,2}$: $\omega_c^2 dt^2$ sabit

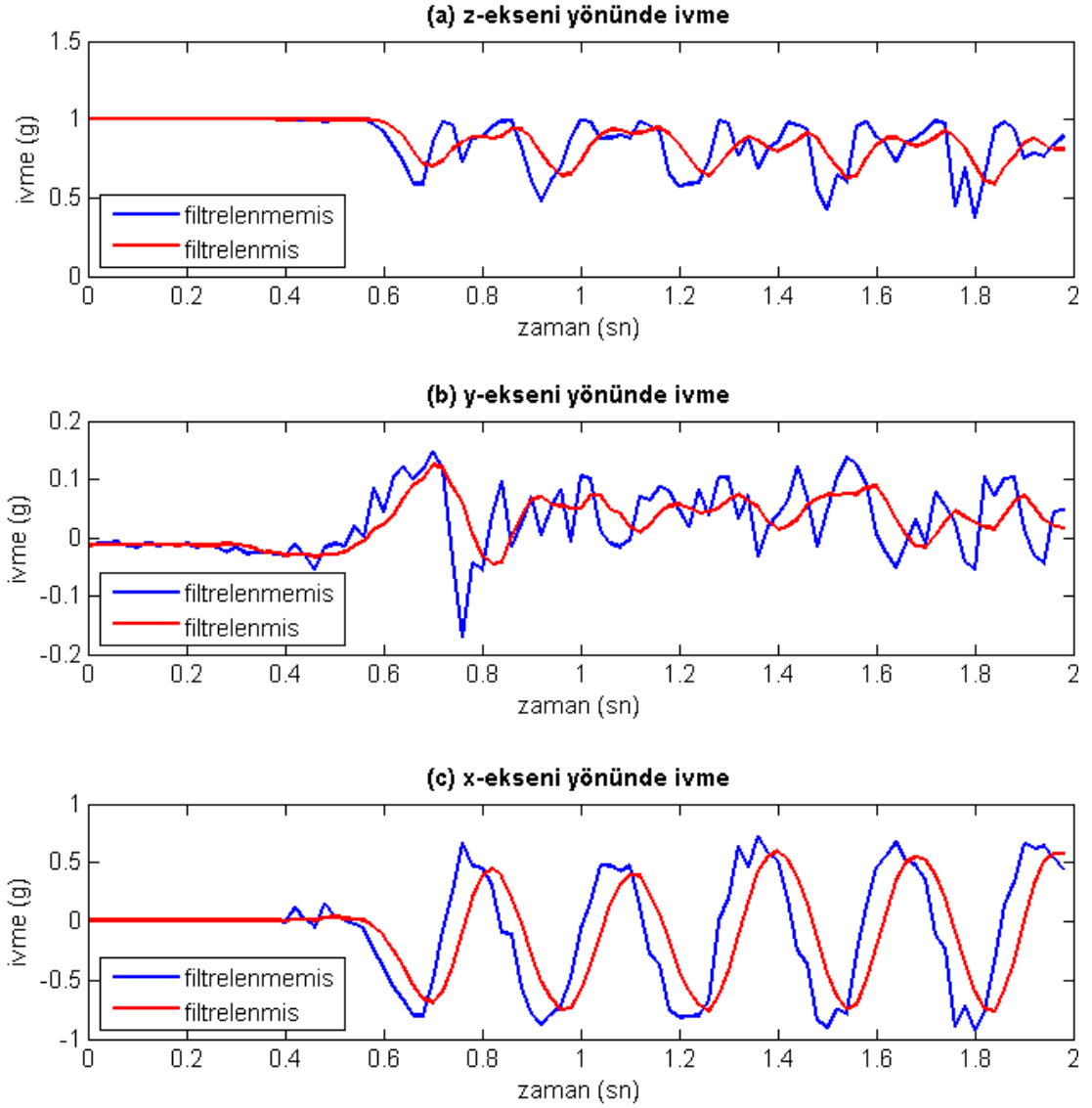
b_0 : $4 + 2\sqrt{2}\omega_c dt + \omega_c^2 dt^2$ sabit

b_1 : $-8 + 2\omega_c^2 dt^2$ sabit

b_2 : $4 - 2\sqrt{2}\omega_c dt + \omega_c^2 dt^2$ sabit

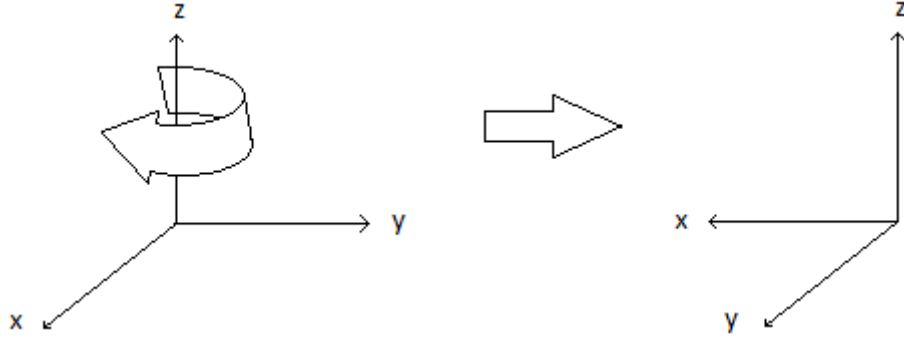
değerlerini göstermektedir.

Eklenen filtrelerin ardından ivmeölçer çıkışlarının hareket esnasında daha yumuşak cevaplar verdiği, sert kırılmaların olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.4 hareket halindeki ivmeölçer verilerinin filtresiz ve filtrelenmiş halini göstermektedir. Filtrenin kesme frekansı $\omega_c = 5$ Hz, örnekleme zamanı $dt = 0.01$ sn seçilmiştir. Farklı uygulamalar için değişik ω_c ve dt değerleri seçilebilmektedir.



Şekil 3.4. Filtreleme öncesi ve sonrasında hareketli ivmeölçer verileri

Dönme açılarının algılanmasında yerçekimi ivmesi referans alınmıştır. Bu nedenle, yerçekimi doğrultusunda olan eksenler etrafındaki dönme açılarının ivmeölçerler tarafından ölçümü mümkün değildir [27]. Bu şekildeki bir hareket Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Z-ekseni etrafında $-\pi/2$ radyan dönen eksen takımı

Şekilde z eksenini etrafında $-\pi/2$ radyanlık bir dönme olmasına rağmen, dönmeden önceki ve sonraki ivmeölçer eksen değerleri arasında bir fark olması beklenmez. Bu sebeple ivmeölçerler açısal dönme ölçümlerinde tek başlarına tercih edilmemektedir. Çoğunlukla ivmeölçerlerle beraber jiroskop ve/veya manyetikölçer kullanılmaktadır [28].

3.3 Manyetikölçer

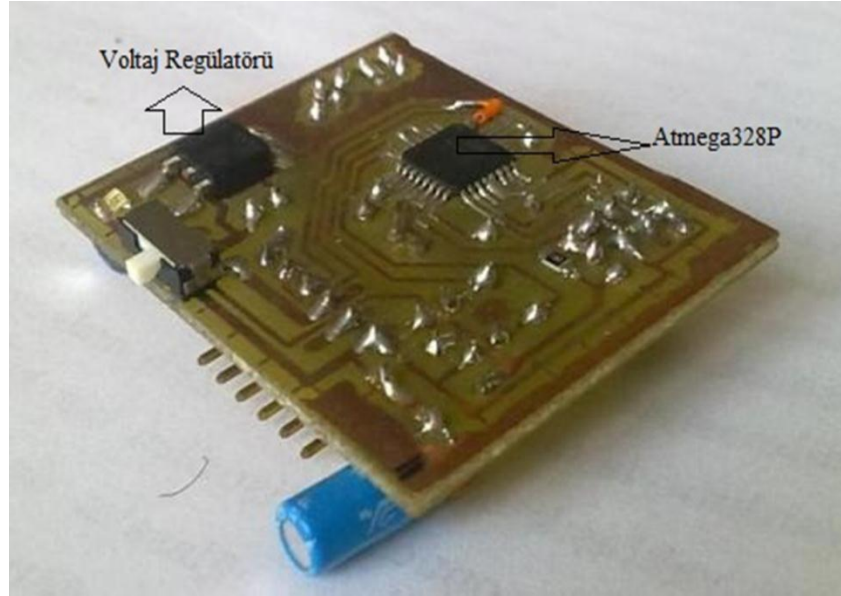
Manyetikölçerler buldukları ortamdaki manyetik alanı ölçen cihazlardır. Ataletsel ölçüm birimleriyle birlikte kullanıldıklarında, dünyanın etrafındaki manyetik alan çizgilerini ölçer ve ölçtükleri manyetik alanın genliğine göre ataletsel ölçüm birimleriyle yapılan ölçümlere mutlak referans kazandırır. İvmeölçerlerde olduğu gibi üç ekseninde ölçüm alabilmektedirler [29].

Manyetikölçerle beraber kullanılan ataletsel ölçüm birimlerinin en büyük avantajı başlangıç konumunun ölçüm sistemlerine mutlak olarak sağlanmasıdır. Bu sebeple manyetikölçerler olmadan tasarlanan bir ataletsel ölçüm biriminin başlangıç konumunun bilinen bir konum olması gerekmektedir. Ölçüm sistemine kazandırdıkları bu getiriye rağmen manyetikölçerlerin kullanımı sorunlara yol açabilmektedir. Pusula çalışma ilkesiyle çalışan manyetikölçerler, tıpkı pusulalarda olduğu gibi, yakınlarında bulunan ferromanyetik maddelerden etkilenmekte ve hatalı ölçüm verebilmektedirler. Buna ek olarak, kapalı bir alanda ölçüm yapan manyetikölçerlerin güvenilirliği düşmektedir [30]. Yapılan çalışmada kullanılacak ölçüm sisteminin kapalı bir laboratuvar ortamında çalışacak olması ve aynı

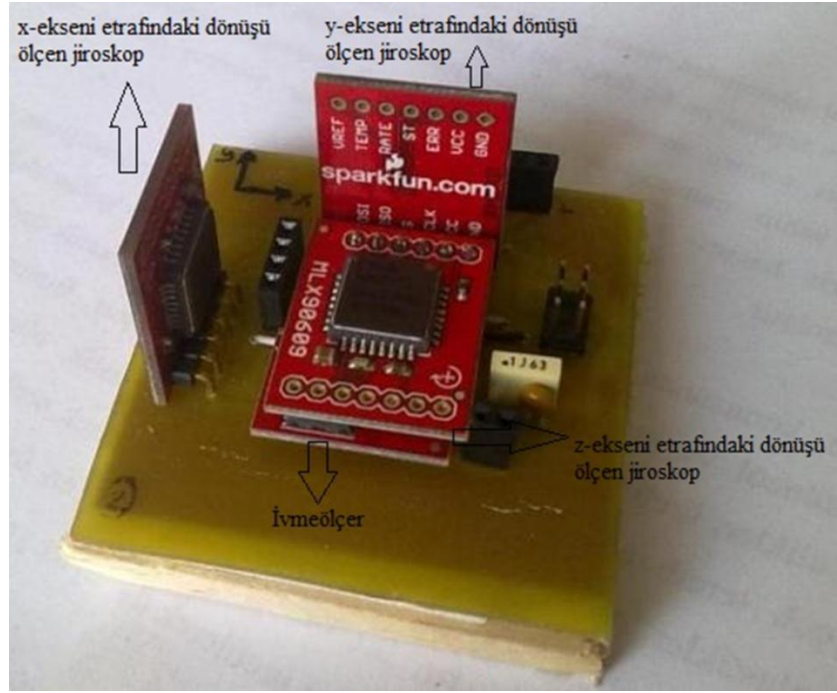
laboratuvarda bulunan metal malzemelerin çokluğu sebebiyle, ölçüm sisteminde manyetikölçerler tercih edilmemiştir.

3.4 Tasarımlanan Ataletsel Ölçüm Birimi

Bu çalışmada tasarımılanan ve iki adet üretilen ataletsel ölçüm biriminin her birinde; üç adet tek-eksenli MLX90609 jiroskop (her eksen için bir adet) ve üç adet üç-eksenli SCA3000-D01 ivmeölçerler kullanılmıştır. Ölçüm birimi üzerine takılmak üzere tasarlanan Atmega328P mikrodnetleyicili okuyucu kartları kullanılarak her bir komut döngüsünde jiroskoplardan ve ivmeölçerden veri alımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6 Atmega328P mikrodnetleyicili okuyucu kartını, Şekil 3.7 ataletsel ölçüm birimi algılayıcı kartını, Şekil 3.8 her iki kartın birleştirilmesiyle elde edilen ataletsel ölçüm biriminin son halini göstermektedir. Kartların detaylı devre şemaları EK 4’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Atmega328P’li okuyucu kart



Şekil 3.7. Ataletsel ölçüm birimi algılayıcı kart

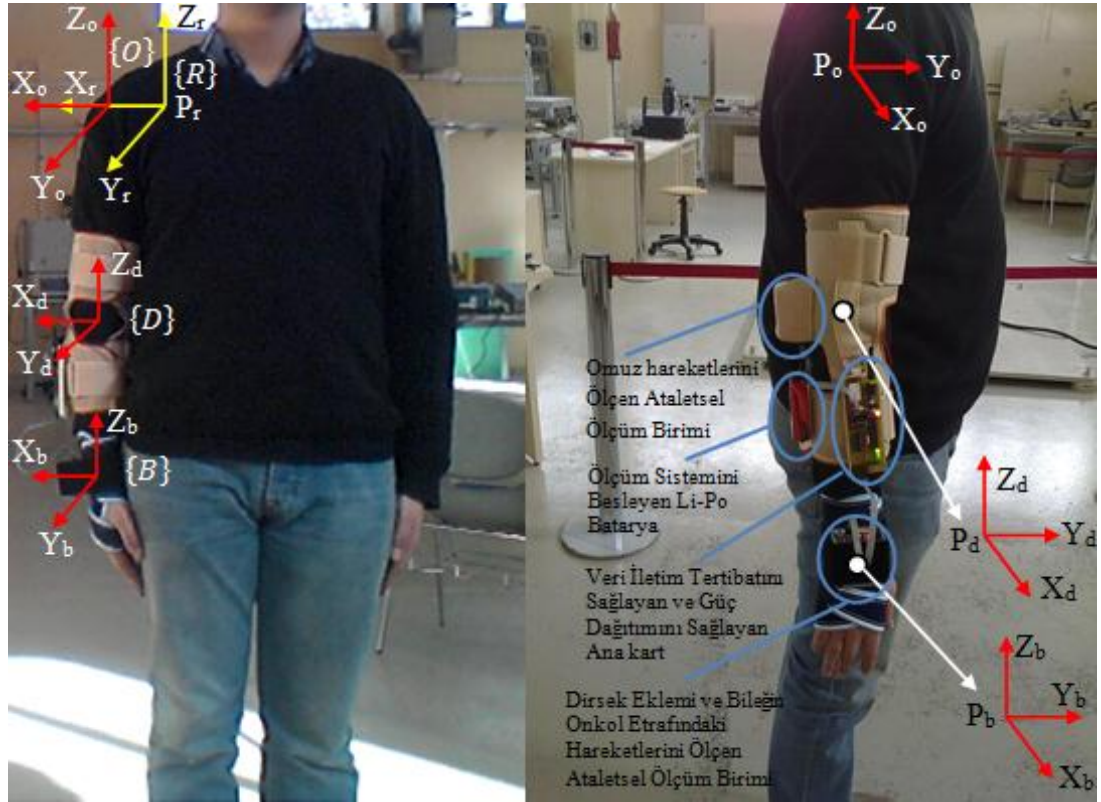


Şekil 3.8. Ölçüm kartı ve okuyucu kart birleştirilmiş ataletsel ölçüm birimi

Tasarımlanan ataletsel ölçüm birimlerinin insan kolu üzerine yerleştirilmesi ve kol hareketlerinin algılanmasında kullanılan yöntemler Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılmıştır.

4. İNSAN KOLU HAREKETLERİNİN ATALETSEL ÖLÇÜMÜ

Sağlıklı bir insan kolunda omuz, dirsek ve bilek olmak üzere üç eklem vardır. Bu eklemler sadece dönme hareketi yapabilmektedir. İnsan kolu omuz eklemine üç, dirsek eklemine bir ve bilek eklemine üç olmak üzere toplam yedi serbestlik derecesine sahiptir [31]. Tasarımlanan ölçüm sisteminde iki adet üç-eksenli ataletsel ölçüm birimi bulunmaktadır. Böylece insan kolunun altı serbestlik derecesine kadar hareketleri ölçülebilmektedir. Ölçüm sistemi ve çalışmanın bundan sonrasında kullanılan koordinat çerçevelerinin⁸ isimlendirmeleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Burada; P_r ve P_o omuz, P_d dirsek, P_b bilek üzerinde bulunan noktalardır ve bu noktalar sırasıyla $\{R\}$, $\{O\}$, $\{D\}$ ve $\{B\}$ çerçevelerinin orijinlerini oluşturmaktadır. P_r noktası tüm ölçüm sisteminin referans noktası olarak kabul edilmiş, Z_r - Y_r - X_r

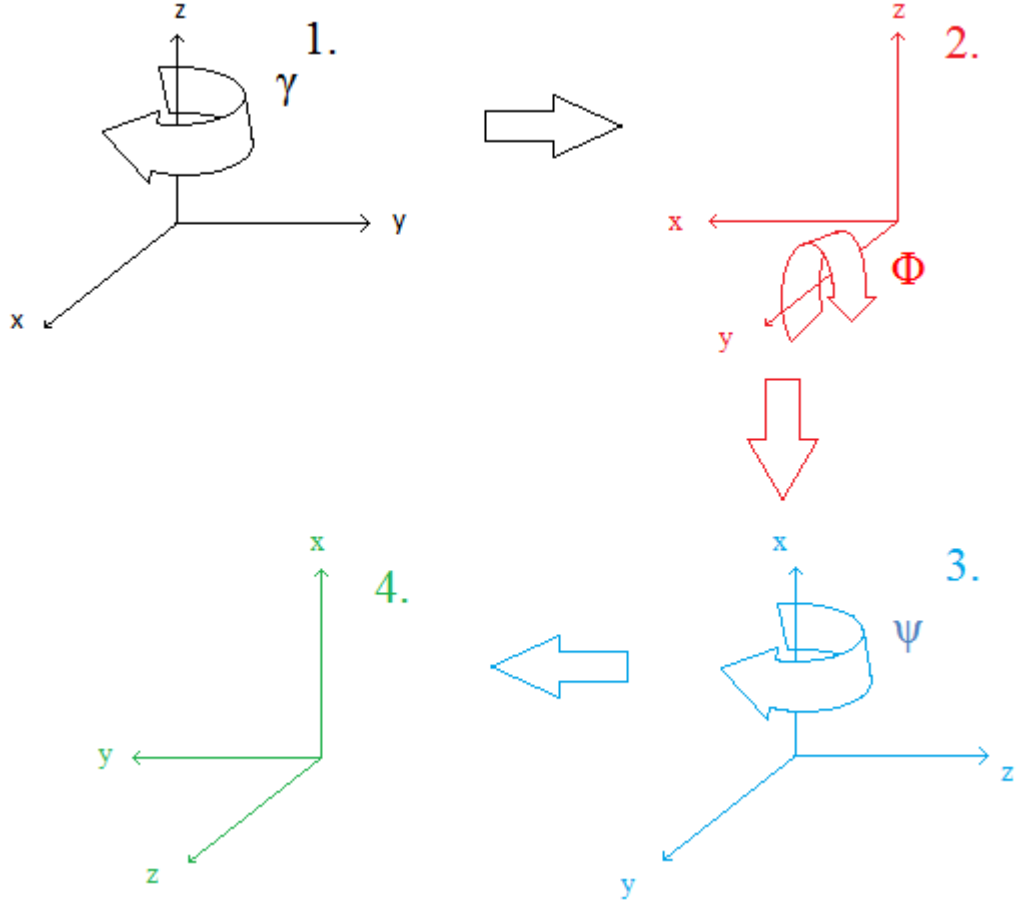
⁸ ing: frame

eksenlerinin oluşturduğu $\{R\}$ çerçevesi referans çerçeve olarak kullanılmıştır. $\{R\}$ çerçevesinin mutlak sabit olduğu kabulüyle, insan kolunun gerçekleştirdiği her hareket $\{O\}$, $\{D\}$ ve $\{B\}$ çerçevelerinin üç boyutlu uzayda yer ve/veya yönelim değiştirmesine neden olmaktadır. Dirsek arkasına eklenen ataletsel ölçüm birimi $\{O\}$ çerçevesinin yönelimini ölçmekte ve P_d noktasının P_o noktasına göre konumunu bulmaktadır. Bilek üzerinde bulunan ataletsel ölçüm birimi ise $\{D\}$ çerçevesinin X_d ve Z_d eksenleri etrafındaki yönelimini ölçmekte ve P_b noktasının konumunu P_d noktasına göre bulmaktadır.

Ölçüm birimlerinin dönme eksenine yakın olmasının ölçüm hatasını düşürdüğü bilinmektedir [32]. Ancak ataletsel ölçüm birimlerini omuz ve dirsek dönme merkezlerine sabitlemenin zor olması ve hareket esnasında dönme merkezlerinde bulunan kasların hareketinin ölçüm hatalarını artırmasından dolayı, sabitleme işlemi sert kemik yapılarının bulunduğu dirsek arkası ve bilek üzerine yapılmıştır. Yapılan literatür taramasında, ataletsel ölçüm birimlerinin Şekil 4.1'deki gibi kurulduğu sistemlerde hareket ölçümü için iki ana yöntemin uygulandığı görülmüştür. Bunlar, Euler açıları ve kuaterniyon cebiri yöntemleridir. Bu çalışmada her iki yöntem de incelenmiştir.

4.1 Euler Açıları ve Direkt Kosinüs Matrisi (DKM)

Euler açıları, İsviçreli matematikçi ve fizikçi Leonhard Euler tarafından keşfedilen ve bir cismin yönelimini tanımlayan üç açının ifadesidir [33]. Euler açıları, bir çerçevenin başka bir referans çerçeveye göre yönelimini tanımlamak için özellikle robotik uygulamalarda tercih edilir.



Şekil 4.2. Koordinat eksenleri dönüşleri

Şekil 4.2, bir çerçevenin kendi asal eksenleri etrafında dönüşünü göstermektedir. Her eksen etrafındaki dönüş farklı matrislerle ifade edilir. (4.1), (4.2) ve (4.3)'de sırasıyla z-ekseni, y-ekseni ve x-ekseni etrafındaki dönme matrisleri verilmiştir [2].

$${}^1_2R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^2_3R_y(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^3_4R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Şekil 4.2’de gösterilen dönüş sırası ile çerçevenin 1. ve 4. durumu arasında (4.4) ile verilen dönme matrisi elde edilir.

$${}^1_4R = {}^1_2R_z(\gamma) {}^2_3R_y(\phi) {}^3_4R_x(\psi) = \begin{bmatrix} c\gamma c\phi & c\gamma s\phi s\psi - s\gamma c\psi & c\gamma s\phi c\psi + s\gamma s\psi \\ s\gamma c\phi & s\gamma s\phi s\psi + c\psi c\gamma & s\gamma s\phi c\psi - c\gamma s\psi \\ -s\phi & c\phi s\psi & c\phi c\psi \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte $c\psi = \cos(\psi)$, $s\psi = \sin(\psi)$, $c\phi = \cos(\phi)$, $s\phi = \sin(\phi)$, $c\gamma = \cos(\gamma)$, $s\gamma = \sin(\gamma)$ ifadelerini simgelemektedir. (4.4) ile verilen matrise direkt kosinüs matrisi¹⁰ (DKM) adı verilir. Euler açıları ile oluşturulan DKM’lerde dönüş sırasına göre; ZYX, ZYZ, ZXY, ZXZ, YXZ, YXY, YZX, YZY, XYZ, XYX, XZY, XZX olmak üzere toplam 12 adet DKM elde edilmektedir. Dönüş sıranın önemli olması, DKM matrisi içinde bulunan dokuz adet değişken verinin her yinelemede hesaplanması ve iletilmesi zorunluluğunu getirir. Bu zorunluluk veri iletim süresini ve örnekleme zamanını uzatmaktadır. Buna rağmen Euler açıları yöntemi, robotik sistemlerdeki en temel yönelim hesaplama yöntemi olması nedeniyle, bu çalışma kapsamında denenmiştir. Ataletsel ölçüm birimlerinde Euler açıları ile birlikte sıklıkla kullanılan Kalman filtresi algoritması detaylı olarak bir sonraki başlıkta verilmiştir.

4.1.1 Kalman Filtresi

Kalman filtresi, Macar asıllı Amerikan bilim adamı Rudolf Kalman tarafından 1960 yılında geliştirilen istatistik tabanlı bir filtredir [34]. Hata kovaryansı bilinen algılayıcıların doğruluğunun kestirimi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada AÖB’lere

¹⁰ ing: Direction Cosine Matrix

uygulanan Kalman filtresi; iki algılayıcı arasında belirlenen güven oranına göre, sistem çıkışının hangi algılayıcı çıkışına ne kadar yakınsayacağına karar veren denetim mekanizması olarak çalışmaktadır [13].

Kalman filtresi durum uzayı gösterimi ile kullanılmaktadır. Bu çalışmada ayırık zamanlı bir Kalman filtresi, jiroskop ve ivmeölçer algılayıcılarından ölçülen açı değerlerini harmanlamak için kullanılmıştır. Açı ölçümlerinde jiroskop verilerinin nümerik integrali yeterlidir, ancak ivmeölçerden gelen açı bilgisini elde edebilmek için doğrusal olmayan trigonometrik işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. (4.5), (4.6) ve (4.7) her bir eksen etrafındaki dönme açılarının ivmeölçer aracılığıyla nasıl elde edilebileceğini göstermektedir [16]. Kalman filtresinin gürültü sönümleyici etkisinin yüksek olması nedeniyle SDY alçak geçiren filtre uygulanmamış ham ivmeölçer verileri ile açı hesapları yapılmıştır.

$$\psi^A = \text{atan2}(n_y, n_z) \quad (4.5)$$

$$\phi^A = -\text{atan2}(n_x \cos(\psi^A), n_z) \quad (4.6)$$

$$\gamma^A = \text{atan2}(n_x, n_y) \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte;

ψ^A : İvmeölçerin ölçtüğü X-ekseni etrafındaki dönme açısı (rad)

ϕ^A : İvmeölçerin ölçtüğü Y-ekseni etrafındaki dönme açısı (rad)

γ^A : İvmeölçerin ölçtüğü Z-ekseni etrafındaki dönme açısı (rad)

değişkenlerini göstermektedir.

Açı ölçümü için hesaplanacak ayırık zamanlı Kalman filtresinde altı adet durum bulunmaktadır. Bunlar; γ , γ , ϕ , ϕ , ψ , ψ açıları ve açısal hızlarıdır. Filtre yazılımı Atmega328P mikrodenetleyicili okuyucu karta uygulanmıştır. Altı durumlu bir filtrenin hesaplamalarının kullanılan mikrodenetleyici için fazla zaman alacağı ve

yazılımının karmaşık olacağı göz önüne alınarak, ikişer durumlu üç kalman filtresi algoritması yazılmıştır. Bu filtre yapılarından biri olan yuvarlanma açısı (x -ekseni etrafındaki dönüş açısı) için durum denklemi (4.8)'de verilmiştir [24].

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} = Fx_k + Bu_k &\Rightarrow \begin{bmatrix} \psi_{k+1} \\ \dot{\psi}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_k \\ \dot{\psi}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ dt \end{bmatrix} u_k + w_k \\
 y_{k+1} = Cx_{k+1} &\Rightarrow \psi_k^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{k+1} \\ \dot{\psi}_{k+1} \end{bmatrix} + v_k
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Bu eşitlikte;

- dt : örnekleme zamanı, (sn)
- $\dot{\psi}_k$: jiroskopun ölçtüğü açısal hız, (rad/sn)
- w_k : k anındaki işleme gürültüsü
- v_k : k anındaki ölçüm gürültüsü, (rad)
- u_k : açısal ivme, (rad/sn²)
- F,B,C : Ayrık zamanlı durum uzayı temsil matrisleri

değişkenlerini göstermektedir.

Sistem denklemi (4.8)'de verilen x -ekseni etrafındaki dönüş açısı denklemindeki w_k ve v_k değişkenleri Gauss dağılımı gösteren beyaz gürültülerdir [35]. Kalman filtresi için bu değişkenlerin kovaryansları (4.9) ile bulunmaktadır [36].

$$\begin{aligned}
 R_k &= E(v_k v_k^T) \\
 Q_k &= E(w_k w_k^T)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Bu veriler deneysel olarak hesaplanabileceği gibi, bazı algılayıcıların veri föylerinde de bulunabilir. Bu çalışmada hata kovaryansları veri föylerinden elde edilmiştir.

(4.10)'da verilen Kalman filtresi modeli, bilinen R_k ve Q_k değişkenleri ile birlikte sisteme uygulanmıştır [37].

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{k+1|k} \\ \dot{\psi}_{k+1|k} \end{bmatrix} &= F \begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{k|k} \\ \dot{\psi}_{k|k} \end{bmatrix} \\
P_{k+1|k} &= FP_{k|k}F^T + Q_k \\
K_{k+1} &= P_{k+1|k}C^T(CP_{k+1|k}C^T + R_k)^{-1} \\
\begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{k+1|k+1} \\ \dot{\psi}_{k+1|k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{k+1|k} \\ \dot{\psi}_{k+1|k} \end{bmatrix} + K_{k+1} \left(\psi_k^A - C \begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{k+1|k} \\ \dot{\psi}_{k+1|k} \end{bmatrix} \right) \\
P_{k+1|k+1} &= (I - K_{k+1}C)P_{k+1|k}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Bu eşitliklerde;

- $\widehat{\psi}_{k|k}$: k anındaki yuvarlanma açısı için hesaplanan durum, (rad)
- $\widehat{\psi}_{k+1|k}$: tahmin edilen durum, (rad)
- $\dot{\psi}_{k|k}$: jiroskoptan ölçülen açısal hız değeri, (rad/sn)
- $P_{k|k}$: k anındaki hata kovaryans matrisi
- $P_{k+1|k}$: tahmin edilen hata kovaryans matrisi
- K_{k+1} : $k+1$ anındaki Kalman kazancı
- ψ_k^A : ivmeölçer ile ölçülen yuvarlanma açısı, (rad)

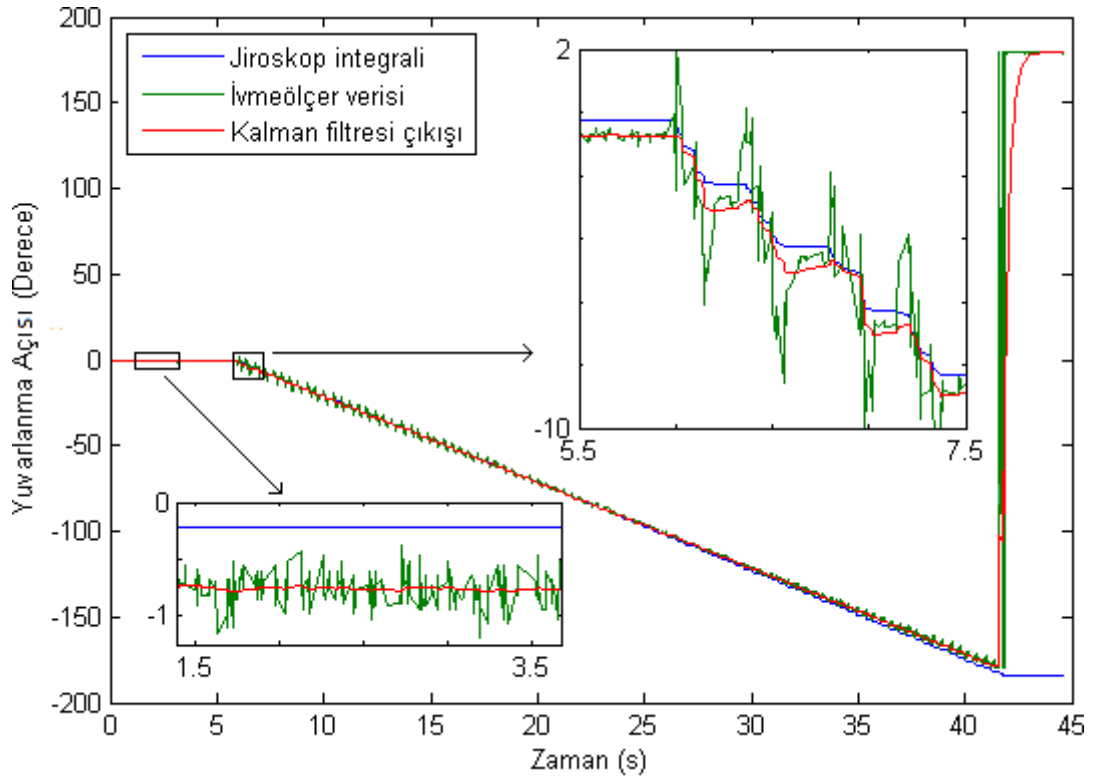
değişkenlerini göstermektedir.

Yerçekimi ile aynı doğrultudaki bir eksen etrafında gerçekleşen dönüşlerde (bkz. Şekil 3.9), dönüş açısının ivmeölçer ile ölçülmesi mümkün olmadığından, dönüş açıları sadece jiroskop sayısal integrali ile alınarak elde edilmiştir.

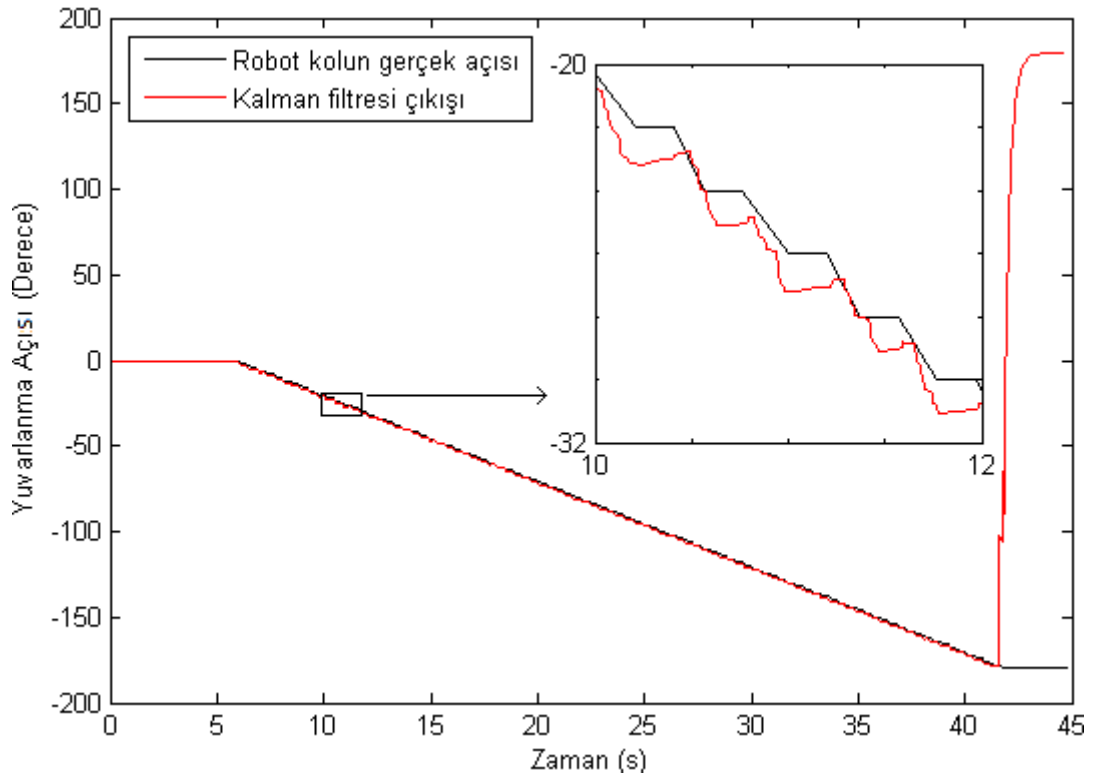


Şekil 4.3. Kalman filtresi test düzeneği

Tasarlanan AÖB'lerin ve Kalman filtresinin doğruluğunu teyit etmek için Staubli Rx160 robot kolu üzerine Şekil 4.3'deki düzenek hazırlanmıştır. Burada AÖB robotun besinci eklemine yerleştirilmiş ve bu ekleme, diğer robot eklemleri sabit tutulurken, her adımda ikişer derece olmak üzere toplam 90 adım atlatılmıştır. Her bir adımda ivmeölçerden gelen açı bilgisi, jiroskopun sayısal integrali ile elde edilen açı bilgisi ve Kalman filtresinin çıkışındaki açı bilgisi okunmuştur. Şekil 4.4 bu bilgilerin grafiğe dökülmüş halini göstermektedir. İvmeölçer çıkışının yapısından dolayı aşırı gürültülü, jiroskop integrali çıkışının ise kaçıklık sorunu sebebiyle geçen süreyle birlikte hatalı ölçüm yaptığı görülebilir. Kalman filtresi çıkışının ise ivmeölçerle elde edilen açı bilgisini takip ettiği ancak gürültü miktarının ivmeölçere kıyasla oldukça düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.4. İvmeölçer, jiroskop integrali ve Kalman filtresi çıkışları



Şekil 4.5. Gerçek açı ve Kalman filtresi çıkışı açıları

Kalman filtresi testlerinde, altı eklemının kümülatif tekrar edilebilirliği 0.05 mm olan robot kolun sadece tek eklemi hareket ettirilmiştir. Bu durumda, robot kontrolcüsünden okunan açı değerlerinin mutlak doğru olduğu kabul edilmiş ve “gerçek açı” olarak adlandırılmıştır. Şekil 4.5, Kalman filtresi çıkışı ile robot kontrolcüsünden okunan gerçek açı bilgisinin grafiğini göstermektedir. Kararlı haldeki ölçüm hatasının yaklaşık 1° olduğu yakınlaştırılmış grafikte görülebilir.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de görülen bir diğer unsur ise, Kalman filtresi çıkışı ile ivmeölçer çıkışının -180° ’de yaşadığı kırılma ve çıkışların $+180^\circ$ ’ye fırlamasıdır. İvmeölçerle elde edilen açıları ifade eden (4.5), (4.6) ve (4.7)’deki atan2 fonksiyonunu doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve $\mp\pi$ aralığında değer almaktadır. Şekil 4.4 ve 4.5’de gerçekleşen kırılma durumunda kırılma anından hemen önce ivmeölçer çıkışı $\text{atan2}(0.001,-0.999999)=-179.94^\circ$ değerindeyken çok küçük bir değişim sonucunda işaret değişiminden etkilenecek kırılma anında $\text{atan2}(-0.001,-0.999999)=179.94^\circ$ değerini almaktadır. Her üç eksen için gerçekleşebilecek bu durumu önlemek amacıyla filtre algoritmalarına özel şartlar eklenmiştir.

Her açı değerinin kırılma olasılığının bulunduğu $[178^\circ,-178^\circ]$ aralığını kapsayan dört derecelik ölü bölgeler tanımlanmıştır. Eğer Kalman filtresi çıkışı türevi negatif olarak -178° ’nin altına inmişse veya türevi pozitif olarak 178° ’nin üzerine çıkmışsa, $[-178^\circ,178^\circ]$ aralığındaki 356° ’lik açı değerlerini gösterdiği sürece filtre çıkışı 180° olarak kabul edilmiştir. Eklenen bu şartla beraber hesaplanan Kalman filtresi çıkışının ölü bölgelere girdiği takdirde muhtemel iki derecelik hatalar yapabileme ihtimali göze alınmıştır. EK 6’da bu çalışmada kullanılan Kalman filtresinin yazılımı bulunmaktadır.

Sadece ivmeölçer ve jiroskop ile tasarlanan ataletsel ölçüm biriminde Kalman filtresi kullanıldığında, ivmeölçerin yerçekimi doğrultusundaki ekseni etrafındaki dönüşleri yakalayabilmek için ve doğrusal olmayan atan2 fonksiyonunun kırılma noktalarındaki sert durum değişikliklerini telafi edebilmek için özel önlemler alınması gerekmiştir. Bu önlemlerin getirdiği hesaplama yüküne, Euler açıları ile

elde edilen DKM matrisinin her yinelemede hesaplanması ve iletilmesinden kaynaklanan yük de eklendiğinde; kol hareketlerini Euler açıları ile ölçen algoritma karmaşık ve hantal bir hal almıştır. Euler açıları yöntemine alternatif olarak kuaterniyon cebiri yöntemi denenmiş ve bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

4.2 Kuaterniyon Cebiri

Kuaterniyonlar karmaşık sayıların genişletilmiş hali olarak matematikte kullanılan sayı sistemleridir. Kuaterniyonlar, ilk olarak İrlandalı matematikçi Sir William Rowan Hamilton tarafından 1843 yılında tanımlanmış ve mekanik sistemlerle üç boyutlu uzay hesaplamalarına uygulanmıştır [38]. Bir kuaterniyonun gösterimi (4.11) ile verilmiştir.

$$Q = q_0 + \hat{i}q_1 + \hat{j}q_2 + \hat{k}q_3, \quad q_0, q_1, q_2, q_3 \in \mathfrak{R} \quad (4.11)$$

Kuaterniyon cebirinde kullanılan $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ sanal birimleri (4.12)'de verilen özelliklere sahiptir [39].

$$\begin{aligned} \hat{i}^2 = \hat{j}^2 = \hat{k}^2 &= -1 \\ \hat{i}.\hat{j} = \hat{k}, \quad \hat{j}.\hat{i} &= -\hat{k} \\ \hat{j}.\hat{k} = \hat{i}, \quad \hat{k}.\hat{j} &= -\hat{i} \\ \hat{k}.\hat{i} = \hat{j}, \quad \hat{i}.\hat{k} &= -\hat{j} \end{aligned} \quad (4.12)$$

(4.13)'de bir kuaterniyonun normu (4.14)'de bir kuaterniyonun tersi verilmiştir [39].

$$|Q| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 \quad (4.13)$$

$$Q^{-1} = (q_0 - \hat{i}q_1 - \hat{j}q_2 - \hat{k}q_3)/|Q| \quad (4.14)$$

Normu $|Q|=1$ olan kuaterniyonlara birim kuaterniyon adı verilir. Eğer bir kuaterniyon birim kuaterniyon değil ise (4.15) ile birim kuaterniyon olacak şekilde normalize edilebilir.

$$M = \sqrt{|Q|} = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}$$

$$Q = Q/M = (q_0 + \hat{i}q_1 + \hat{j}q_2 + \hat{k}q_3)/M \quad (4.15)$$

İki boyutlu karmaşık sayılarda olduğu gibi, kuaterniyonlarda da dört işlem uygulanabilmektedir. Q ve P bilinen iki kuaterniyon olmak üzere; (4.16) bu iki kuaterniyonun toplamını, (4.17) ise çarpımını göstermektedir [40].

$$Q = q_0 + \hat{i}q_1 + \hat{j}q_2 + \hat{k}q_3$$

$$P = p_0 + \hat{i}p_1 + \hat{j}p_2 + \hat{k}p_3$$

$$R = r_0 + \hat{i}r_1 + \hat{j}r_2 + \hat{k}r_3$$

Olmak üzere;

$$R = r_0 + \hat{i}r_1 + \hat{j}r_2 + \hat{k}r_3 = P + Q \quad \Rightarrow$$

$$r_0 = q_0 + p_0$$

$$r_1 = q_1 + p_1$$

$$r_2 = q_2 + p_2$$

$$r_3 = q_3 + p_3 \quad (4.16)$$

$$R = r_0 + \hat{i}r_1 + \hat{j}r_2 + \hat{k}r_3 = P \otimes Q \quad \Rightarrow$$

$$r_0 = q_0p_0 - q_1p_1 - q_2p_2 - q_3p_3$$

$$r_1 = q_0p_1 + q_1p_0 - q_2p_3 + q_3p_2$$

$$r_2 = q_0p_2 + q_1p_3 + q_2p_0 - q_3p_1$$

$$r_3 = q_0p_3 - q_1p_2 + q_2p_1 + q_3p_0 \quad (4.17)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada \otimes , kuaterniyon çarpım operatörüdür. İki birim kuaterniyonun çarpımı da sonuçta birim kuaterniyon vermektedir.

Kuaterniyonların üç sanal eksen ve bir reel kısımdan oluşması, bir çerçevenin eksenleri etrafındaki dönüşlerden gelen üç boyutlu yönelimleri tanımlayabilmek için yeterlidir. Kuaterniyonlarla tanımlanacak yönelim ifadelerinde de Euler açılarında olduğu gibi doğrusal olmayan sinüs ve kosinüs operatörleri kullanılır. Şekil 4.2’de verilen dönüşler kuaterniyonlar ile ifade edilecek olursa; (4.18) z -ekseni etrafında gerçekleşen γ radyanlık bir dönüşü, (4.19) y -ekseni etrafında gerçekleşen ϕ radyanlık bir dönüşü, (4.20) ise x -ekseni etrafında gerçekleşen ψ radyanlık dönüşü gösterir [41].

$${}^1_2Q_\gamma = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) & 0 & 0 & \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

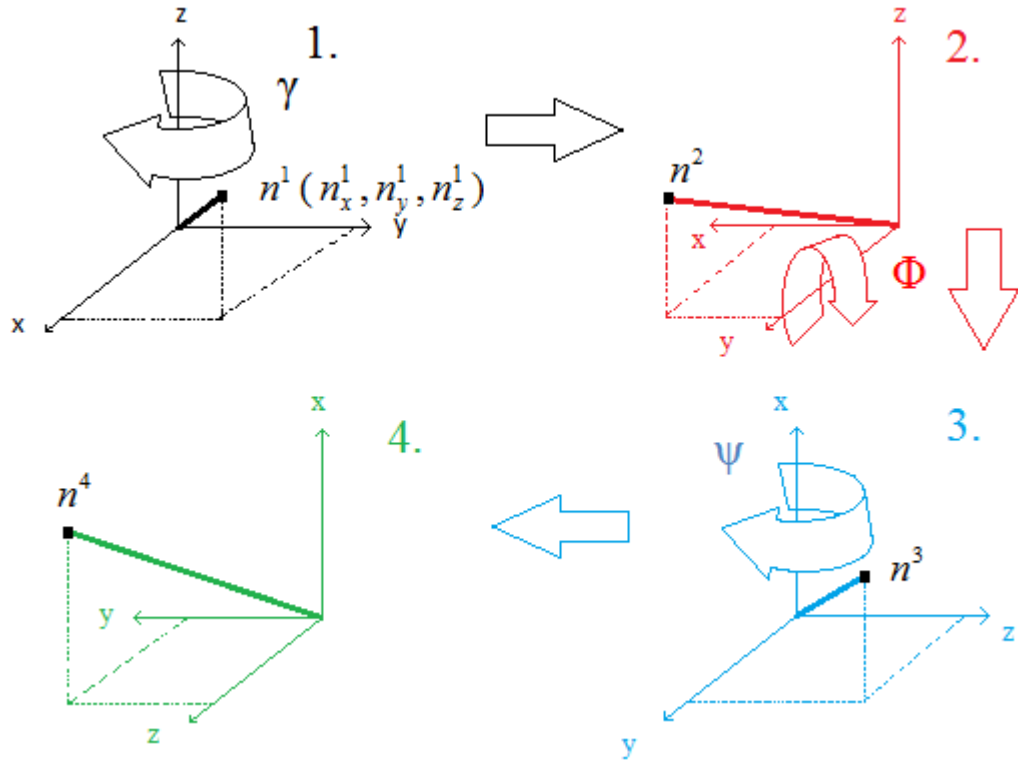
$${}^2_3Q_\phi = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$${}^3_4Q_\psi = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) & \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Şekil 4.2’de gösterilen dönüş sırası ile çerçevenin 1. ve 4. durumu kuaterniyon (4.21) ile verilmiştir.

$${}^1_4Q = {}^3_4Q_\psi \otimes {}^2_3Q_\phi \otimes {}^1_2Q_\gamma \quad (4.21)$$

Şekil 4.6’da gösterilen hareketler için ilk konum olan n^l noktasının 1. konumdan 2. konuma geçişini (4.22), 2. konumdan 3. konuma geçişini (4.23), 3. konumdan 4. konuma geçişini (4.24) vermektedir.



Şekil 4.6. Üç boyutlu bir noktanın düzlemlerle beraber hareketi

$$n^1 = (0, n_x^1, n_y^1, n_z^1)$$

Olmak üzere;

$$n^2 = {}^1_2Q_\gamma \otimes [0 \ n_x^1 \ n_y^1 \ n_z^1] \otimes {}^1_2Q_\gamma^{-1} \quad (4.22)$$

$$n^3 = {}^2_3Q_\phi \otimes [0 \ n_x^2 \ n_y^2 \ n_z^2] \otimes {}^2_3Q_\phi^{-1} \quad (4.23)$$

$$n^4 = {}^3_4Q_\psi \otimes [0 \ n_x^3 \ n_y^3 \ n_z^3] \otimes {}^3_4Q_\psi^{-1} \quad (4.24)$$

şeklinde hesaplanır.

Her dönüş için kuaterniyonlar bilindiğinde son noktanın hesaplanması (4.22), (4.23), (4.24) denklem takımı kullanılarak yapılabileceği gibi, (4.21)'de verilen eşitlik kullanılarak (4.25)'teki gibi de hesaplanabilir.

$$n^4 = {}_4^1 Q \otimes \begin{bmatrix} 0 & n_x^1 & n_y^1 & n_z^1 \end{bmatrix} \otimes {}_4^1 Q^{-1} \quad (4.25)$$

(4.26), bir kuaterniyonun katsayıları ile DKM oluşturulmasını gösterir [42].

$$Q = q_0 + \hat{i}q_1 + \hat{j}q_2 + \hat{k}q_3,$$

Birim kuaterniyon olmak üzere;

$$R = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

şeklinindedir. (4.25)'teki işlem kuaterniyon çarpımı yerine DKM kullanarak yapıldığı takdirde denklem (4.27) kullanılır.

$$\begin{bmatrix} n_x^4 \\ n_y^4 \\ n_z^4 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} n_x^1 \\ n_y^1 \\ n_z^1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

4.3 Ataletsel Ölçüm Birimlerinde Kullanılan Hareket Ölçümü Algoritması

Bu çalışmada merkez konumunun tespiti için Favre ve ark. [43] geliştirdiği, jiroskop ile ölçüm yapan ve ivmeölçer ile yapılan ölçümlerdeki hataları düşüren çalışma temel alınmıştır. Bahsi geçen çalışmada, vücuda sabitlenen algılayıcı¹¹ (VSA) adı verilen AÖB'ler yardımıyla, bir cismin referans koordinat çerçevesine göre hareketi ölçülmektedir.

İlk olarak, başlangıç kuaterniyonu ivmeölçer verileri kullanılarak (4.28), (4.29), (4.30) ile hesaplanır.

¹¹ ing: Body Fixed Sensor

$$\theta(0) = \arccos(-A_z(0)) \quad (4.28)$$

$$V(0) = \begin{bmatrix} -A_y(0) & A_x(0) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$q(0) = \left[\cos\left(\frac{\theta(0)}{2}\right), \sin\left(\frac{\theta(0)}{2}\right) \times \left[\frac{V(0)}{\|V(0)\|} \right] \right] \quad (4.30)$$

Burada;

$\theta(0)$: Başlangıçtaki düşeyden sapma açısı (rad)

$V(0)$: Başlangıç yönelim vektörü

$q(0)$: Başlangıç kuaterniyonu

$A_{x,y,z}(0)$: Bölüm 3.2’de elde edilen filtreli ivmeölçer değerleri (g)

ifadeleridir.

(4.29) ile bulunan $V(0)$ ’in üçüncü teriminin 0 olması başlangıç kuaterniyonunun son terimini de 0 yapmaktadır. Bu terimin 0 olması ilk anda $\{R\}$ çerçevesine göre $\{O\}$, $\{D\}$, $\{B\}$ çerçevelerinin z -eksenleri etrafında dönüşün olmadığı varsayımının yapıldığı anlamına gelir. Bu sebeple, sistem ölçüm alacağı zaman z -ekseni etrafında bilinen bir yönelim açısından başlatılmalıdır. x -ekseni ve y -ekseni etrafındaki yönelim açıları ise başlangıç kuaterniyonunda ilgili terimleri (ikinci ve üçüncü terimler) 0 olmadığı için ivmeölçerden gelen verilerle sorunsuz bir şekilde ölçülebilmektedir. Başlangıç kuaterniyonunun belirlenmesinin ardından gerçekleşen dönüşler (4.31), (4.32), (4.33) ile başlangıç kuaterniyonuna işlenir.

$$\Omega(i) = q(i-1) \otimes \left(\begin{bmatrix} 0 & \dot{\psi}(i) & \dot{\phi}(i) & \dot{\gamma}(i) \end{bmatrix} \times T \right) \otimes q(i-1)^{-1} \quad (4.31)$$

$$\Phi(i) = \left[1, \frac{[\Omega_2(i), \Omega_3(i), \Omega_4(i)]}{2} \right] \quad (4.32)$$

$$q(i) = \Phi(i) \otimes q(i-1) \quad (4.33)$$

Bu eşitliklerde;

- $\dot{\gamma}(i)$: z-ekseni etrafındaki dönüşü ölçen jiroskoptan alınan açısal hız, (rad/sn)
 $\dot{\phi}(i)$: y-ekseni etrafındaki dönüşü ölçen jiroskoptan alınan açısal hız, (rad/sn)
 $\dot{\psi}(i)$: x-ekseni etrafındaki dönüşü ölçen jiroskoptan alınan açısal hız, (rad/sn)
 T : örnekleme zamanı, (sn)
 $\Omega(i), \Phi(i)$: Ara işlem kuaterniyonları
 $q(i)$: Jiroskoplardan elde edilen yönelim açıları ölçüm kuaterniyon

değişkenlerini göstermektedir.

Bu algoritmada örnekleme zamanı 0.005 sn gibi çok kısa bir zaman aralığı olarak seçilmiştir. Örnekleme zamanının bu denli kısa olmasından dolayı, bu süreler içerisinde gerçekleşen açı değişimleri çok küçük olmaktadır. Bu nedenle (4.34)'teki yöntemle sistem doğrusallaştırmıştır.

$$|\theta| < \frac{\pi}{10} \quad \Rightarrow \quad \sin(\theta) \cong \theta \quad (4.34)$$

Sistem bu haliyle ölçüm alabilir özelliktedir, ancak jiroskoplardaki kaçıklık nedeniyle ölçümlerde hatalar bulunur. Bu hataları düzeltmek için sisteme ivmeölçer verileri eklendiği ve sistemin doğruluğunun (4.35), (4.36), (4.37) ile artırıldığı belirtilmiştir.

$$\lambda(i) = q(i) \otimes \begin{bmatrix} 0 & A_x(i) & A_y(i) & A_z(i) \end{bmatrix} \otimes q(i)^{-1} \quad (4.35)$$

$$\Psi(i) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\lambda_3(i)}{2} & \frac{-\lambda_2(i)}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$q(i)^* = \Psi(i) \otimes q(i) \quad (4.37)$$

Burada;

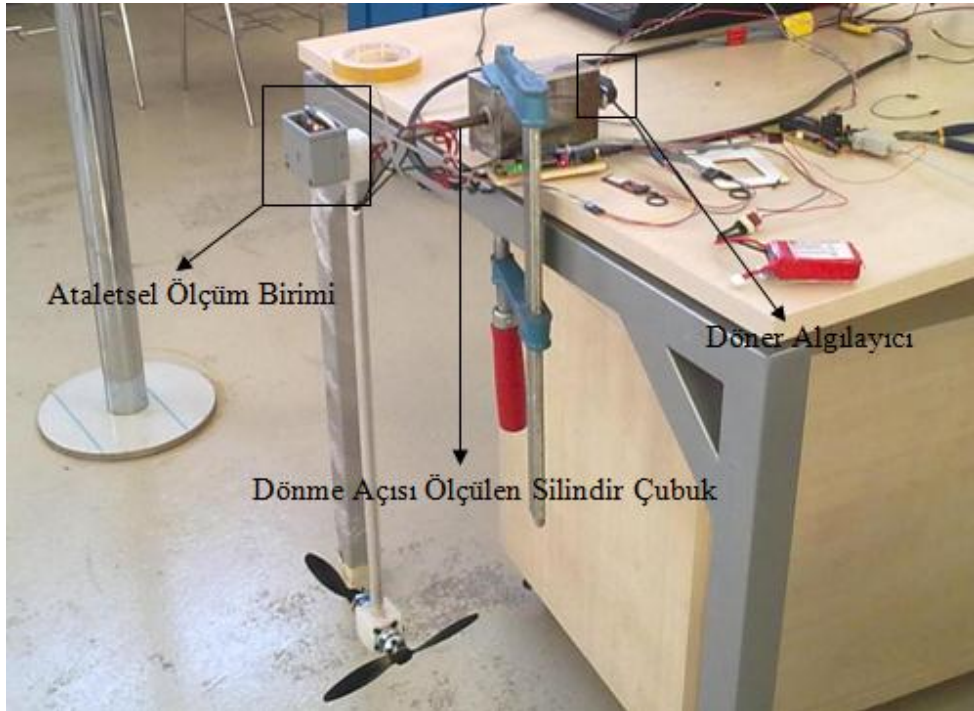
$\lambda(i), \Psi(i)$: Ara işlem kuaterniyonları

$q(i)^*$: İvmeölçerle doğruluğu artırılmış yönelim açıları ölçüm kuaterniyonu

ifadeleridir.

Başlangıç kuaterniyonu birim kuaterniyon olsa da, zaman içerisinde ölçüm kuaterniyonu olan $q(i)^*$ 'nin normu 1'in üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle bulunan her $q(i)^*$ kuaterniyonu döngü sonunda (4.15) ile normalize edilmektedir. Algoritmanın AÖB'lerde kullanılan yazılımı EK 7'de verilmiştir.

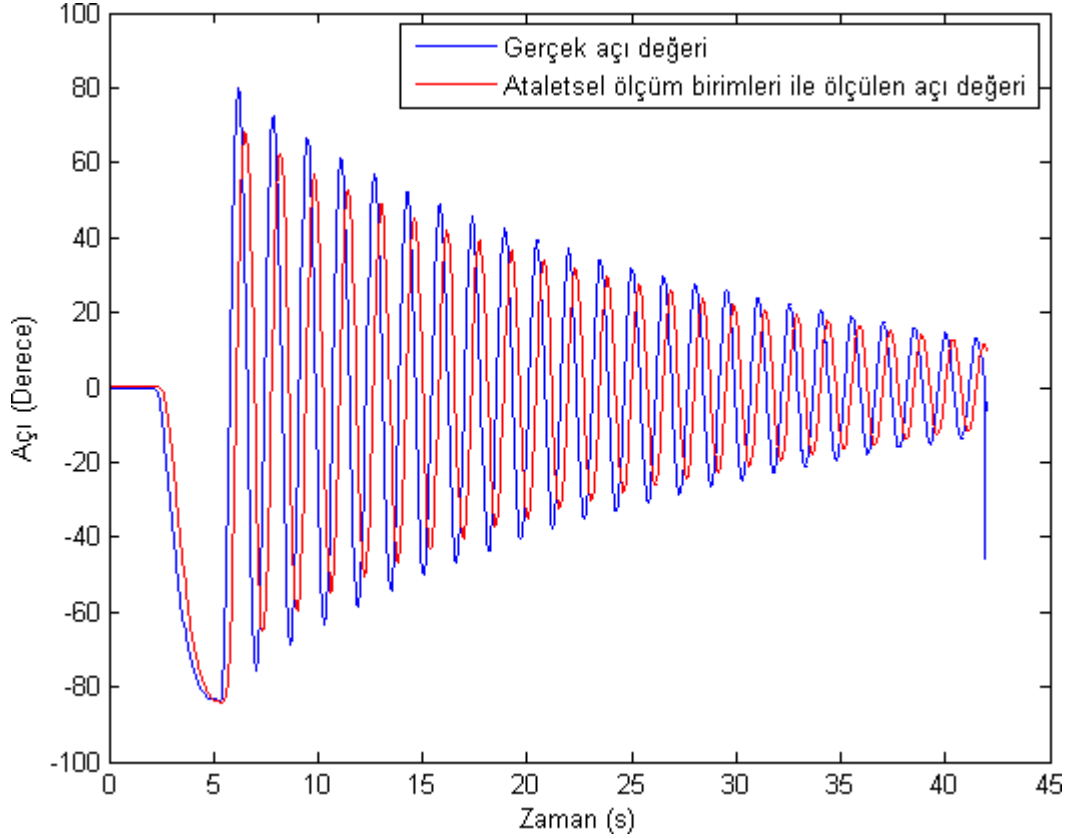
Bu algoritmayla herhangi bir nesnenin üç boyutlu uzaydaki yönelimi ölçülebilmektedir. Ölçüm algoritmasının doğruluğunu test etmek için [44]'de tarif edilen sarkaç üzerinde Şekil 4.7'de olduğu gibi bir test düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. Sarkaçlı AÖB test düzeneği

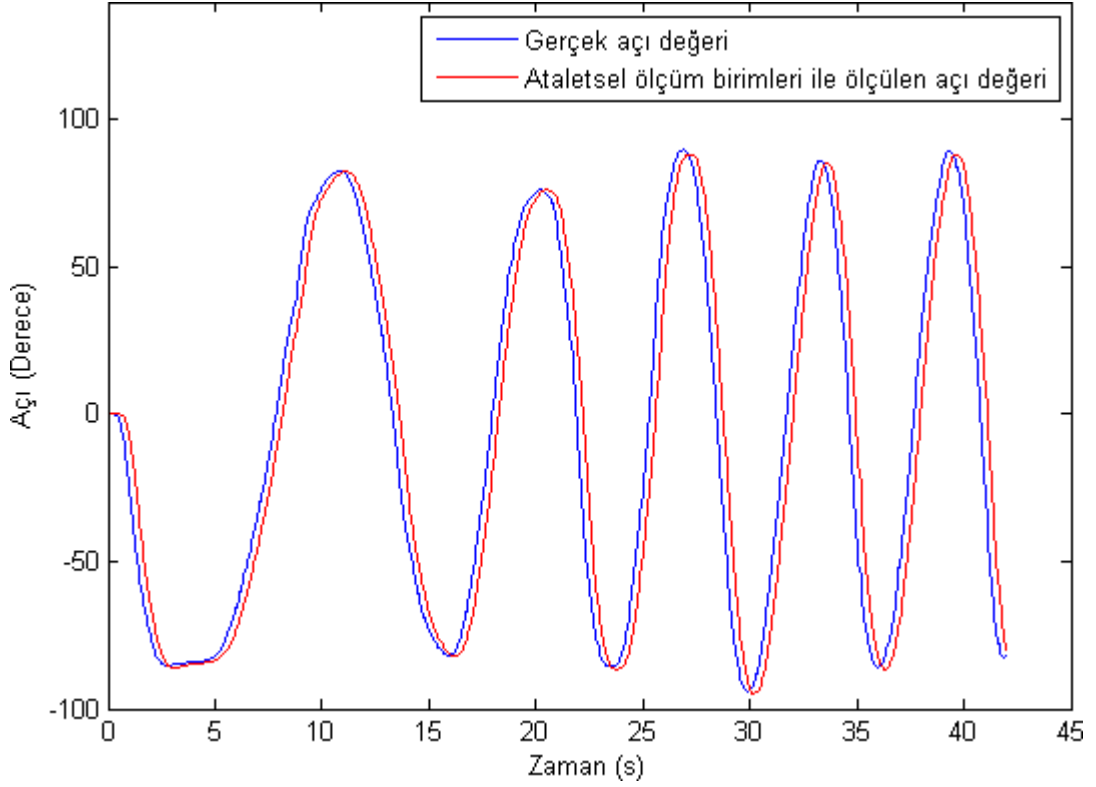
Robotun kullanıldığı test düzeneğinde ikişer derecelik adımlar halinde açı incelemesi yapılmışken bu düzenekte 0.08° değerine kadar olan ara değerler de algılanmıştır. Şekil 4.8 -83° den serbest bırakılan sarkaç düzeneğinin döner algılayıcı ve AÖB ile

gerçek zamanlı elde edilen açı değerlerini göstermektedir. Yapılan testte döner algılayıcıdan gelen verilerin sarkacın gerçek açı değerini verdiği kabulü yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 4.8. Serbest salınan sarkacın açı ölçümleri

Yukarıdaki grafikte AÖB ile ölçülen açı değerleri ile gerçek açı değerleri arasında faz ve genlik farkı olduğu görülmektedir. Bu durum ivmeölçerlerde uygulanan Butterworth alçak geçiren filtresinin karakteristiği ile ilgilidir. İnsan kolunun şekildeki kadar hızlı hareket etmeyecek olması sebebiyle kesme frekansının düşürülmesine gerek görülmemiştir. Şekil 4.9 aynı sistemde ölçülen kontrollü ve daha yavaş hareketlerin AÖB ve döner algılayıcı ile ölçümünü göstermektedir.

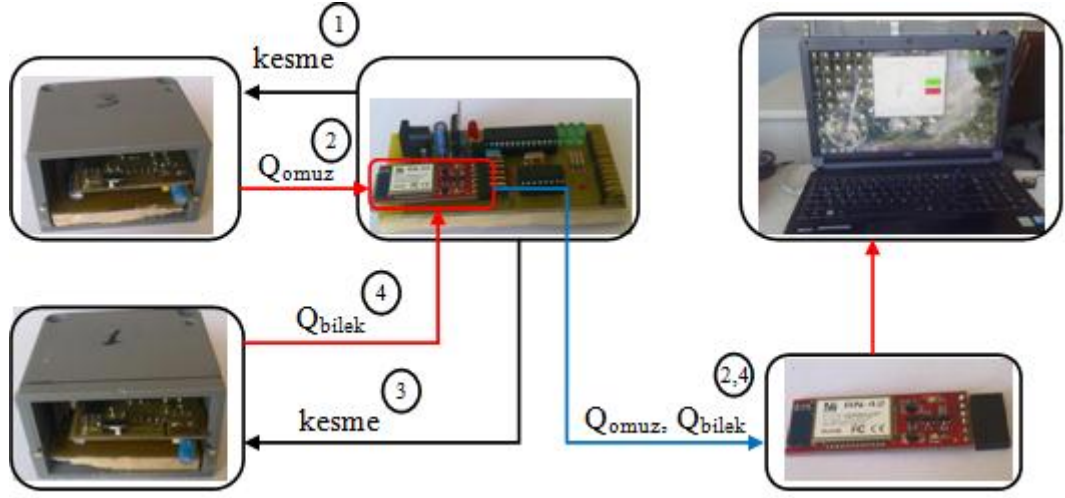


Şekil 4.9. Kontrollü sarkacın açı ölçümleri

Burada sarkaca serbest düşme hareketine göre periyodu daha büyük olan kontrollü hareketler uygulanmıştır. Bir önceki grafiğe göre genlik hatası kaybolmuş ancak faz kaymasının devam ettiği görülmüştür. Zaman gecikmesinin oldukça küçük olması (0.3 s) ve insan kolunun sert açı geçişlerini çok sık olarak yapmaması sebebiyle sistem bu haliyle kullanılmış ve insan kolu hareketleri bu algoritmayla ölçülmüştür.

4.4 İnsan Kolu Hareketinin Ölçülmesi

Ölçüm sisteminin insan kolu üzerine yerleşimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Sistem donanımında, Bölüm 3.4’te anlatılan AÖB’lerin yanısıra, 11.1 volt gerilim değerine sahip bir Li-Po batarya ve özel tasarlanmış Atmel mikrodenetleyici tabanlı bir anakart bulunmaktadır. Anakart, bataryadan elde edilen gerilimi filtreleyerek AÖB’lere dağıtmaktan ve AÖB’lerle bilgisayar arasındaki veri akışını sağlamaktan sorumludur. Anakartın detaylı devre şeması EK 5’de, yazılımı EK 8’de; ölçüm sistemi donanımının veri akış şeması Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. İnsan kolu hareket ölçüm sistemi veri akış şeması

AÖB'ler 0.005 saniye örnekleme zamanı ile yönelim bilgisi içeren kuaterniyonları üretmektedir. Kuaterniyonlar, anakartın tetiklemesi ile AÖB'lerden anakart üzerinde bulunan bluetooth cihazına, bluetooth cihazından da RS232 iletişim protokolü ile kablosuz olarak her 0.04 saniyede bilgisayara iletilmektedir. Böylece insan kolu hareketlerinin bilgisayar üzerinde 25 saniye başına fotoğraf¹² hızında gösterilmesi sağlanmıştır.

Kuaterniyonların bilgisayar ortamına alınmasının ardından bilek konumunun tespiti (4.38)-(4.40) işlemleri yapılarak elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 0 & P_d^x & P_d^y & P_d^z \end{bmatrix} = Q_{omuz} \otimes [0 \ 0 \ 0 \ u_2] \otimes Q_{omuz}^{-1} \quad (4.38)$$

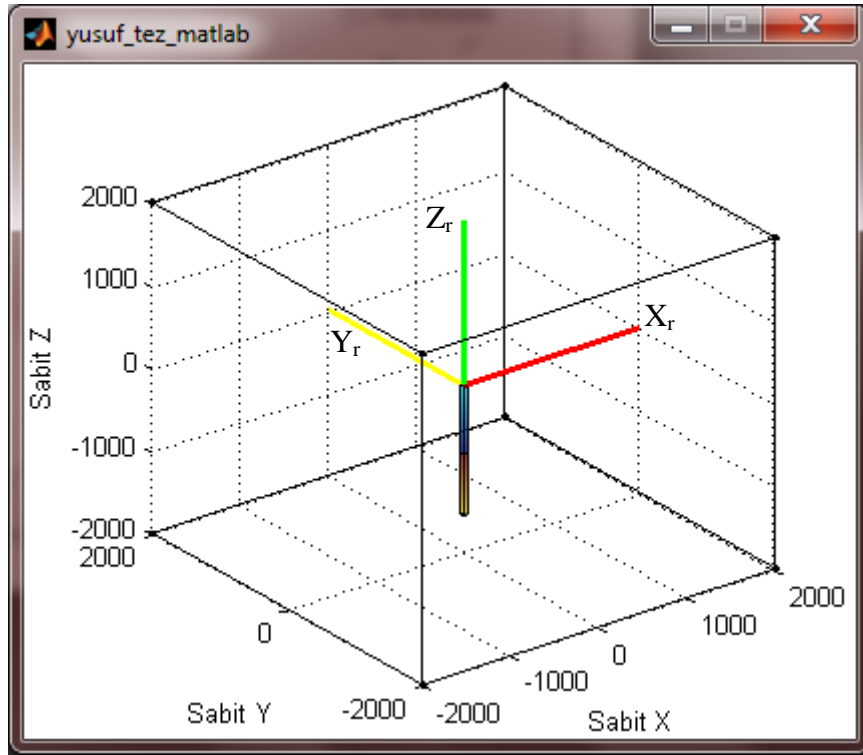
$$\begin{bmatrix} 0 & \overline{P_b^x} & \overline{P_b^y} & \overline{P_b^z} \end{bmatrix} = Q_{bilek} \otimes [0 \ 0 \ 0 \ u_3] \otimes Q_{bilek}^{-1} \quad (4.39)$$

$$\begin{bmatrix} P_b^x & P_b^y & P_b^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P_b^x} & \overline{P_b^y} & \overline{P_b^z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_d^x & P_d^y & P_d^z \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Burada u_2 üst kol uzunluğu, u_3 önkol uzunluğudur.

¹² ing: frame per second

Bilgisayar ekranında insan kolu hareketlerinin taklidi için, sahte kodu Çizelge 4.1’de, grafiksel kullanıcı arayüzü Şekil 4.11’de verilen program MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Burada insan kolu iki parça halinde çizdirilmiş; üst kol mavi, önkol ise sarı renkli çubuklarla gösterilmiştir. Kol üzerindeki Z_o , Z_d eksenleri etrafındaki dönüşlerin gözle daha rahat ayırt edilebilmesi için dikdörtgen kesitli çubuklar tercih edilmiştir. Şekil 4.12, bazı hareketlerin bu program ile taklit edilmesini göstermektedir.



Şekil 4.11. İnsan kolu hareketlerini taklit eden programın arayüzü

Çizelge 4.1. İnsan kolu hareketlerini taklit eden programın sahte kodu

Önkol ve üst kol için 8 adet başlangıç köşe noktası belirle
 Üst kolun bitişindeki 4 noktanın x, y, z'deki koordinatlarının her birinin
 aritmetik ortalamasını al $\Gamma = [a \ b \ c]$
 Önkolün 8 köşesini x, y, z'de $\Gamma = [a \ b \ c]$ kadar ötele
 Üst kol ve önkolün 8 köşesinin 3 boyutlu gösterimde içlerini doldur

while (dışarıdan dur komutu gelmemiş ise) **do**

Ataletsel ölçüm birimlerinden gelen verileri oku

Üst koldan gelen veriler ile üst kolun yeni 8 noktasını tespit et

Üst kolun bitişindeki 4 noktanın x, y, z'deki koordinatlarının her

birinin aritmetik ortalamasını al $\Gamma = [a \ b \ c]$

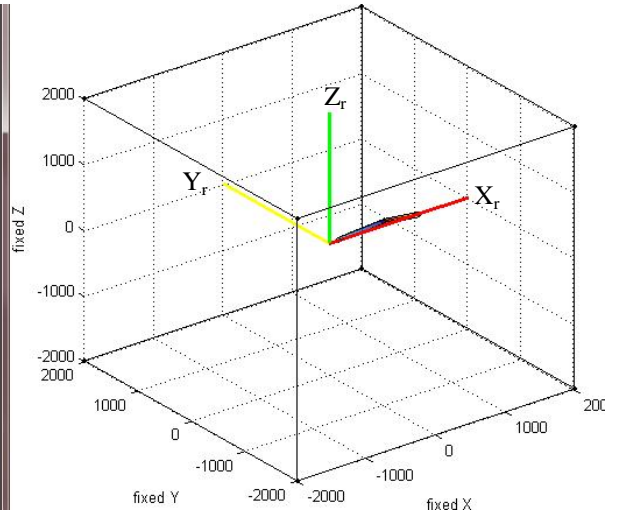
Önkoldan gelen veriler ile önkolun yeni 8 noktasını tespit et

Önkolun 8 köşesinin x, y, z'de $\Gamma = [a \ b \ c]$ kadar ötele

Önceki gösterimi sil

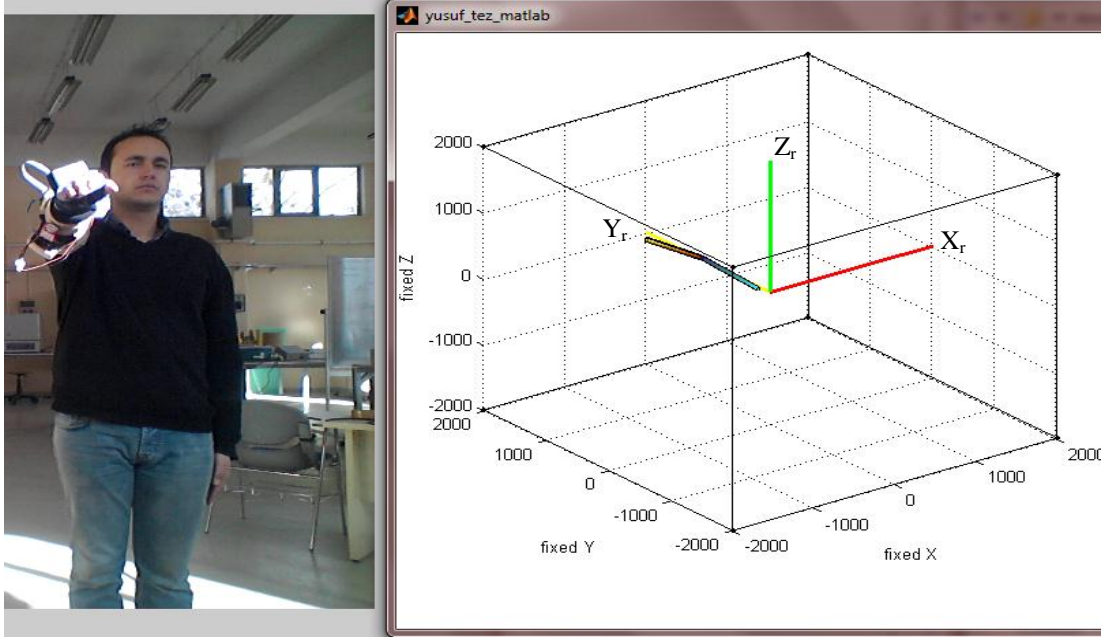
Üst kol ve önkolun 8 köşesinin 3 boyutlu gösterimde içlerini doldur

end while

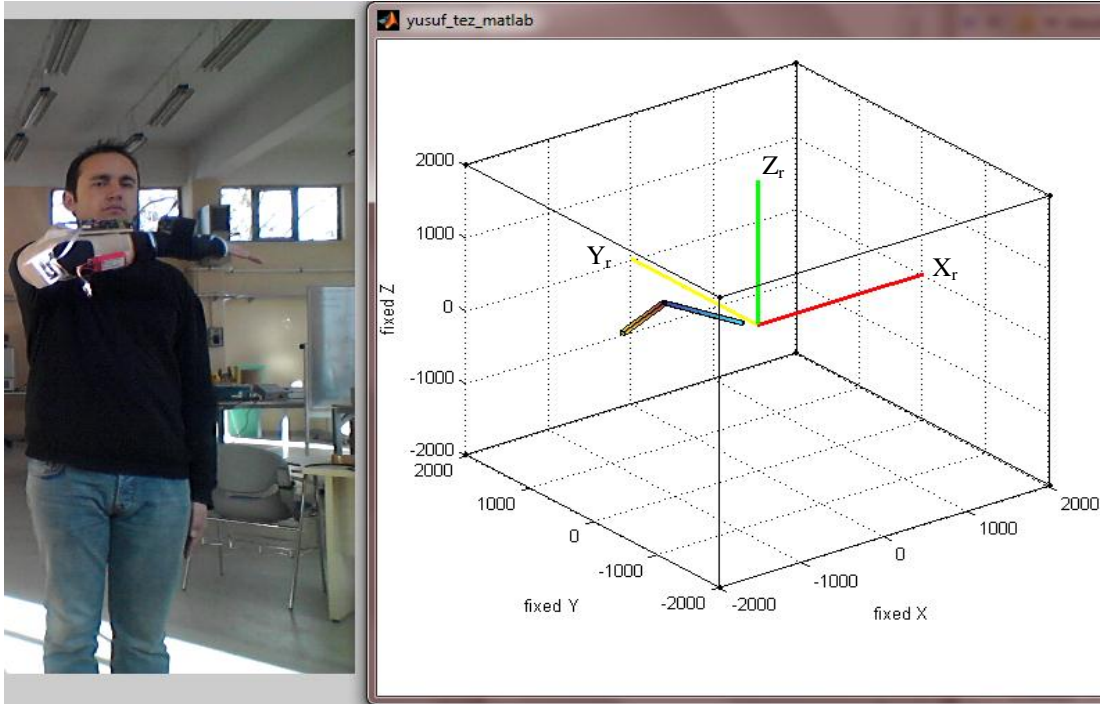


(a) Kolu yana açma hareketi¹³

¹³ ing: Abduction



(b) Kolu ileri açma hareketi¹⁴



(c) Dirsek kırma hareketi

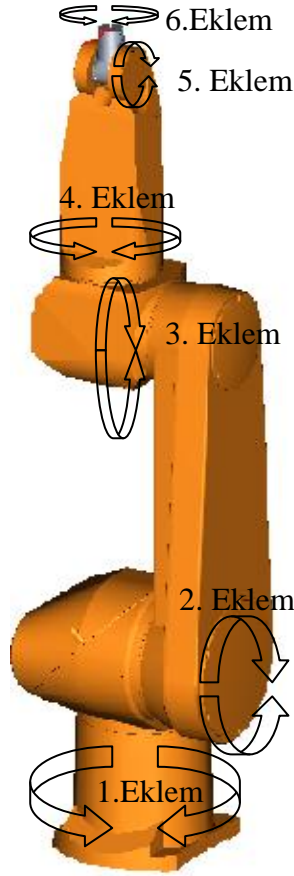
Şekil 4.12. Hareket eden insan kolunun bilgisayar programı ile takliti

¹⁴ ing: Extension

Şekil 4.12 ile birkaç karesi verilen videonun tamamı EK 12’de verilmiştir. Geliştirilen ölçüm sistemi ile; $\{O\}$, $\{D\}$ ve $\{B\}$ çerçevelerinin z-ekseni etrafındaki başlangıç yönelimlerinin bilindiği bir durumdan başlanması şartıyla, insan kolunun konumu ve yönelimi ölçülebilmekte ve eşzamanlı olarak bilgisayar ekranında taklit edilmektedir. Sonraki aşama, insan kolundan elde edilen verilerin işlenerek gerekli açı değerlerinin robot koluna aktarılmasıdır. Bir sonraki bölüm robot kolu üzerinde yapılan çalışmaları detaylı olarak anlatmaktadır.

5. STÄUBLİ RX160 ROBOT KOL

Bu çalışmada uydu sistemi olarak Stäubli Rx160 kullanılmıştır. Altı dönel eklemlili bir endüstriyel robot kol olan Rx160'ın nominal yük taşıma kapasitesi 20 kg, tekrarlanabilirliği 0,05 mm ve çalışma uzayı yarıçapı 1710 mm'dir. Yere veya tavana monte edilebilen robot, bu çalışmada yere monte edilmiştir. Stäubli Rx160'ın eklemleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Staubli Rx160 robot kolun eklemleri

Robotun hareket esnasında kendi gövdesine çarpmasını engellemek amacıyla her eklem için hareket limitleri üretici tarafından yazılımsal olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Stäubli Rx160 robot kol eklemlerinin hareket limitleri

	1. Eklem	2. Eklem	3. Eklem	4. Eklem	5. Eklem	6. Eklem
Asgari sınır açısı	-160°	-137.5°	-150°	-270°	-105°	-270°
Azami sınır açısı	160°	137.5°	150°	270°	120°	270°

Robot, Windriver VxWorks gerçek-zamanlı işletim sistemini kullanan Stäubli CS8C kontrol bilgisayarı (Şekil 5.2a) ile kontrol edilmektedir. Elle kontrol ve öğretim işlemleri kontrol bilgisayarına bağlanan kumanda paneli (Şekil 5.2b) yardımıyla yapılabileceği gibi, karmaşık robot hareketlerinin programlanması için C benzeri bir dil olan Val3 kullanılmaktadır. Stäubli CS8C ile veri alışverişi RS232, RS485 ve Ethernet modbus iletişim protokollerinin herhangi biri ile yapılabilmektedir.



a) Stäubli CS8C

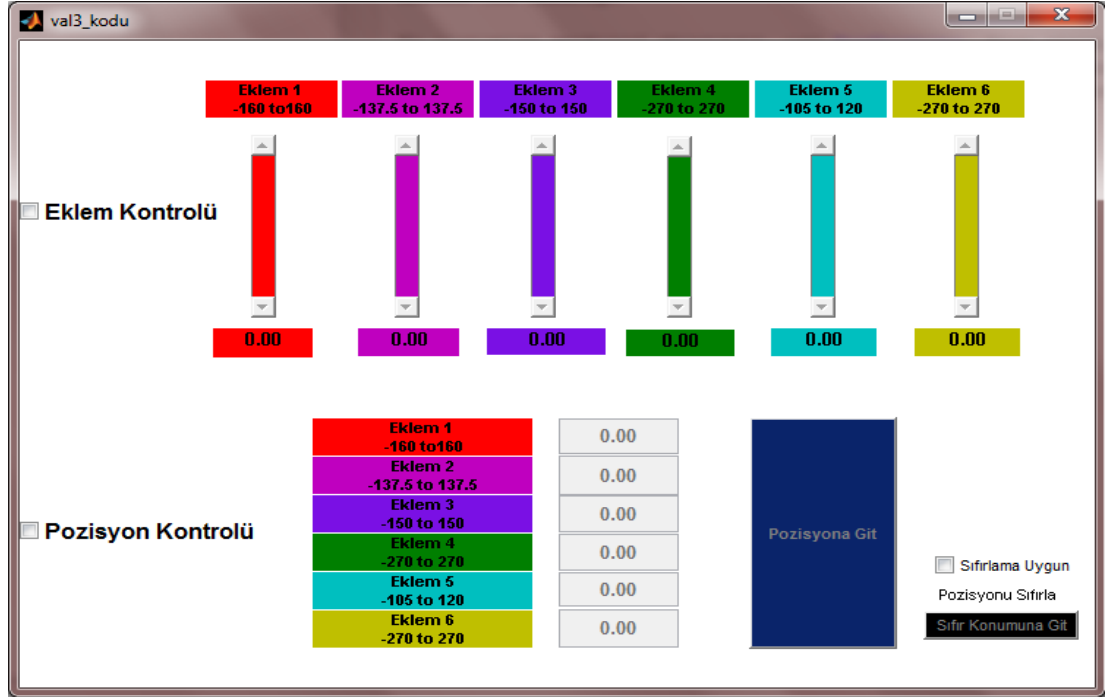


b) Kontrol paneli

Şekil 5.2. CS8C kontrolcüsü ve elle kontrol paneli

Bu çalışmada, uç işlevci için hedeflenen konum ve yönelimin robota uzaktan iletilmesi gerekmektedir. Uzaktan kontrol için bilgisayar ve robot kol arasında bir

iletişim protokolü oluşturulmuş ve test edilmiştir. Bu kapsamda, robotun dışarıdan gelen komutlar doğrultusunda konumlandırılması için robot kontrolcüsü üzerinde bir Val3 programı yazılmıştır. Bu program ayrı bir bilgisayarda koşan MATLAB programından gönderilen eklem açılarını RS232 iletişim protokolü üzerinden okumaktadır. Kullanıcı arayüzü Şekil 5.3'te verilen MATLAB programı ile robot kolun eklem açıları tek tek ayarlanabilmektedir. Güvenlik önlemi olarak Stäubli Rx160'ın eklem hareket limitleri burada da tanımlanmış ve gönderilen açı değerlerinin bu aralığın dışında olmasının önüne geçilmiştir. Bahsedilen Val3 yazılımı EK 11'de MATLAB kodları EK 10'da bulunabilir.



Şekil 5.3. Stäubli Rx160 robot kolu için geliştirilen program arayüzü

Takip eden bölümlerde Stäubli Rx160'ın düz ve ters kinematik analizleri detaylandırılmıştır. Robot hakkında detaylı bilgi EK 3'de verilmiştir.

5.1 Stäubli Rx160 Robot Kolun Düz Kinematik Çözümü

Kinematik, nesnelerin üç-boyutlu uzaydaki hareketlerini, hareketi sağlayan kuvvetlerden bağımsız olarak tanımlayan tekniktir [45]. Düz kinematik, robotun uç işlevcisine (maşasına) yerleştirilmiş bir çerçevenin herhangi bir referans çerçeveye göre konumunu ve yönelimini eklem değişkenleri cinsinden ifade eder. Düz kinematik denklemlerinin oluşturulabilmesi için öncelikle robotun bağlarının ve eklem eksenlerinin tanımlanması, ardından bağların her birine bir çerçeve atanması gerekir. Bu işlemler için, detayları [46]'da verilen aşağıdaki prosedür kullanılmıştır.

1. Robotun sabit gövdesinden başlayarak bağları sırasıyla *Bağ 0*'dan *Bağ 6*'ya kadar numaralandır.
2. Eklemlerin dönme eksenlerini sırasıyla *Eksen 1*'den *Eksen 6*'ya kadar numaralandır. (Burada *Eksen i*, *Bağ i*'nin *Bağ i-1*'e göre dönme hareketi yaptığı eksenini ifade eder.)
3. *Bağ 1*'den *Bağ 5*'e kadarki bağlara çerçeve ata.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* arasında tek bir ortak dik varsa, *Bağ i*'nin çerçevesinin merkezini ortak dikin *Eksen i*'yi kestiği noktaya yerleştir.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* kesişiyorsa, *Bağ i*'nin çerçevesinin merkezini kesişme noktasına yerleştir.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* paralelse, *Bağ i*'nin çerçevesinin merkezini *Eksen i* üzerinde herhangi bir noktaya yerleştir.
 - Z_i eksenini *Eksen i* boyunca ata.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* arasında tek bir ortak dik varsa, X_i eksenini *Eksen i*'den *Eksen i+1*'e doğru ortak dik boyunca ata.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* kesişiyorsa, X_i eksenini *Eksen i* ve *Eksen i+1*'in bulunduğu düzleme dik olacak şekilde ata.
 - *Eksen i* ve *Eksen i+1* paralelse, X_i eksenini *Eksen i*'den *Eksen i+1*'e doğru ata.
 - Y_i eksenini sağ el kuralına göre ata.
4. *Bağ 6*'ya çerçeve ata.

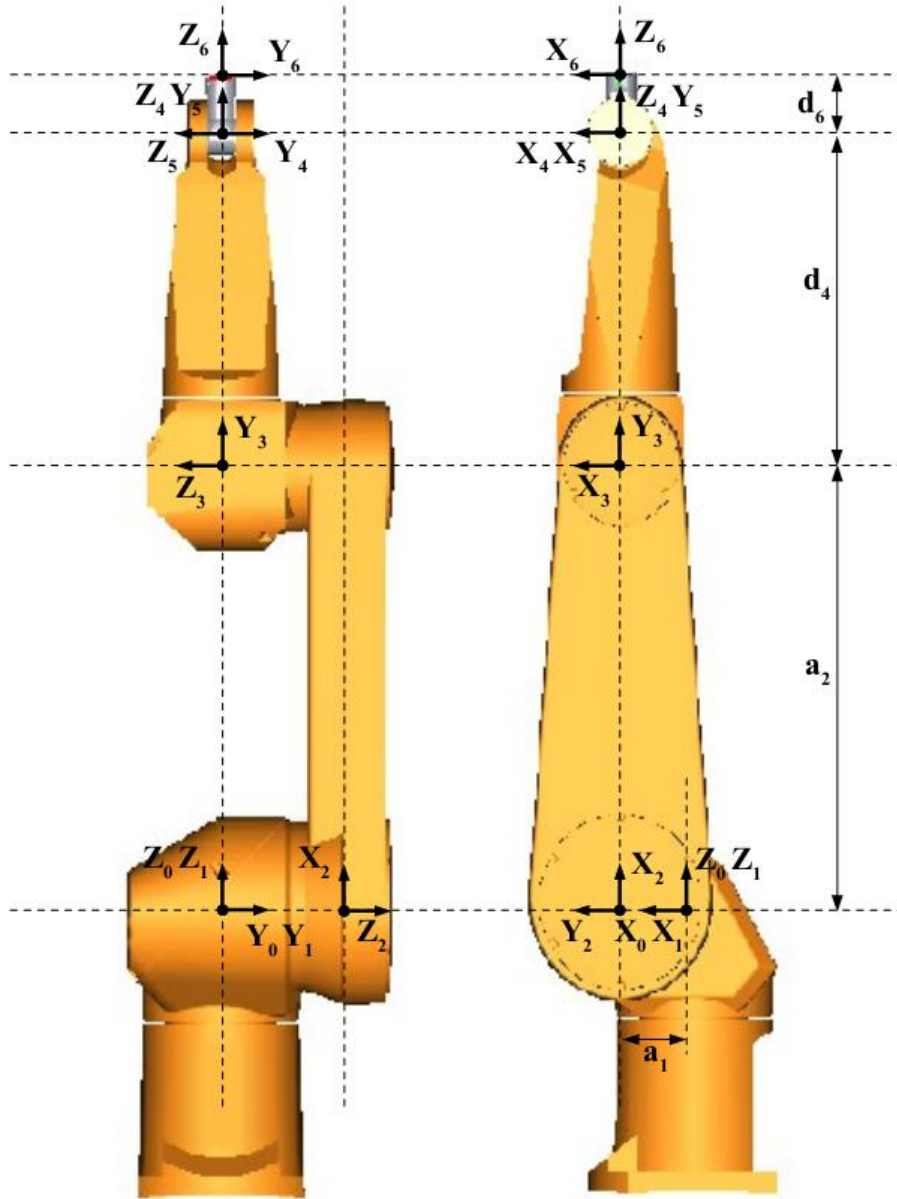
- Z_6 eksenini *Eksen 6* boyunca ata.
 - X_6 eksenini sıfır konumunda X_5 eksenine paralel olacak şekilde ata.
 - Y_6 eksenini sağ el kuralına göre ata.
5. Sabit referans çerçeve olarak kullanılacak *Bağ 0*'in çerçevesini sıfır konumundayken *Bağ 1*'in çerçevesine çakışık olacak şekilde ata.

Şekil 5.4 Stäubli Rx160 robot kolun bağlarına atanmış çerçeveleri göstermektedir. Robotun bağlarına çerçeveler atandıktan sonra, her bağ için aşağıda listelenen dört adet parametre tanımlanır. Bunlara Denavit-Hartenberg (DH) parametreleri adı verilir. Dönel hareket yapan bir bağın eklem açısı (θ) hariç diğer parametreleri sabittir. Stäubli Rx160 için DH parametreleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

- Bağ uzunluğu = $a_i = Z_i$ 'den Z_{i+1} 'e kadar X_i doğrultusundaki mesafe
 Eksen açısı = $\alpha_i = Z_i$ 'den Z_{i+1} 'e kadar X_i etrafındaki dönme açısı
 Bağ ofseti = $d_i = X_{i-1}$ 'den X_i 'ye kadar Z_i doğrultusundaki mesafe
 Eklem açısı = $\theta_i = X_{i-1}$ 'den X_i 'ye kadar Z_i etrafındaki dönme açısı

Çizelge 5.2. Stäubli Rx160 robot kol için Denavit-Hartenberg parametreleri

i	γ_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90	$a_1 = 150$ mm	0	θ_2
3	0	$a_2 = 825$ mm	0	θ_3
4	-90	0	$d_4 = 625$ mm	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	$d_6 = 110$ mm	θ_6



Şekil 5.4. Stäubli Rx160 Robot kolun bağ çerçeveleri

Birbirini takip eden iki çerçeve arasındaki dönüşüm matrisinin genel formu DH parametreleri cinsinden (5.1)'de verilmiştir. Bu matris kullanılarak, sol-alt indisteki i çerçevesine göre tanımlı bir konum ve yönelim sol-üst indisteki $i-1$ çerçevesine göre tanımlanabilir.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos a_{i-1} & \cos \theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -d_i \sin a_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin a_{i-1} & \cos \theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & a_2 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ -\sin(\theta_6) & -\cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Stäubli Rx160'nin birbirini takip eden bağ çerçeveleri arasındaki dönüşüm matrisleri (5.2)'de gösterilmiştir. Bu matrisler çarpılarak robotun maşasına (*Bağ 6*) atanmış

çerçevenin konumu ve yönelimi sabit referans (*Bağ 0*) çerçeveye göre tanımlanabilir. Bu işlemler bir sonraki bölümdeki ters kinematik hesaplarında da kullanılacağından (5.3)-(5.10) denklemleriyle adım adım açıklanmıştır. Okuma kolaylığı açısından trigonometrik fonksiyonlar (5.3)'teki gibi kısaltılmış ve gerekli yerlerde ifadeler toplam fark formülleri ile sadeleştirilmiştir.

$$c_i = \cos \theta_i$$

$$s_i = \sin \theta_i$$

$$c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j) = \cos \theta_i \cos \theta_j - \sin \theta_i \sin \theta_j$$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j) = \cos \theta_i \sin \theta_j + \sin \theta_i \cos \theta_j \quad (5.3)$$

$${}^4_6T = {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} c_5 c_6 & -c_5 s_6 & -s_5 & -d_6 s_5 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & c_5 & d_6 c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$${}^3_6T = {}^3_4T {}^4_6T = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & -c_4 s_5 & -d_6 c_4 s_5 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & c_5 & d_4 + d_6 c_5 \\ -s_4 c_5 c_6 - c_4 s_6 & s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6 & s_4 s_5 & d_6 s_4 s_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$${}^1_3T = {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} c_2 c_3 - s_2 s_3 & -c_2 s_3 - s_2 c_3 & 0 & a_1 + a_2 c_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -c_2 s_3 - s_2 c_3 & s_2 s_3 - c_2 c_3 & 0 & -a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{23} & s_{23} & 0 & a_1 + a_2 c_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 & -a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Buradan;

$${}^1T_6 = {}^1T_3 {}^3T_6 = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$${}^1r_{11} = c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6,$$

$${}^1r_{21} = -s_4c_5c_6 - c_4s_6,$$

$${}^1r_{31} = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_{23}s_5c_6,$$

$${}^1r_{12} = -c_{23}(c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6,$$

$${}^1r_{22} = s_4c_5s_6 - c_4c_6,$$

$${}^1r_{32} = s_{23}(c_4c_5s_6 - s_4c_6) + c_{23}s_5s_6,$$

$${}^1r_{13} = -c_{23}c_4s_5 - s_{23}c_5,$$

$${}^1r_{23} = s_4s_5,$$

$${}^1r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5,$$

$${}^1p_x = a_1 + a_2c_2 - d_4s_{23} - d_6(s_{23}c_5 + c_{23}c_4s_5),$$

$${}^1p_y = d_6s_4s_5,$$

$${}^1p_z = -a_2s_2 - d_4c_{23} - d_6(c_{23}c_5 - s_{23}c_4s_5) \quad (5.8)$$

denklemleri bulunur. Maşa çerçevesinin *Bağ 1* çerçevesine göre konumu ${}^1p_{x,y,z}$ yönelimi de ${}^1r_{1-3,1-3}$ değişkenleri ile ifade edilmektedir. (5.7)'deki matrisin *Bağ 0* ve *Bağ 1* arasındaki dönüşüm matrisiyle (5.9)'daki gibi çarpılması sonucunda, maşa çerçevesini sabit referans çerçeveye göre tanımlayan dönüşüm matrisinin elemanları (5.10)'da verilmiştir.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1 [c_{23}(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] + s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6), \\ r_{21} &= s_1 [c_{23}(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] - c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6), \\ r_{31} &= -s_{23}(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_{23} s_5 c_6, \\ r_{12} &= c_1 [c_{23}(-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] + s_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6), \\ r_{22} &= s_1 [c_{23}(-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] - c_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6), \\ r_{32} &= s_{23}(c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) + c_{23} s_5 s_6, \\ r_{13} &= -c_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) - s_1 s_4 s_5, \\ r_{23} &= -s_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) + c_1 s_4 s_5, \\ r_{33} &= s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5, \\ p_x &= c_1 [a_1 + a_2 c_2 - d_4 s_{23} - d_6 (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5)] - d_6 s_1 s_4 s_5, \\ p_y &= s_1 [a_1 + a_2 c_2 - d_4 s_{23} - d_6 (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5)] + d_6 s_1 s_4 s_5, \\ p_z &= -a_2 s_2 - d_4 c_{23} - d_6 (c_{23} c_5 - s_{23} c_4 s_5) \end{aligned} \quad (5.10)$$

5.2 Stäubli Rx160 Robot Kolun Ters Kinematik Çözümü

Ters kinematik, robotun uç işlevcisine atanmış bir çerçevenin, sabit referans çerçeveye göre istenilen konum ve yönelimine karşılık gelen eklem değişkenlerinin hesaplanmasıdır. Her robot için farklı olan ters kinematiğin çözülmesi için öncelikle düz kinematik çözümü gerekmektedir. Ancak, ters kinematiğin analitik çözümünde düz kinematikteki gibi bir standart sistematik bulunmamaktadır. Literatür araştırmasında Stäubli Rx160'ın ters kinematiğinin analitik çözümüne rastlanmadığı için, yapılan çözüm bu bölümün devamında detaylı olarak anlatılmıştır.

Denklem (5.11), Stäubli Rx160'ın maşasına (Bağ 6) atanmış çerçevenin konumu ve yönelimini sabit referans (Bağ 0) çerçeveye göre tanımlayan ve birbirini takip eden bağ çerçeveleri arasındaki dönüşümlerin çarpımından oluşan dönüşüm matrisini göstermektedir. Matris elemanlarının $(r_{1-3,1-3}, p_{x,y,z})$ açık hali (5.10)'da verilmiştir. Burada, bilinen $p_{x,y,z}$ ve $r_{1-3,1-3}$ değerlerine karşılık gelen eklem açıları θ_{1-6} bulunacaktır.

$${}^0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = {}^0T(\theta_1) {}^1T(\theta_2) {}^2T(\theta_3) {}^3T(\theta_4) {}^4T(\theta_5) {}^5T(\theta_6)$$
$${}^0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

(5.11) ile verilen eşitliğin her iki tarafı (5.2)'de bulunan ${}^0T(\theta_1)$ 'in tersiyle çarpıldığında (5.12) eşitliği sağlanır. Bu eşitliğin sağ tarafındaki matrisin elemanları (5.8)'de verilmiştir.

$$[{}^0T(\theta_1)]^{-1} {}^0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = {}^1T(\theta_2) {}^2T(\theta_3) {}^3T(\theta_4) {}^4T(\theta_5) {}^5T(\theta_6)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} c_1r_{11} + s_1r_{21} & c_1r_{12} + s_1r_{22} & c_1r_{13} + s_1r_{23} & c_1p_x + s_1p_y \\ c_1r_{21} - s_1r_{11} & c_1r_{22} - s_1r_{12} & c_1r_{23} - s_1r_{13} & c_1p_y - s_1p_x \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

(5.12)'deki (2,3) ve (2,4) elemanlarının eşitliği sırasıyla (5.13) ve (5.14) ifadelerini verir.

$$c_1r_{23} - s_1r_{13} = s_4s_5 \quad (5.13)$$

$$c_1p_y - s_1p_x = d_6s_4s_5 \quad (5.14)$$

(5.13), (5.14)'de yerine koyulursa (5.15) bulunur.

$$c_1p_y - s_1p_x = d_6(c_1r_{23} - s_1r_{13}) \quad (5.15)$$

(5.15) düzenlendiğinde (5.16) ve (5.17) elde edilir.

$$\frac{s_1}{c_1} = \tan(\theta_1) = \frac{p_y - d_6r_{23}}{p_x - d_6r_{13}} = \frac{d_6r_{23} - p_y}{d_6r_{13} - p_x} \quad (5.16)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}((p_y - d_6r_{23}), (p_x - d_6r_{13})) \vee \text{atan2}((d_6r_{23} - p_y), (d_6r_{13} - p_x)) \quad (5.17)$$

Bu noktadan sonra θ_1 açısı bilinmektedir ve diğer açılar hesaplanmasında bir bilinen olarak kullanılacaktır. (5.12)'deki (1,3), (1,4), (3,3) ve (3,4) elemanlarının eşitlikleri sırasıyla (5.18), (5.19), (5.20) ve (5.21) ifadelerini verir.

$$c_1r_{13} + s_1r_{23} = -c_{23}c_4s_5 - s_{23}c_5 \quad (5.18)$$

$$c_1 p_x + s_1 p_y = a_1 + a_2 c_2 - d_4 s_{23} - d_6 (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5) \quad (5.19)$$

$$r_{33} = s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5 \quad (5.20)$$

$$p_z = -a_2 s_2 - d_4 c_{23} - d_6 (c_{23} c_5 - s_{23} c_4 s_5) \quad (5.21)$$

(5.18), (5.19)'da, (5.20), (5.21)'de yerine koyulursa sırasıyla (5.22) ve (5.23) bulunur.

$$c_1 p_x + s_1 p_y = a_1 + a_2 c_2 - d_4 s_{23} + d_6 (c_1 r_{13} + s_1 r_{23}) \quad (5.22)$$

$$p_z = -a_2 s_2 - d_4 c_{23} + d_6 r_{33} \quad (5.23)$$

Bilinen değerler sol tarafa atılıp kısaca η ve μ ile gösterildiğinde, (5.22) ve (5.23) sırasıyla (5.24) ve (5.25) halini alır.

$$c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 - d_6 (c_1 r_{13} + s_1 r_{23}) = \eta = a_2 c_2 - d_4 s_{23} \quad (5.24)$$

$$p_z - d_6 r_{33} = \mu = -a_2 s_2 - d_4 c_{23} \quad (5.25)$$

Her iki tarafın da karesi alındığında (5.26) ve (5.27) elde edilir.

$$\eta^2 = d_4^2 s_{23}^2 - 2a_2 d_4 c_2 s_{23} + a_2^2 c_2^2 \quad (5.26)$$

$$\mu^2 = d_4^2 c_{23}^2 + 2a_2 d_4 s_2 c_{23} + a_2^2 s_2^2 \quad (5.27)$$

Denklemler taraf tarafa toplandığında (5.28), bilinenler sol tarafa atıldığında (5.29) bulunur.

$$\eta^2 + \mu^2 = a_2^2 (s_2^2 + c_2^2) + d_4^2 (s_{23}^2 + c_{23}^2) - 2a_2 d_4 (s_{23} c_2 - c_{23} s_2) \quad (5.28)$$

$$\eta^2 + \mu^2 - a_2^2 - d_4^2 = -2a_2 d_4 (s_{23} c_2 - c_{23} s_2) \quad (5.29)$$

(5.30) ile verilen toplam fark formülü (5.29)'a uygulandığında (5.31) elde edilir.

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha)\cos(\beta) - \cos(\alpha)\sin(\beta) \quad (5.30)$$

$$2a_2d_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_2) = a_2^2 + d_4^2 - \eta^2 - \mu^2 \quad (5.31)$$

(5.31) ifadesinde θ_3 'e bağlı terim yalnız bırakıldığında (5.32) ve (5.33) bulunur.

$$s_3 = \frac{a_2^2 + d_4^2 - \eta^2 - \mu^2}{2a_2d_4} = \rho \quad (5.32)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\rho, \sqrt{1 - \rho^2}) \vee \text{atan2}(\rho, -\sqrt{1 - \rho^2}) \quad (5.33)$$

Bu noktadan sonra θ_3 açısı da bilinmektedir. θ_2 açısının bulunabilmesi için (5.11) denkleminin her iki tarafı da ${}^3_0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3)^{-1}$ ile çarpılarak (5.34) elde edilir.

$$\begin{aligned} & \left[{}^0_3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \right]^{-1} {}^0_6T = {}^3_4T(\theta_4) {}^4_5T(\theta_5) {}^5_6T(\theta_6) \\ & \begin{bmatrix} c_1c_{23} & s_1c_{23} & -s_{23} & \frac{a_1(s_{23}^2 - 1) + a_2(s_3s_{23} - c_2)}{c_{23}} \\ -c_1s_{23} & -s_1s_{23} & -s_{23} & a_1s_{23} + a_2s_3 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5s_6 - s_4c_6 & -c_4s_5 & -d_6c_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & d_4 + d_6c_5 \\ -s_4c_5c_6 - c_4s_6 & s_4c_5s_6 - c_4c_6 & s_4s_5 & d_6s_4s_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.34)$$

Eşitliğin sol tarafı çarpıldıktan sonra, (1,4) ve (2,4) elemanlarının eşitlikleri sırasıyla (5.35) ve (5.36) ifadelerini verir.

$$c_1c_{23}p_x + s_1c_{23}p_y - s_{23}p_z + \frac{a_1(s_{23}^2 - 1) + a_2(s_3s_{23} - c_2)}{c_{23}} = -d_6c_4s_5 \quad (5.35)$$

$$-c_1s_{23}p_x - s_1s_{23}p_y - c_{23}p_z + a_1s_{23} + a_2s_3 = d_4 + d_6c_5 \quad (5.36)$$

(5.35) c_{23} ile, (5.36) da s_{23} ile çarpıldığında sırasıyla (5.37) ve (5.38) elde edilir.

$$c_1 c_{23}^2 p_x + s_1 c_{23}^2 p_y - s_{23} c_{23} p_z + a_1 (s_{23}^2 - 1) + a_2 (s_3 s_{23} - c_2) = -d_6 c_{23} c_4 s_5 \quad (5.37)$$

$$-c_1 s_{23}^2 p_x - s_1 s_{23}^2 p_y - s_{23} c_{23} p_z + a_1 s_{23}^2 + a_2 s_3 s_{23} = d_4 s_{23} + d_6 s_{23} c_5 \quad (5.38)$$

(5.38), (5.37)'den taraf tarafa çıkartılıp sadeleştirildiğinde (5.39) bulunur.

$$c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 - a_2 c_2 = -d_4 s_{23} + d_6 (-c_{23} c_4 s_5 - s_{23} c_5) \quad (5.39)$$

(5.18) ile verilen eşitlik (5.39) ifadesinde yerine konulup, s_{23} (5.3)'deki toplam fark formülü ile açıldığında (5.40) elde edilir.

$$c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 - d_6 (c_1 r_{13} + s_1 r_{23}) = -d_4 (s_2 c_3 + c_2 s_3) + a_2 c_2 \quad (5.40)$$

(5.40) eşitliği (5.41)'deki formda düzenlenir.

$$A \sin(\theta_2) + B \cos(\theta_2) + C = 0 \quad (5.41)$$

Burada;

$$A = \frac{d_4 c_3}{[c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 - d_6 (c_1 r_{13} + s_1 r_{23})]}$$

$$B = \frac{d_4 s_3 - a_2}{[c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 - d_6 (c_1 r_{13} + s_1 r_{23})]}$$

$$C = 1$$

bilinen sabitlerini göstermektedir. (5.41)'de $\cos(\theta_2)$ yerine $[1 - \sin^2(\theta_2)]^{1/2}$ yazıldığında (5.42), her iki tarafın karesi alınıp düzenlendiğinde (5.43) bulunur.

$$A \sin(\theta_2) + 1 = -B \sqrt{1 - \sin^2(\theta_2)} \quad (5.42)$$

$$\sin^2(\theta_2)(A^2 + B^2) + 2A \sin(\theta_2) + 1 - B^2 = 0 \quad (5.43)$$

İkinci dereceden tek bilinmeyenli bir denklem olan (5.43), $\sin(\theta_2)$ ifadesi için çözümlerse (5.44) elde edilir.

$$\sin(\theta_2) = \frac{-2A \mp \sqrt{4A^2 - 4(A^2 + B^2)(1 - B^2)}}{2(A^2 + B^2)} = \frac{-A \mp B\sqrt{A^2 + B^2 - 1}}{A^2 + B^2} = \sigma_{1,2} \quad (5.44)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sigma, \sqrt{1 - \sigma^2}) \vee \text{atan2}(\sigma, -\sqrt{1 - \sigma^2}) \quad (5.45)$$

Burada bulunan iki farklı $\sin(\theta_2)$ değerinden (σ_1 ve σ_2) sadece biri (5.42) eşitliğini sağlamaktadır. Sağlayan σ değeri (5.45)'de yerine konularak θ_2 açısı için iki farklı değer bulunur. Bu iki değer (5.41) eşitliğini sağlayan doğru θ_2 açısıdır.

θ_2 açısının da bulunmasıyla (5.34) eşitliğinin sol tarafı tamamen bilinen haline gelmiştir. (1,3) ve (3,4) elemanlarının eşitlikleri sırasıyla (5.46) ve (5.47) ifadelerini verir.

$$c_1 c_{23} r_{13} + s_1 c_{23} r_{23} - s_{23} r_{33} = -c_4 s_5 \quad (5.46)$$

$$-s_1 r_{13} + c_1 r_{23} = s_4 s_5 \quad (5.47)$$

s_5 değeri 0'a eşit olmadığı sürece θ_4 açısı (5.48) ile bulunabilmektedir.

$$\theta_4 = \text{atan2}((-s_1 r_{13} + c_1 r_{23}), (-c_1 c_{23} r_{13} - s_1 c_{23} r_{23} + s_{23} r_{33})) \quad (5.48)$$

θ_5 açısı 0° olduğunda ($s_5 = 0$); 4. ve 6. eklemler maşanın aynı hareketi yapmasına sebep olmaktadır. Bu durumda maşanın hareketi 4. ve 6. eklemin açı değişimlerinin farkı veya toplamı şeklinde seyretmektedir. Bu durumun kontrolü, (5.48) ifadesindeki atan2 fonksiyonu bileşenlerinin 0'a yakınlığına bakılarak yapılabilir. Her iki bileşen de 0'a yakın ise θ_4 açısı rastgele bir değere sabitlenerek daha sonradan hesaplanacak θ_6 açısı θ_4 'e göre bulunur [46].

θ_4 açısının da bulunmasıyla θ_1 , θ_2 , θ_3 ve θ_4 bilinen değerler olmuştur. θ_5 ve θ_6 açılarının bulunması için (5.11) denkleminin her iki tarafı da $[{}^4_0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)]^{-1}$ ile çarpılarak (5.49) elde edilir.

$$\begin{aligned}
& [{}^0_4T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)]^{-1} {}^0_6T = {}^4_5T(\theta_5) {}^5_6T(\theta_6) \\
& \begin{bmatrix} c_1c_{23}c_4 + s_1s_4 & s_1c_{23}c_4 - c_1s_4 & -s_{23}c_4 & \sim \\ -c_1c_{23}s_4 + s_1c_4 & -s_1c_{23}s_4 - c_1c_4 & s_{23}s_4 & \sim \\ -c_1s_{23} & -s_1s_{23} & -c_{23} & \sim \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} c_5c_6 & -c_5s_6 & -s_5 & -d_6s_5 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & d_6c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.49}
\end{aligned}$$

Eşitliğin sol tarafı çarpıldıktan sonra; (1,3), (3,3), (2,1) ve (2,2) elemanlarının eşitlikleri sırasıyla (5.50), (5.51), (5.52) ve (5.53) ifadelerini verir.

$$r_{13}(c_1c_{23}c_4 + s_1s_4) + r_{23}(s_1c_{23}c_4 - c_1s_4) - r_{33}(s_{23}c_4) = -s_5 \tag{5.50}$$

$$r_{13}(-c_1s_{23}) + r_{23}(-s_1s_{23}) + r_{33}(-c_{23}) = c_5 \tag{5.51}$$

$$r_{11}(-c_1c_{23}c_4 + s_1c_4) + r_{21}(-s_1c_{23}s_4 - c_1c_4) + r_{31}(s_{23}s_4) = s_6 \tag{5.52}$$

$$r_{12}(-c_1s_{23}) + r_{22}(-s_1s_{23}) + r_{32}(-c_{23}) = c_6 \tag{5.53}$$

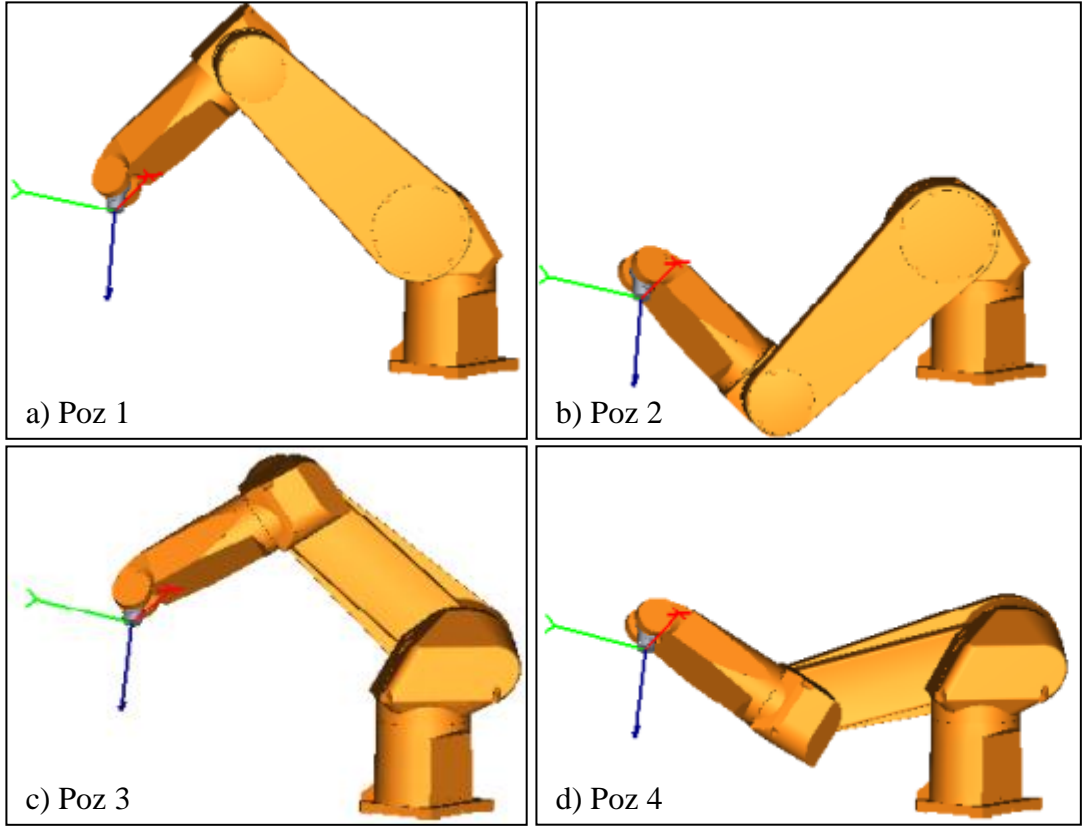
Buradan θ_5 açısı (5.54) ile, θ_6 açısı da (5.55) ile bulunur.

$$\theta_5 = \text{atan2}(s_5, c_5) \tag{5.54}$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(s_6, c_6) \tag{5.55}$$

Ters kinematik çözümü sonucunda, robotun çalışma uzayı dahilindeki herhangi bir konum $(p_{x,y,z})$ ve yönelime $(r_{1-3,1-3})$ karşılık gelen eklem açıları θ_{1-6} hesaplanabilmektedir. Burada en çok dikkat edilmesi gereken nokta, θ_1 ve θ_3

açılarının bulunduğu (5.17) ve (5.33) ifadelerindeki çoklu değerlerdir. Her iki açı için de ikişer değer bulunmaktadır. Bu değerlerden hangilerinin seçileceği diğer eklem açılarını da etkilemektedir. Stäubli Rx160 çalışma uzayında bulunan noktalara dört farklı şekilde ulaşabilmektedir. Bu durum bir örnekle açıklanmıştır. Şekil 5.5, (5.56)'da verilen dönüşüm matrisi 0T için Stäubli Rx160 robot kolun alabileceği dört farklı pozü göstermektedir. Pozların eklem açıları Çizelge 5.3'te bulunabilir.



Şekil 5.5. Aynı hedefe farklı açılarla ulaşılmış Stäubli Rx160 robot kolu gösterimleri

$${}^0T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{bmatrix} 0.7803 & -0.5732 & -0.2500 & 803.5660 \\ -0.4268 & -0.7803 & 0.4571 & 881.3478 \\ -0.4571 & -0.2500 & -0.8536 & 47.5305 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

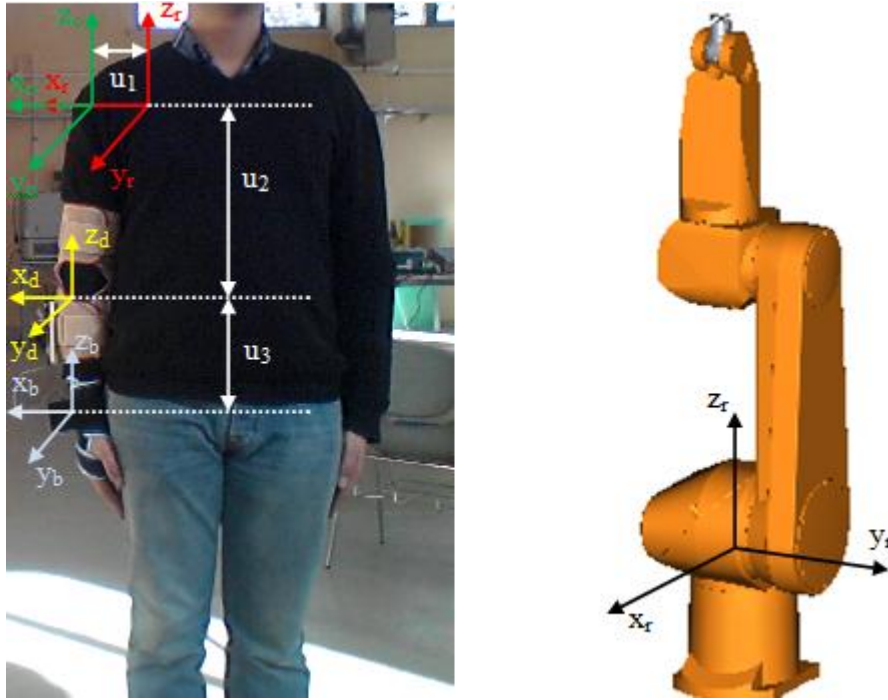
Çizelge 5.3. Şekil 5.5 ile verilen pozlar için eklem açıları

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
a) Poz 1	45.00°	45.00°	90.00°	45.00°	45.00°	45.00°
b) Poz 2	45.00°	135.00°	-90.00°	35.26°	120°	99.74°
c) Poz 3	-135.00°	-76.08°	-46.86°	-141.86°	54.05°	55.51°
d) Poz 4	-135.00°	-103.92°	46.86°	-147.86°	109.95°	92.36°

Uç işlevcinin yol takip etmesinin istendiği uygulamalarda, robotun yolu oluşturan noktalara aynı poz ile ulaşması gerekir. Bu gereksinim, eklem açıları için emniyet limitleri (bkz. Çizelge 5.1) olması nedeniyle, bütün pozlar ile karşılanamayabilir. Örneğin Şekil 5.5(b)'deki pozda ikinci eklem için limit aşılmıştır (*Bağ 2* yere çarpmaktadır). Bu çalışmadaki gibi gerçek zamanlı uzaktan kontrol uygulamalarında, yol takip edilirken her örneklemede hem limit hem de poz kontrolü yapılmalıdır.

6. İNSAN KOLU İLE ROBOT KOLUN EŞLENMESİ

Çalışmanın amacı insan kolu hareketlerini robot kola taklit ettirmektir. Öncelikle insanın omuzuna, robotun ise gövdesine yerleştirilmiş olan ve sabit kabul edilen referans çerçeveler (Şekil 6.1) çakışık kabul edilmiştir. İnsan kolu tavana monteli bir mekanizma olarak düşünülebilir, ancak robot yapısal güçlükler nedeniyle yere monte edilmiştir. Bu nedenle robotun taklit edeceği hareketler, insan kolu hareketlerinin x_r - y_r düzlemine göre simetriğidir. İnsan kolundan ölçülen bilek konumunun z -ekseni değerleri -1 ile çarpılmıştır.



Şekil 6.1. İnsan kolu çerçeveleri ve Stäubli Rx160 referans çerçevesi gösterimi

İnsan kolu çalışma uzayının büyüklüğü kişiden kişiye farklılık gösterse de Stäubli Rx160'in çalışma uzayından oldukça dardır. İki uzayın eşleştirilmesinde alternatiflerden biri, robot hareketlerini insan kolu çalışma uzayının içinde kalacak şekilde sınırlamaktır ki bu durum robotu oldukça dar bir alana hapsedmektedir. Diğer alternatif ise insan kolu çalışma uzayını robotunkiyle örtüyecek şekilde genişletmektir. Bu çalışmada ikinci alternatif benimsenmiş ve Şekil 6.1'deki insan

kolu bağ uzunlukları u_1, u_2, u_3 robotun ilgili ölçülerine eşitlenmiştir (6.1). Böylece, ölçüm sistemini takan insanın kol bağ uzunluklarının ölçülmesi de gerekmemektedir.

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 = 150 \text{ mm} \\ u_2 &= a_2 = 825 \text{ mm} \\ u_3 &= d_4 + d_6 = 625 + 110 = 735 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6.1)$$

İnsan kolundan okunan (6.2)'deki kuarterniyonlar yardımıyla bilek çerçevesi $\{B\}$ 'nin referans çerçeve $\{R\}$ 'ye göre konumu Bölüm 4'de anlatıldığı gibi (4.38)-(4.40) işlemleriyle hesaplanmaktadır. Ancak Bölüm 4'deki aşamalarda u_1 uzunluğu tanımlanmamıştır. (6.3) ve (6.4) u_1 uzunluğunun da dahil edilmesiyle hesaplanan bilek konumunu vermektedir.

$$\begin{aligned} Q_{omuz} &= [{}^o q_0 \quad {}^o q_1 \quad {}^o q_2 \quad {}^o q_3] \\ Q_{bilek} &= [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$[0 \quad P_o^x \quad P_o^y \quad P_o^z] = Q_{omuz} \otimes [0 \quad u_1 \quad 0 \quad 0] \otimes Q_{omuz}^{-1} \quad (6.3)$$

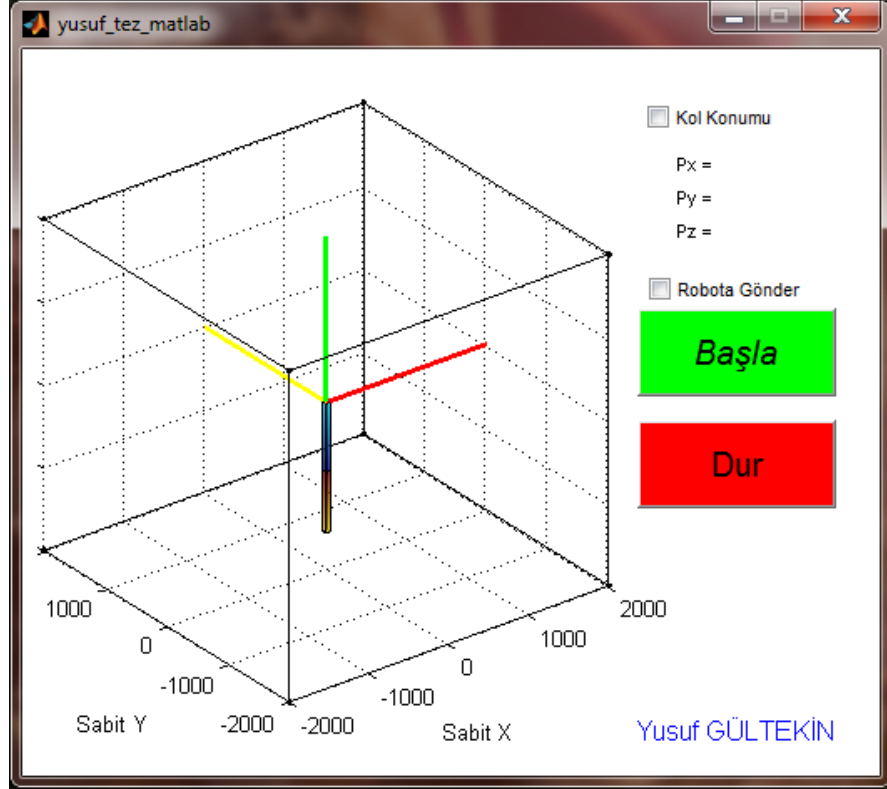
$$[p_x \quad p_y \quad p_z] = [P_b^x \quad P_b^y \quad P_b^z] + [P_o^x \quad P_o^y \quad 0] \quad (6.4)$$

Bu bilgiler robot kolun uç işlevcisini sabit referans çerçevesine göre tanımlayan dönüşüm matrisinde (6.5) yerine konulup, Bölüm 5'teki yöntemlerle ters kinematik hesaplar yapıldığında, robot kontrolcüsüne gönderilecek altı adet eklem açısı değeri θ_{1-6} elde edilir.

$${}^oT = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & p_x \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & p_y \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

İnsan kolu pozisyonunu bilgisayar ekranında gösteren ve Bölüm 4'de açıklanan MATLAB programı, ters kinematik çözümü sonucunda bulunan eklem açılarını

robot kontrolcüsüne gönderecek şekilde geliştirilmiştir. Arayüzü Şekil 6.2’de verilen program kullanılarak insan kolu hareketlerinin hem bilgisayar ekranında gösterilebilmesi hem de robot kola taklit ettirilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Yazılımın tamamı EK 9’da verilmiştir



Şekil 6.2. İnsan kolu hareketlerini gösteren ve robot kola ileten programın arayüzü

Şekil 6.3, bu çalışma sonunda insan kolu hareketlerine karşılık robot kolun aldığı pozları göstermektedir.



(a) Durum 1



(b) Durum 2



(c) Durum 3



(d) Durum 4



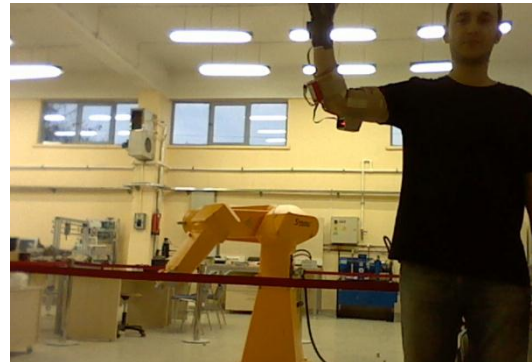
(e) Durum 5



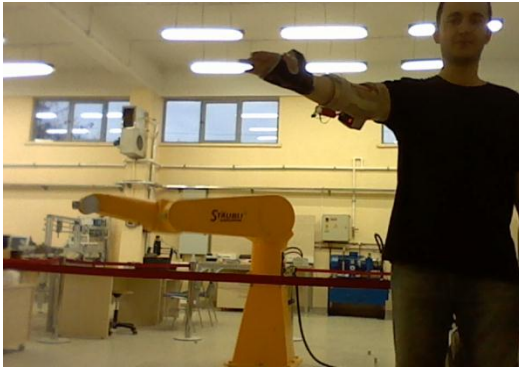
(f) Durum 6



(g) Durum 7



(h) Durum 8



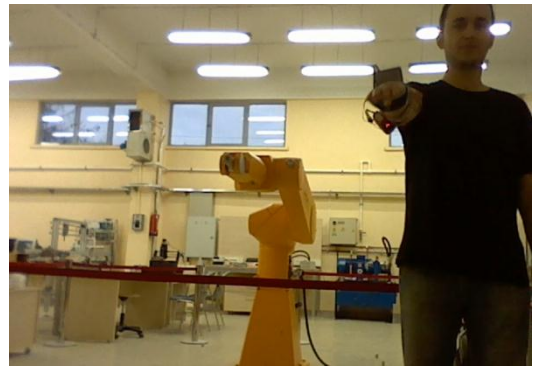
(i) Durum 9



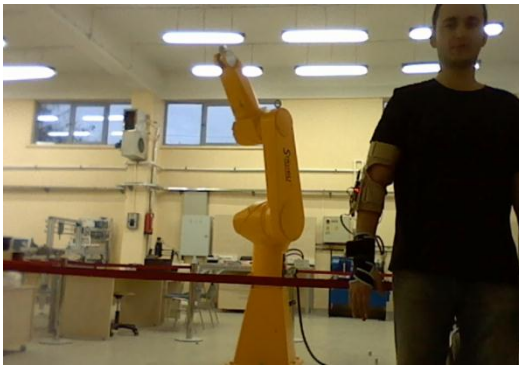
(j) Durum 10



(k) Durum 11



(l) Durum 12



(m) Durum 13



(n) Durum 14



(o) Durum 15



(p) Durum 16

Şekil 6.3. Robot kol ve insan kolunun eşlenmiş konum ve yönelimleri

Şekildeki fotoğraflar EK 13’de bulunan test videosundan alınmıştır. Burada, robot kolun hareket eden insan kolu hareketlerini taklit edebildiği görülebilir. Yukarıda belirtildiği gibi, robot kolun zemine çarpmaması için insan kolu ve robot kolun referans çerçevelerinin z -eksenleri birbirinin yatay düzleme göre simetriği olacak şekilde eşlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; insan kolu hareketlerini Stäubli Rx160 model bir endüstriyel robot kola eşzamanlı olarak taklit ettirmek amacıyla, kompakt, taşınabilir ve düşük maliyetli bir ölçüm sistemi geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. İnsan kolu hareketleri, omuza yerleştirildiği varsayılan referans çerçeveye göre algılanmış, omuz ekleminin birbirine dik üç eksen etrafındaki dönüşleri dirsek arkasına, dirsek ekleminin dönüşleri de bilek üzerine sabitlenen AÖB'ler ile ölçülmüştür.

Tak-çalıştır olarak satın alınabilecek AÖB'ler yüksek maliyetleri nedeniyle tercih edilmemiş, AÖB tasarımı ayrı bir konu olarak ele alınmıştır. Mikrodenetleyici tabanlı tasarımı olan AÖB'lerde dijital ivmeölçer ve jiroskoplar kullanılmıştır. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan dönüş açıları sadece ivmeölçer veya sadece jiroskop kullanılarak temin edilebilse de, bu iki farklı algılayıcının birbirini doğrulayacak şekilde birleştirilmesi doğruluğu arttırmaktadır. AÖB'lere eklenebilecek bir manyetikölçer, ölçümlerin mutlak bir referansa göre yapılmasını sağlayarak her kullanımdan önce yapılması gereken referanslama (sıfırlama) işlemini ortadan kaldıracaktır. Ancak bu durumda; manyetikölçerin dış ortamdan etkilenmediğinden emin olunmalıdır.

AÖB verilerinden yönelim hesaplanması için iki ayrı yöntem incelenmiştir. AÖB'lerin bağlı olduğu çerçeveleri referans çerçeveye göre tanımlayan dönüşüm matrisleri ilk olarak Euler açıları ile oluşturulmuştur. Benzer çalışmalarda bu yöntemin genellikle bir Kalman filtresiyle beraber kullanıldığı görüldüğünden altı-durumlu bir Kalman filtresi tercih edilmiş, hesaplama yükünü azaltmak adına üç adet iki-durumlu filtre uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda ölçümlerin $\pm 1^\circ$ hata ile yapılabildiği ortaya çıkmıştır. Ölçüm hassasiyeti yeterli olmasına rağmen, çok sayıda trigonometrik işlem içeren oldukça karmaşık bir algoritmanın her örneklemede çalıştırılmasının sistemi hantallaştırdığı görülmüştür. Hesaplama yükünü hafifletmek için Euler açıları yerine kuaterniyon tabanlı bir yöntemle geçilmiş, Kalman filtresi yerine basit bir Butterworth filtresi kullanılarak örnekleme periyodu 0,005 sn, hassasiyeti $\pm 1^\circ$ olan bir ölçüm sistemine ulaşılmıştır.

Kuaterniyonların AÖB'lerden okunup kinematik hesaplamaların yapılacağı bilgisayara kablosuz olarak iletilmesi için ayrı bir kart tasarlanmıştır. Atmel mikrodenetleyici tabanlı bu kart, omuz ve bilek kuaterniyonlarını bluetooth üzerinden her 0.04 sn'de göndermektedir. MATLAB ortamında geliştirilen yazılım, alınan kuaterniyonlarla ilk olarak insan bileğinin konumu ve yönelimini hesaplar ve bilgisayar ekranında üç-boyutlu olarak görüntüler. Daha sonra insan kolu ve robot kol çalışma uzayları robot çalışma uzayından azami faydalanacak şekilde eşlenir ve robot kol uç işlevcisinin bulunması gereken konum ve yönelim hesaplanır. Son olarak, robot kol uç işlevcisinin hesaplanan konum ve yönelimine karşılık gelen eklem açıları ters kinematik çözümü yardımıyla bulunur ve RS232 iletişim protokolü üzerinden robot kontrolcüsüne iletilir.

Robot kontrolcüsüne iletilen eklem açılarının okunması için kontrolcü üzerine basit bir Val3 programı yazılmış, robot kolun bu açılara nasıl gittiği kapsam dışında tutulmuştur. Bu yöntem robot kolunu eşzamanlı yönlendirmekte yetersiz kalmakta ve bazı durumlarda zaman gecikmeleri yaşanmaktadır. Robot eklemlerine alçak düzey arayüz¹⁵(ADA) programlama dili ile doğrudan erişerek robot tepkilerinin hızlandırılması mümkündür ve bu çalışmanın devamında incelenmesi yararlı olacaktır.

Uzaktan kontrol uygulamalarında merkez ile uydu arasındaki zaman gecikmesinin asgariye indirilmesi esastır. Bunun için, hesaplamaların ve veri iletiminin mümkün olduğunca hızlı yapılması gerekir. Bu çalışmanın öncelikleri arasında olmamasına rağmen, hesaplamaların hızlandırılması için AÖB'lerde yukarıda bahsedilen kuaterniyon tabanlı yöntem kullanılmış, robot eklem açılarının belirlenmesi için kullanılan ters kinematik denklemler de analitik olarak çözülmüştür. Hesaplama hızı anlamında müdahale edilemeyen tek yer, yine yukarıda bahsedilen, robot kontrolcüsü içindeki eklem kontrolcüleridir. Anakart üzerindeki 8-bit mikrodenetleyiciyi 32-bit bir modelle değiştirerek veya bir FPGA'den faydalanarak, bilgisayarda MATLAB ortamında yapılan işlemleri anakartta yapmak hız avantajı sağlayacaktır. Sistem

¹⁵ ing: low level interface

bileşenleri arasındaki iletişim protokolleri eldeki imkanlar ölçüsünde seçilmiştir. Jiroskop ve ivmeölçer verileri AÖB mikrodenetleyicilerine 1MB/s hızında SÇBA üzerinden iletilirken, AÖB'den anakarta, anakarttan bilgisayara ve bilgisayardan robot kontrolcüsüne veri transferi 115 kB/s hızında RS232 protokolü ile sağlanmaktadır. Bilgisayarın anakartla ikame edildiği durumda AÖB'lerle anakart arasında SÇBA veya I²C, anakart ile robot kontrolcüsü arasında ise ethernet tabanlı endüstriyel bir protokolün kullanılması veri iletim hızını arttıracaktır.

Geliştirilen ölçüm sisteminin doğruluğu test düzenekleri üzerinde yapılan deneyler yardımıyla ispatlanmıştır. Uydu sistem olan robot kolun konumlanmasının ise üreticinin sağladığı spesifikasyon içinde hassas ve doğru olduğu kabul edilmiştir. Sistemin tümüyle çalıştığı durumda insan kolu ile robot kol eşleşmesinin doğruluğu eldeki imkanlarla test edilememiştir. İleriki çalışmalarda, kurulan sistemin performansının Bölüm 2'de bahsedilen görüntü işleme veya dış iskelet tabanlı sistemlerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Ryu, D., Song, J.-B., Cho, C., Kang S., Kim, M., Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator, *Mechatronics*, 20, 181-191, 2010.
- [2] Niku, S.B., Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [3] Tafazzoli, R.S.F., Model-based human gait recognition using leg and arm movements, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 1237–1246, 2010.
- [4] Poppe, R., Vision-based human motion analysis: An overview, *Computer Vision and Image Understanding*, 108, 4-18, 2007.
- [5] Jun, S., Park, J., Park, C., Jung I.K., Kim, Y.O., Morphological Approach of Stereo Camera based Human Motion Capture System, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, 2007.
- [6] “Popsci dergisi internet sitesi” erişim adresi: <http://www.popsci.com/scitech/article/2009-06/turbo-powered-physical-therapy>, erişim tarihi 21 Nisan 2012.
- [7] Chen, Y., Zhang, J., Yang C., Niu, B., The workspace mapping with deficient-DOF space for the PUMA 560 robot and its exoskeleton arm by using orthogonal experiment design method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 478–487, 2007.
- [8] Ying, C., Jia-fan, Z., Can-jun Y., Bin, N., Design and hybrid control of the pneumatic force-feedback systems for Arm-Exoskeleton by using on/off valve, *Mechatronics*, 17, 325–335, 2007.
- [9] Takeda, R., Tadano, S., Natorigawa, A., Todoh M., Yoshinari, S., Gait posture estimation using wearable acceleration and gyro sensors, *Journal of Biomechanics*, 42, 2486–2494, 2009.
- [10] Zhou, H., Stone, T., Hu H., Harris, N., Use of multiple wearable inertial sensors in upper limb motion tracking, *Medical Engineering & Physics*, 30, 123–133, 2008.
- [11] Bernmark, E., Wiktorin, C., A triaxial accelerometer for measuring arm movement, *Applied Ergonomics*, 33, 541–547, 2002.

- [12] Favre, J., Luthi, F., Jolles, B., Siegrist, O., Najafi B., Aminian, K., A new ambulatory system for comparative evaluation of the three-dimensional knee kinematics, applied to anterior cruciate ligament injuries, *Knee Surg sports Traumatol Arthrosc*, 14, 2006.
- [13] Haid, M., Breitenbach, J., Low cost inertial orientation tracking with Kalman filter, *Applied Mathematics and Computation*, 153, 567–575, 2004.
- [14] Kao, C., Chen, T., Design and analysis of an orientation estimation system using coplanar gyro-free inertial measurement unit and magnetic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 144, 251–262, 2008.
- [15] Fourati, H., Manamanni, N., Afilal L., Handrich, Y. Posture and body acceleration tracking by inertial and magnetic sensing: Application in behavioral analysis of free-ranging animals, *Biomedical Signal Processing and Control*, 6, 94–104, 2011.
- [16] Zhu, R., Sun, D., Zhou Z., Wang, D., A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors, *Measurement*, 40, 322–328, 2007.
- [17] Esser, P., Dawes, H., Collett J., Howells, K., IMU: Inertial sensing of vertical CoM movement, *Journal of Biomechanics*, 42, 1578–1581, 2009.
- [18] Cooper, G., Sheret, I., McMillian, L., Siliverdis, K., Sha N., Hodgins, D., Kenney, L., Howard, D., Inertial sensor-based knee flexion/extension angle estimation, *Journal of Biomechanics*, 42, 2678–2685, 2009.
- [19] Favre, J., Jolles, B., Aissaoui, R., Aminian, K., Ambulatory measurement of 3D knee joint angle, *Journal of Biomechanics*, 41, 1029–1035, 2008.
- [20] “Xsens firması resmi adresi” erişim adresi: <http://www.xsens.com/en/general/products-all>, erişim tarihi: 26 Ocak 2012.
- [21] “Sparkfun firması resmi adresi” erişim adresi: <https://www.sparkfun.com/products/10736>, erişim tarihi: 16 Kasım 2012
- [22] Bohnenberger, J.G.F., Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung der Gesetze der Umdrehung der Erde um ihre Axe, und der Veränderung der Lage der letzteren, *Tübinger Blätter für Naturwissenschaften und Arzneikunde*, 3, 72-83, 1817.
- [23] Cigada, A., Leo, E., Vanali, M., Electrical method to measure the dynamic behaviour and the quadrature error of a MEMS gyroscope sensor, *Sensors and Actuators*, 134, 88-97, 2006.

- [24] Kownacki, C., Optimization approach to adapt Kalman filters for the real-time application of accelerometer and gyroscope signals' filtering, *Digital Signal Processing*, 21, 131–140, 2011.
- [25] Lee, I., Yoon, G.H., Park, J., Seok, S., Chun, K., Lee, K., Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer, *Sensors and Actuators*, 119, 8-18, 2005.
- [26] Zhou, H., Hu, H., Harris, N.D., Hammerton, J., Applications of wearable inertial sensors in estimation of upper limb movements, *Biomedical Signal Processing and Control*, 1, 22–32, 2006.
- [27] Favre, J., Aissaoui, R., Jolles, B., Guise, J., Aminian, K., Functional calibration procedure for 3D knee joint angle description using inertial sensors, *Journal of Biomechanics*, 42, 2330–2335, 2009.
- [28] Cheng, L., Zhaoying, Z., Xu, F., Attitude Determination for MAVs Using a Kalman Filter, *Tsinghua Science and Technology*, 25(3), 593-597, 2008.
- [29] “CT Systems şirketi resmi adresi” erişim adresi: <http://www.ctsystems.eu/support/history-mag.html>, erişim tarihi: 16 Kasım 2011.
- [30] Luinge, H.J., Veltink, P.H., Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 43, 273-282 , 2005.
- [31] Yang, F., Ding, L., Yang, C., Yuan, X., An algorithm for simulating human arm movement considering the comfort level, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13, 437–449, 2005.
- [32] Amasay, T., Zodrow, K., Kincl, L., Hess, J., Karduna, A. Validation of tri-axial accelerometer for the calculation of elevation angles, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 783–789, 2009.
- [33] “United States Naval Academy resmi web adresi” erişim adresi: <http://www.usna.edu/Users/math/meh/euler.html>, erişim tarihi: 7 Mart 2012.
- [34] Kalman, R.E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45, 1960.
- [35] Sun, S.L., Multi-sensor information fusion white noise filter weighted by scalars based on Kalman predictor, *Automatica*, 40, 1447–1453, 2004.

- [36] Feng, J., Wang Z., Zeng, M., Distributed weighted robust Kalman filter fusion for uncertain systems with autocorrelated and cross-correlated noises, *Information Fusion*, 14, 78–86, 2012.
- [37] Sun, X.J., Gao, Y., Deng, Z.L., Li, C., Wang, J.W., Multi-model information fusion Kalman filtering and white noise deconvolution, *Information Fusion*, 11, 163–173, 2010.
- [38] “Wolfram araştırma sitesi” erişim adresi: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/HamiltonWilliamRowan.html>, erişim tarihi: 16 Kasım 2011.
- [39] Goldman, R., Understanding quaternions, *Graphical Models*, 73, 21–49, 2011.
- [40] “Matlab programı resmi sitesi” erişim adresi: <http://www.mathworks.com/help/aerotbx/functionlist.html>, erişim tarihi: 16 Kasım 2011.
- [41] Kuipers, J.B., Quaternions and rotation Sequences: a Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality, *Princeton University Press*, 1999.
- [42] Kong, X., INS algorithm using quaternion model for low cost IMU, *Robotics and Autonomous Systems*, 46, 221-246, 2004.
- [43] Favre, J., Jolles, B., Siegrist O., Aminian, K., Quaternion-based fusion of gyroscopes and accelerometers to improve 3D angle measurement, *Electronics Letters*, 42(11) 2006.
- [44] Gültekin Y., Taşcıoğlu, Y., Pendulum Positioning System Actuated by Dual Motorized Propellers, *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Mayıs 2011.
- [45] Bottema, O., *Theoretical Kinematics*, *Dover Publications Inc.*, New York, 1979.
- [46] Craig, J.J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, *Pearson/Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.

EKLER

Bu çalışmada bahsi geçen tüm dosyalar Cd içerisinde aşağıdaki adreslerde bulunmaktadır.

EK 1. CD\EKLER\Veri Föyleri	MLX90609_veriföyü.pdf
EK 2. CD\EKLER\Veri Föyleri	SCA3000_veriföyü.pdf
EK 3. CD\EKLER\Veri Föyleri	Staubli_RX160.pdf
EK 4. CD\EKLER\Kart Tasarımları\AÖB	
EK 5. CD\EKLER\Kart Tasarımları\Ana Kart	
EK 6. CD\EKLER\Tasarımlanan Birimlerin Yazılımları\AÖB Kalman Kodları	
EK 7. CD\EKLER\Tasarımlanan Birimlerin Yazılımları\AÖB Kuarterniyon Kodları	
EK 8. CD\EKLER\Tasarımlanan Birimlerin Yazılımları\Ana Kart Atmel Kodları	
EK 9. CD\EKLER\Matlab Yazılımları\Uzaktan Kontrol	
EK 10. CD\EKLER\Matlab Yazılımları\Val3 Test	
EK 11. CD\EKLER\CS8C Yazılımları\matlab_oku	
EK 12. CD\EKLER\Videolar	pozisyon_okuma.wmv
EK 13. CD\EKLER\Videolar	uzaktan_kontrol.wmv

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜLTEKİN, Yusuf
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 23.05.1986 Erzincan
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (536) 833 0383
e-posta : ygultekin@etu.edu.tr

Eğitim

<i>Derece</i>	<i>Eğitim Birimi</i>	<i>Mezuniyet tarihi</i>
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2009

İş Deneyimi

<i>Yıl</i>	<i>Yer</i>	<i>Görev</i>
2009–2011	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Arş. Görevlisi
2011-2012	Robutel Elektronik Makina Yazılım Ltd. Şti.	Mekatronik Müh.

Yabancı Dil

İngilizce
Almanca