

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSAN KİNEMATİK VERİLERİNİN KALMAN
FİLTRESİ KULLANARAK İYİLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Hüseyin ESKİ

Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ümit KOCABIÇAK

Kasım 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Hüseyin ESKİ

09.10.2020

TEŞEKKÜR

Tüm öğrenim hayatım boyunca bana destek veren aileme, doktora çalışmam süresince ilgi, sevgi ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen eşime, çalışmamın ilerlemesine her aşamada katkıda bulunan danışmanım Prof. Dr. Ümit KOCABIÇAK, insan kinematiğı ve gerçek uzunlukların ölçülmesinde büyük katkıları olan Prof. Dr. Ertuğrul GELEN başta olmak üzere tez izleme jürimdeki Prof. Dr. İsmail Hakkı CEDİMOĞLU ve Prof. Dr. Cemil ÖZ hocalarıma teşekkür ederim. İhtiyaç duyduğumda katkı sağlamaktan çekinmeyen çalışma arkadaşlarım ve hocalarıma da teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY.....	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
İNSAN HAREKET ANALİZİ	11
2.1. Genel Sensör Teknolojileri.....	12
2.1.1. Atalet sensörü tabanlı sistemler.....	13
2.1.2. Manyetik sensör tabanlı sistemler	15
2.1.3. Mekanik sensör tabanlı sistemler	16
2.2. Görsel Tabanlı (Optik) Yakalama Sistemleri.....	17
2.2.1. İşaretçi tabanlı görsel yakalama sistemleri	19
2.2.2. İşaretçisiz görsel yakalama sistemleri	23
2.2.2.1. Stereo kamera	24
2.2.2.2. Yapısal ışık (SL) kameralar.....	25
2.2.2.3. Uçuş süresi (ToF) kameralar	27
2.2.3. Görsel tabanlı karma yakalama sistemleri.....	28
BÖLÜM 3.	
KALMAN FİLTRESİ	29

3.1. Durum Uzayı Modeli	32
3.2. Standart Kalman Filtresi	33
3.3. Genişletilmiş Kalman Filtresi.....	36
BÖLÜM 4.	
KALMAN FİLTRESİ İLE KİNEMATİK ANALİZ	39
4.1. Gerçek Uzunlukların Elde Edilmesi	39
4.2. Microsoft Kinect ile Uzunlukların Hesaplanması	41
4.3. Kalman Filtresi Tasarımı.....	44
4.4. Genişletilmiş Kalman Filtresi Tasarımı.....	47
4.5. İstatistiksel Hata Oranlarının Karşılaştırılması.....	49
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
AKF	: Adaptif Kalman Filtresi
API	: Uygulama Programlama Arayüzü
BESYO	: Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu
Dof	: Serbestlik Derecesi
GKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
GPU	: Grafik İşlemci Birimi (Graphical Processing Units)
IMU	: Atalet ölçme birimi (Inertial Measurement Unit)
IR	: Kızılötesi (Infrared)
İHA	: İnsan Hareket Algılayıcı
KF	: Kalman Filtresi
MAE	: Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MAPE	: Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi
MARG	: Manyetik, Açısal Hız ve Yerçekimi
MSE	: Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error)
MLD	: Hareketli Işık Göstergesi (Motion Led Display)
MoCap	: Hareket Yakalama
ÖZYS	: Özel Yetenek Sınavı
RMSE	: Ortalama Kare Hata Karekökü (Root Mean Squared Error)
SAÜ	: Sakarya Üniversitesi
SDK	: Yazılım Geliştirme Kiti (Software Development Kit)
SL	: Yapısal Işık (Structured Light)
ToF	: Uçuş süresi (Time of Flight)
X_k	: k zaman adımındaki durum değişkeni
Z_k	: k zaman adımındaki ölçüm değişkeni

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kinect'in Algıladığı Vücut Noktaları.....	7
Şekil 1.2. Kinect Derinlik Çalışma Mesafesi	9
Şekil 2.1. İnsan Hareketi Yakalama Yöntemleri.....	12
Şekil 2.2. Örnek Bir İnsan Hareketi İzleme Sistemi	13
Şekil 2.3. Üç Eksenli İvmeölçer	14
Şekil 2.4. Bobby Bodenheimer-Manyetik Hareket Yakalama Sistemi	15
Şekil 2.5. Gypsy 7 Electro-Mekanik Hareket Yakalama Sistemi	17
Şekil 2.6. Farklı boyutlardaki pasif işaretçi.....	20
Şekil 2.7. Qualisys Pasif İşaretçi Tabanlı Hareket Yakalama Sistemi	21
Şekil 2.8. Vicon Pasif İşaretçi Tabanlı Hareket Yakalama Sistemi	22
Şekil 2.9. CodaMotion aktif işaretçi tabanlı mocap sistemi.....	23
Şekil 2.10. Stereo kamera modeli.....	25
Şekil 2.11. Microsoft Kinect 360'ın çalışma yapısı.....	26
Şekil 2.12. Microsoft Kinect V2'nin çalışma mantığı	28
Şekil 3.1. Normal Dağılım Grafiği	31
Şekil 3.2. Kalman Filtresi çalışma döngüsü.....	35
Şekil 3.3. Genişletilmiş Kalman Filtresi çalışma döngüsü	38
Şekil 4.1. Dijital Kaliper	40
Şekil 4.2. Aday Gerçek Uzunluk Ölçümleri.....	40
Şekil 4.3. Üst Kol Ölçümü	41
Şekil 4.4. Ön Kol Ölçümü.....	41
Şekil 4.5. Üst Bacak Ölçümü	41
Şekil 4.6. Çömelme Hareketi	42
Şekil 4.7. Kinect Bilgisayar Bağlantı ve Güç Kablosu.....	42
Şekil 4.8. Kinect İskelet UML Class Diyagramı	43
Şekil 4.9. Aday Sağ Bileğinin X Eksenindeki Hareketinin Kinect Verileri.....	50

Şekil 4.10. Aday Sağ Bileğinin X Eksenindeki Hareketine Filtre Uygulanması	51
Şekil 4.11 Yöntemlerin İstatistiksel Karşılaştırılması.....	52
Şekil 4.12. Uzuvarın MAE İstatistikleri	54
Şekil 4.13. Uzuvarın MAPE(%) İstatistikleri.....	54
Şekil 4.14. Uzuvarın MSE İstatistikleri	55
Şekil 4.15. Uzuvarın RMSE İstatistikleri.....	55
Şekil 4.16. Uzuvarın Standart Sapma Karşılaştırılması.....	56



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Literatür Özeti	3
Tablo 2.1. Stereo kameraların özellikleri	25
Tablo 2.2. SL kameraların özellikleri.....	26
Tablo 2.3. ToF kameraların özellikleri.....	27
Tablo 3.1. Durum Uzay Değişkenleri	33
Tablo 3.2. Kalman Filtresinde Kullanılan Parametreler	36
Tablo 4.1. Gerçek Uzunlukların Kinect Noktalarına Karşılığı.....	44
Tablo 4.2 Yöntemlerin İstatistiksel Karşılaştırılması.....	52
Tablo 4.3. Uzunlukların MAE İstatistikleri.....	53
Tablo 4.4. Uzunlukların MAPE İstatistikleri.....	53
Tablo 4.5. Uzunlukların MSE İstatistikleri	53
Tablo 4.6. Uzunlukların RMSE İstatistikleri.....	53
Tablo 4.7. Uzunlukların Standart Sapma Karşılaştırılması	56

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kalman filtresi, insan hareket analizi, veri iyileştirme

İnsan hareketinin algılanması, tanınması ve saklanması; yapılan işin doğruluğunun ölçülmesi veya iyileştirilmesi için büyük öneme sahiptir. İnsanın hareketi esnasındaki davranışlarının incelenmesi için birtakım analizler yapılmaktadır. Bu süreçte ilk ve en önemli aşama hareketin sayısallaştırılma kısmıdır. Sayısallaştırma, hareketin bilgisayarın da anlayacağı şekilde rakamlarla ifade edilmesidir. Sayısal veri elde edilirken, verinin gerçek ölçümlere yakınlığı son derece önemlidir.

Sensör teknolojilerinin gelişmesiyle, vücuda takılan algılayıcıların yanı sıra derinlik haritası çıkaran algılayıcılar, görüntü işleme yazılımlarıyla da desteklenerek insan hareketlerini 3B modellenmesine imkân sağlamaktadır. Birçok elektronik sistemde olduğu gibi hareket yakalama algılayıcılarında da ölçüm hataları gözlenebilmektedir. Bu hataların giderilmesi ve kabul edilebilir seviyeye indirilebilmesi için farklı filtreler ve algoritmalar geliştirilmesi gerekmektedir. Bazen de algılayıcılardan gelen veri akışı kısa süreliğine kesintiye uğrayabilmektedir. Bu durumlarda da tahmin algoritmaları kullanılması gerekmektedir. Kalman Filtresi (KF) önceki verilere göre sonraki veriyi tahmin edebilen güçlü bir algoritmadır.

Bu çalışmada kişilerin gerçek vücut uzunlukları ölçülmüş, aynı uzunluklar insan hareket algılayıcısından elde edilen eklem koordinatlarına göre hesaplanmış ve gerçek vücut uzunlukları ile karşılaştırılmıştır. Bu iki değer için ortalama mutlak hata oranları hesaplanmış ve hata oranının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen ölçüm hatalarını minimize edebilmek ve daha gerçekçi ölçümlere ulaşabilmek için, bu sisteme özel bir filtre tasarlanması gerekmektedir. Ölçüm hatalarını optimum hale getirebilmek için en yaygın kullanılan filtrelerden biri Kalman Filtresi'dir. KF, doğrusal sistemlerdeki hataları düzeltmelerde çok güçlü olmakla beraber, doğrusal olmayan sistemlere de genişletilmiş kalman filtresi (GKF) ile çözüm üretebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı insan hareket algılayıcısından gerçek zamanlı ölçülen veriler için kalman ve genişletilmiş kalman filtresi tasarlanarak, gerçek verilere çok daha yakın değerler üretilmesidir. İnsan hareketleri, doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğundan GKF uygulandığında ölçüm hatalarının kabul edilebilir seviyelere indiği gözlemlenmiştir. Performans değerlendirmesi için ortalama mutlak hataya bakıldığında; Kinect cihazı ile yapılan ölçümlerde %19,962 hata oranı, Kalman filtresi kullanılarak %14,002 hata oranı, genişletilmiş kalman filtresinde %7,693 olarak hesaplanmıştır. Bu sayede kişilerin gerçek ölçümleri alınmaksızın sadece bir algılayıcı ve geliştirilen yazılım aracılığıyla adaptasyonu kolay, zaman ve mali açıdan tasarruf sağlanan, gerçek zamanlı ve doğru ölçüm yapabilen insan hareket yakalama sistemi geliştirilmiştir.

IMPROVING HUMAN KINEMATIC DATA USING KALMAN FILTER

SUMMARY

Keywords: Kalman filter, human motion analysis, data optimization

The detection, recognition and storage of human movement; It is of great importance for measuring or improving the accuracy of the work done. Some analyzes are made to examine the behavior of people during their movements. The first and most important stage is the digitization part of the movement. While obtaining numerical data, the proximity of the data to the actual measurements is extremely important.

With the development of sensor technologies, in addition to the sensors worn on the body and depth map sensors are allowing 3D modeling of human movements, also supported with image processing software. Measurement errors can be observed in motion capture sensors as in many electronic systems. Different filters and algorithms must be developed in order to eliminate these errors and reduce them to an acceptable level. Sometimes the data flow from the sensors may be interrupted for a short time. In this case, estimation algorithms should be used. Kalman Filter (KF) is a powerful algorithm that can predict next data based on previous data.

In this study, the real body lengths of the individuals were measured, the same lengths were calculated according to joint coordinates obtained from the human motion sensor and compared with their actual body lengths. Average absolute error rates were calculated for these two values and it was observed that the error rate was high. In order to minimize the measurement errors obtained and to reach more realistic measurements, a special filter should be designed for this system. One of the most commonly used filters to optimize measurement errors is Kalman Filter. Although KF is very powerful in correcting errors in linear systems, it can also produce solutions for nonlinear systems with extended Kalman filter (GKF).

The aim of this study is to design a Kalman and Extended Kalman filter for real-time measured data from a human motion sensor, and produce values much closer to real data. Since human movements have a non-linear structure, it has been observed that measurement errors decrease to acceptable levels when GKF is applied. Mean absolute percentage error was used for performance evaluation; It was calculated as 19.962% error rate in measurements made with Kinect device, 14.002% error rate using Kalman filter, and 7.693% in Extended Kalman filter. In this way, a human motion capture system, which is easy to adapt, saves time and money, and can perform real-time and accurate measurements, has been developed through only one sensor and the software developed without taking actual measurements of the persons.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsan hareketinin yakalanması ve analiz edilmesi bilgisayar görmesinin en temel konularından birisidir. Ölçüm verilerinin elde edilmesinde zaman ve mali kayıplar ile birlikte, seçilen yöntem ve/veya uygulamadaki hatalardan kaynaklı elde edilen verinin güvenilirliği problemleri yaşanabilmektedir. Bundan dolayı kullanılan teknoloji ve yöntemlere ilginin oldukça arttığı gözlemlenmektedir.

Son yirmi yılda insan hareketlerinin algılanması ve analizinde önemli gelişmeler görülmüştür. Bu konuda başta bildiri, makale, dergi, kitap olmak üzere literatürde oldukça fazla çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Alandaki çalışmaları sınıflandırmak için araştırmacılar, model türü (örneğin, çubuk şeklinde, hacimsel, istatistiksel), izleme alanının boyutu (2-D, 3-D) gibi kriterler kullanmışlardır [1, 2]. Bazı çalışmalarda ise, tanımlanacak eylemin karmaşıklığı kullanılarak (jest, eylem, etkileşim, grup etkinliği vb.) sınıflandırma yapılmaktadır [3]. Literatürdeki bazı mevcut araştırmalar ise sensör çeşitliliği (görünür ışık, kızılötesi, menzil vb.), sensör çokluğu (monoküler, stereo vb.), algılanacak kişi sayısı, izlenen uzuv sayısı, algılanacak nesnenin yapısı (sert, sert olmayan, elastik vb.) şeklinde sınıflandırılmıştır [4–7].

Aggarwal, 1970'lerden beri insan hareketini tanıma alanında çok önemli çalışmalar yapmış ve alanda adından bahsedilmesini sağlamıştır. M.S.Ryoo ile 2011 yılında yaptığı son inceleme makalesinde, insan hareketini tanıma yaklaşımlarını tek katmanlı ve hiyerarşik yaklaşımlar olarak iki gruba ayırmıştır [3].

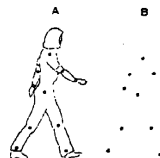
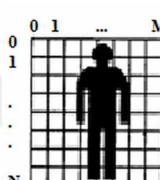
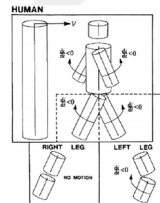

Cédras ve Shah 1995 yılında, hareket temelli tanıma işlemini iki adımda tanımlamışlardır. İlk adımda hareket bilgisi çıkarma ve ikinci adım bilinmeyen bir girdinin yapılandırılmış modelle eşleşmesi işlemi gerçekleştirilmektedir [8]. Gavrila

1999 yılında literatürü üç kategoriye ayırmıştır. Bunlar belirgin şekil modeli olmayan 2-B yaklaşımlar, belirgin şekil modelli 2-D yaklaşımlar (genellikle çubuk figürler) ve 3-B yaklaşımlardır (yüzey tabanlı veya hacimsel) [1]. T. B. Moeslund 2001 ve 2006 yıllarında bilgisayarlı görüşe dayalı insan hareketi analizi üzerine iki araştırma makalesi yayınlamıştır. Her iki çalışmada da kullanılan sınıflandırma; başlatma, izleme, poz tahmini ve tanıma adımlarından oluşmaktadır. Yazar, insan hareketiyle ilgili uygulamaları gözetim uygulamaları (örneğin, insan sayımı, tıkanıklık analizi), kontrol uygulamaları (örn. insan bilgisayar arayüzleri, ileri düzey oyun) ve analiz uygulamaları (örn. ortopedik hastaların otomatik analizi ve içeriğe dayalı erişim) olarak gruplandırmıştır [7, 9].


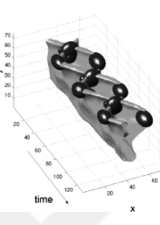
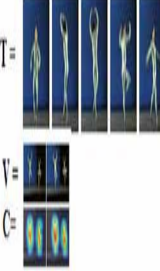

Wang, Hu ve Tan (2003) insan hareket analizi için üç aşamalı bir çerçeve önermiştir. Bunlar insan tespiti (hareket segmentasyonu, nesne sınıflandırması), insan takibi (model tabanlı, bölge tabanlı, özellik tabanlı, aktif kontur) ve insan davranış (Dinamik Zaman Bükme (DTW), Saklı Markov Modeli (HMM), Sinir Ağı ve semantik tanım) anlayışıdır [10].

Kale ve Patil, 2016 yılında yaptıkları çalışmada insan hareket analizi alanında seçilmiş makaleleri Tablo 1.1.'de sunmuşlardır. Her makale, temsil için yeni bir metodoloji önermekte veya farklı bir tanıma yöntemine yer vermektedir. Örnek makaleler, alanda yeni başlayacaklar için küçük bir özet turu sağlayacak şekilde seçilmiştir. Tabloda yazarlar ve yayın yılı bilgilerine ilaveten temsili bir resim, kullanılan özellik veya veri setleri, tanıma yöntemi ve kısıtlar açıklanmıştır [11].


Tablo 1.1. Literatür Özeti [11]

Sıra No	Yazar Yılı	Resimsel gösterim	Kullanılan özellikler ve Veri Kümesi	Tanıma Yöntemi	Açıklamalar / Katkılar	Kısıtlamalar
1	G. Johansson 1973		<ul style="list-style-type: none"> • 2-B, Kinematik. İnsan vücuduna LED'ler takılır. • Yürüme hareketi karanlıkta kaydedilir ve TV'de oynatılır. 	-	<ul style="list-style-type: none"> • İnsanın 2-B hareket modellerinden hareketi tanıyabildiğini kanıtlar. • Hareket tanıma özelliği olarak ilk defa eklem kullanılmıştır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deney, LED takılarak ve sonuçların kaydedilmesiyle gerçekleştirildi.
2	Yamato 1992		<ul style="list-style-type: none"> • İnsansı Görüntü Modeli. • Bir kafes içindeki siyah piksel sayısının, beyaz sayısına oranı. • 5 kişi × 6 tenis vuruş × 10 kez (300 Test verisi). 	• Ayrık HMM ile aşağıdan yukarıya yaklaşım.	<ul style="list-style-type: none"> • Tanıma oranı eğitim modeline bağlıdır. Aynı eğitim ve test verileri için %96 sonuç verirken, farklı eğitim ve test verileri için % 70,8 sonuç vermektedir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Değerlendirilecek her bir eylem için yeni model tasarlanması gerekmektedir. • Ele alınan veri kümesi çok küçüktür. • Yalnızca 2B görüntülerde denenmiştir.
3	D. Marr 1978 Rohr 1994		<ul style="list-style-type: none"> • Silindirik ilkelere dayanan, 3B Kinematik Hiyerarşik model. • Yürüme şekli için bir yayaya ait gerçek ve sentetik veriler üzerinde test edilmiştir. 	• Dinamik Zaman Bükme (DTW)	<ul style="list-style-type: none"> • 3 boyutlu şekillerin temsili ve tanınmasını önerildi. • Hareketin tanınması için vücut parçalarının hareket yörüngeleri kullanıldı. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kişinin görüntü düzlemine paralel yürüdüğünü varsayılmıştır. • Görüntü düzlemine paralel olmayan kişi ve farklı bakış açısı dikkate alınmaz.
4.	Rao & Shah 2001		<ul style="list-style-type: none"> • 3-B XYT uzay zaman yörüngesi. • Farklı bir bakış açısıyla yakalanan 7 kişinin 60 farklı eylemi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek katmanlı, Uzay-zaman yörüngeleri. • Yörüngeler eğrilik deseni ve şablon eşleme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ana katkı, değişmezliği tanımadır. • Önerilen yöntemler daha genel durumlarda başarı göstermedi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yöntemler genel durumlarda başarısız olabilir. • Sadece 7 kişilik yörüngelerde denemeler yapıldı. • İnsan antropometrisindeki değişiklik ile değişebilir.

Tablo 1.1. (Devamı)

Sıra No	Yazar Yılı	Resimsel gösterim	Kullanılan özellikler ve Veri Kümesi	Tanım Yöntemi	Açıklamalar / Katkıları	Kısıtlamalar
5	Bobick, & Davis 2001		<ul style="list-style-type: none"> • MEI (Hareket enerjisi görüntüsü) ve MHI (Hareket geçmişi görüntüsü). • Aerobik basamaklar ve çocuk odaları. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek katmanlı, • Uzay zaman yaklaşımı • Şablon eşleme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yeni hareket temsilleri önerilmiştir: MHI ve MEI. • Ekranda çocukların yansımaları görünüyordu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bu yaklaşım eylem değişikliğine, görünüm ve boyut değişkenliğine çok duyarlıdır.
6	Laptev and Lindeberg 2003		<ul style="list-style-type: none"> • Çıkarılan uzay-zamansal noktaları XYT'de temsil edilir. • Açık alanda yürüme hareketi için uygulanır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek katmanlı alan - zaman yerel özellikleri. • Uzay-zamandaki iki nokta arasındaki öklid mesafesi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yürüyen insanların poz tahmini. • Üst üste binme ve dinamik arka plan varlığında hareketi tespit etti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yöntem Galilean dönüşümündeki değışkendir. • Sonuçlar hareket yönündeki değışikliğe bağılı olarak değışebilir. • Karmaşık hareket için yaklaşım başarısız olabilir.
7	Shechtman & Irani 2005		<ul style="list-style-type: none"> • Uzaysal-zamansal eklemeler. • Video veri tabanlarında yürüyüş, havuzda dalış ve bale görüntülerini sorgulamak için test edilmiştir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek katmanlı, Uzay-zaman-hacim korelasyonu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Büyük video dizilerine kıyasla küçük video şablonları. • Video dizisindeki büyük geometrik bozulma değışkeni. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ölçek ve yönelimde önemli değışiklikler yapmaz.
8	Ryoo & Aggarwal 2006		<ul style="list-style-type: none"> • Bağlamdan Bağımsız Dilbilgisi (CFG) • 8 işlem için test edilmiştir: yaklaşma, ayrılma, sarılmak, yumruk, tekme, itme, el sallama 	<ul style="list-style-type: none"> • Bağlamdan bağımsız dilbilgisi denetimi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deneyler, sistemin çok yüksek tanıma oranıyla sürekli ve özyinelemeli kompozit eylemleri ve etkileşimleri anladığını göstermektedir 	<ul style="list-style-type: none"> • Özyinelemeli etkileşim için tanıma oranı hala daha düşüktür.

Tablo 1.1. (Devamı)

Sıra No	Yazar Yılı	Resimsel gösterim	Kullanılan özellikler ve Veri Kümesi	Tanıma Yöntemi	Açıklamalar / Katkılar	Kısıtlamalar
9	Chaaaraoui 2013		<ul style="list-style-type: none"> • 20 adet iskelet bağlantı verisinin ve silüet şeklinin kaynaşması S radyal kutulara bölünmüştür. • MSR Action3D 10 kişiye 20 farklı eylem 3 tekrara kadar uygulanmıştır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eğitim için anahtar pozları kullanılır. • Ardaşıl resimlerin eşleşmesini test etmek için DTW algoritmasını kullanır. 	<ul style="list-style-type: none"> • İskelet yaklaşımı silüetden daha iyi sonuçlar göstermiştir. • Özellik birleştirme daha iyi performans göstermiştir (AS1-92.38%, AS2- 86.61%, AS3 96.40%). 	<ul style="list-style-type: none"> • Önerilen yaklaşım eylem sınıfına duyarlıdır.

Vizyon temelli insan hareketlerini tanıma, kamerayla çekilen içeriklerdeki insanların hareketlerini sayısallaştırmak ve analiz etmek amacıyla geliştirilmiş sistematik bir yaklaşımdır. Başlıca biyomekanik, yapay görme, yapay zekâ, örüntü tanıma ve görüntü işleme gibi alanlardan oluşmaktadır. Sosyal, ticari ve eğitimsel faydaları olan disiplinler arası zorlu bir alandır. İnsan hareketinin tanınması geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Spor, tıp, akıllı gözetim, içerik tabanlı video depolama ve alma, insan-makine arayüzleri, video konferans, sanat, eğlence ve robotik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 3–5].

Günümüz kameralı gözetim sistemlerinde, video içerikleri insan operatörler tarafından sürekli olarak izlenmektedir. Artan kamera sayısı ile insanların tüm içeriği izlemesi imkânsız hale gelmiştir. Videolar genellikle bir kaza, sıkıntılı durum veya aksilik gerçekleşikten sonra olayı analiz etmek için incelenmektedir. Bu nedenle, güvenlik kurumlarında yoğun bir akıllı gözetim sistemi gereksinimi duyulmaktadır. Akıllı gözetim sistemleri bir olayı çevrimiçi olarak analiz edebilmekte ve bilgisayar tabanlı insan hareketi ile davranış analizi kullanarak mahremiyet uygunluğu da sağlanabilmektedir. Askeri bölgeler, alışveriş merkezleri, tren istasyonları, hastaneler, resmi veya ticari binalar gibi alanlarda kişileri sayma veya tıkanıklık analizinde, anormal davranışların tespitinde, erişim kontrolünde akıllı gözetim sistemlerine gereksinim duyulmaktadır [6, 12]. Günümüzde insanların yaşam kalitesini artırmak

için kurulan akıllı ev sistemleri bilgisayar vizyonu topluluğunun önem verdiği konuların başında gelmektedir [13].

Üretim sektöründe zaman ve maliyeti aza indirmek adına insanların yaptığı birçok iş robotlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Yapay zekanın da etkisiyle kendi kendine karar verebilen, insan hareketlerini taklit edebilen, otonom davranabilen robot üretimi çalışmalarına hız verilmiştir. İnsan hareket analizi, robotun insansı robot kontrolü için, bir robottaki sanal ve artırılmış ortamlardaki insan hareketlerini taklit etmek için önemli bir rol oynamaktadır [14].

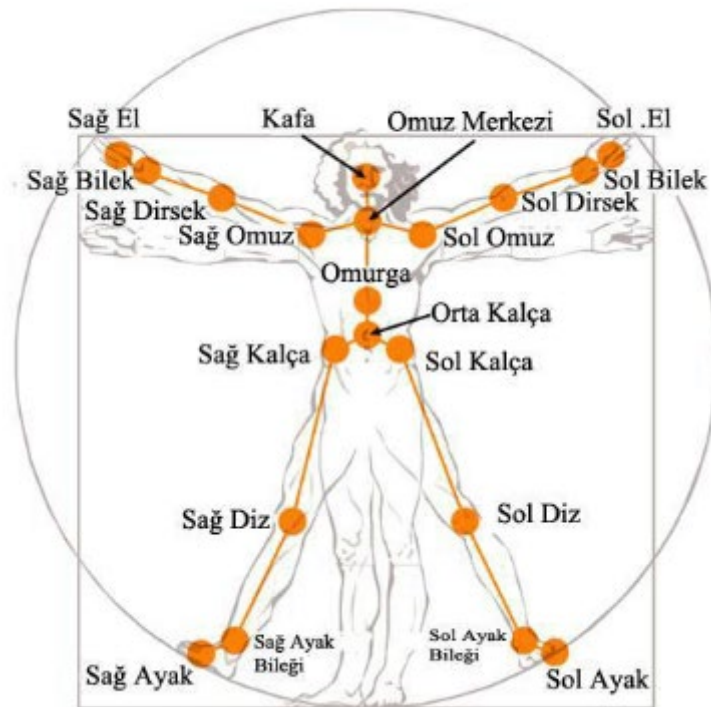
Tıp alanında ise ortopedi, nöroloji, kas-iskelet sistemi hastalıkları, vücut duruşu ve zindelik analizi için insan hareket tanıma özelliği kullanılmaktadır [15–17]. Rehabilitasyon hareketlerinin otomatik analizini sağlamak için, hareket tekrarlarının doğru bir şekilde tanımlanması ve bölümlere ayrılmasında insan hareket analizi sistemi kullanılmaktadır [18].

İnsan hareket tanımlama, sporcu hareketlerini analiz etme ve sporcu eğitimi için uygun fiyatlı, verimli bir altyapı tasarlamaya olanak sağlamaktadır [19]. Watanabe ve arkadaşları spor tesislerine gitmeden, bir uzmanın geri bildirim yapabileceği rehabilitasyon egzersiz ortamı tasarlamışlardır [20].

Fizyoterapi, fiziksel yollarla hastalık ve sakatlığı önlemek için değerlendiren, teşhis eden, tedavi eden ve çalışan bir sağlık mesleğidir. Fizyoterapistler hastalarıyla birlikte çalışır ve hareket bozukluklarının üstesinden gelmelerine yardımcı olmaktadır. Fizyoterapi tedavisi hastanelerde veya tıp merkezlerinde klasik yöntemlerle yapılmakta ve hastalar bu merkezlere gitmek zorunda kalmaktadırlar [21]. Ancak, fizyoterapi görece hastaların çoğunun hareket engeli mevcuttur. Bu nedenle ulaşım da büyük bir sorun haline gelmektedir. Dao, Patanapanich, Eski ve arkadaşları yaşlıların egzersizlerini terapi merkezlerine gitmeden gerçekleştirebilmeleri için bir izleme sistemi önermişlerdir [21–23]. Bu tür sistemlerin yaygınlaşması kesinlikle hastalar ve yaşlılar için faydalı olacaktır.

Microsoft Kinect algılayıcısı gibi görüntü ve derinlik bilgisi üreten kameralar son zamanlarda birçok iç mekân robotu ve bilgisayar görme uygulamalarında büyük başarı elde etmektedirler. Bu tür kameralar yalnızca küçük bir aralıkta hassas derinlik ölçüleri üretebilmektedir. Bununla birlikte, hedef izin verilen mesafeden daha uzakta olduğunda ölçümlerde gürültü oluşabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, profesyonel uygulamalarda kinect cihazından alınan ham ölçümlerin doğruluğu yeterli gelmemektedir.

Microsoft tarafından geliştirilen insan hareket algılama sensörü (Kinect) sayesinde Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi kişilerin 20 adet eklem noktası kişiye herhangi bir aparat takılmaksızın algılanabilmektedir. Kinect cihazı yakaladığı her bir çerçeveyi birbirinden bağımsız olarak değerlendirmektedir. Daha önceki konumları değerlendirmeye almadığı için özellikle görüş alanında olmayan veya üst üste binen noktaların tahmininde sorun yaşamaktadır. Bu sorunu giderebilmek ve daha gerçekçi ölçümler sağlayabilmek için önceki durumları da değerlendirmeye alarak bir sonraki konumu tahmin edecek bir filtre uygulanması gerekmektedir.



Şekil 1.1. Kinect'in Algıladığı Vücut Noktaları

Hangi yöntem olursa olsun veri elde edilirken genellikle gürültü veya ölçüm hataları ortaya çıkmaktadır. Gürültü veya ölçüm hatalarının kaynaklarını tanımlayabilmemiz için veri elde ediminde kullanılan yöntemin (sensör vb.) yapısını ve özelliklerini incelemek önem arz etmektedir. Kullanılan yöntem, hatanın istatistiksel dağılımına, verinin büyüklüğüne göre literatürde birçok hata giderme algoritmaları yer almaktadır [24–26]. Bu yöntemlerin arasında doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde başarılı şekilde çalışan en yaygın kullanılan yöntemlerin başında bayes teoremini temel alan kalman filtresi gelmektedir.

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [27], üç eksenli jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre ile manyetik atalet ölçüm birimlerini (MIMU'lar) kullanarak insan vücudu bölümlerinin yönünü tahmin etmek için uyarlanabilir bir Kalman filtreleme yaklaşımı sunmaktadır. Dış ivmelerin ve ferromanyetik bozulmaların olumsuz etkilerini azaltmak için iki paralel Adaptif Kalman Filtresi uygulamışlardır.

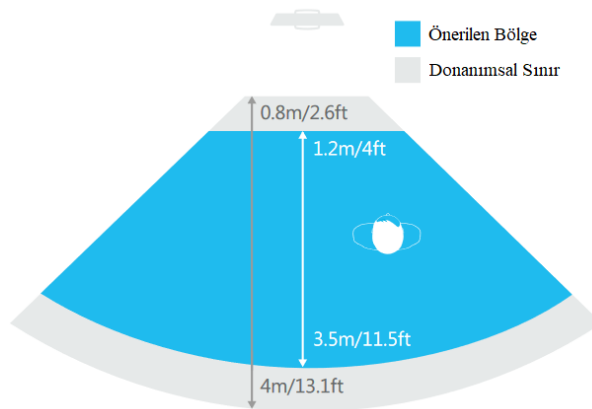
Yun ve arkadaşları yayınladıkları iki makalede [28, 29], insan vücudu hareketlerinin gerçek zamanlı takibi için bir Kalman filtresi geliştirmişlerdir. Katı gövde oryantasyonunun gerçek zamanlı takibi için; MARG (Manyetik, Açısal Hız ve Yerçekimi) denilen üç boyutlu yerel manyetik alanı, üç boyutlu açısal hızı ve üç boyutlu ivmeyi ölçen sensörleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sensörden alınan verilerdeki gürültüleri giderebilmek için Kalman Filtresi tasarlamışlardır.

Bu çalışmada, insan hareket yakalama teknolojilerinin iyileştirilmesi konusu ele alınmıştır. Sporcuların gerçek uzunlukları ölçülerek, temel bir hareket olan çömelme (squat) hareketi yaptırılmış ve Kinect cihazı ile aynı uzunluklar hesaplanmıştır. Ölçümün iyileştirilmesi için Bayesçi kestirim tabanlı bir filtre olan KF ve GKF tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadaki temel ve önemli katkı ise Microsoft firmasının ürettiği Kinect'in, yakalanacak noktadaki çakışma ve alan dışına çıkma gibi durumlara çözüm üretmek için Kalman Filtresi tasarlanarak veri analizi yapılabilir seviyelere getirilmiştir. Kinect

cihazının donanımsal ve yazılımsal olarak çözemediği çakışma ve kısa süreli alan dışına çıkma problemlerine, Kalman Filtresi tasarlayarak çözüm üretilmiştir. Bu sayede ucuz ve kurulum gerektirmeyen portatif bir insan hareket yakalama sistemi geliştirilmiştir.

Microsoft Kinect cihazının, donanımsal yapısı ve algoritması gereği belirli çalışma kısıtları mevcuttur. Kinect $57,5^\circ$ yatay ve $43,5^\circ$ dikey görüş açısına sahiptir. Derinlik sensörü ile normal kipte, 0,8m ile 4m mesafe aralığındaki nesnelere algılayabilse de Şekil 1.2.'de görüldüğü gibi 1,2m ile 3,5 metre arasında çalışması önerilmektedir. Adayın bu çalışma alanının içerisinde hareket etmesi gerekmektedir. Diğer bir kısıt ise cihazın algoritmasından kaynaklı olarak, aday Kinect cihazına yüzü dönük pozisyonda olması gerekmektedir. İskelet algılanırken derinlik bilgisinden de faydalanıldığı için aday ile Kinect arasında herhangi bir nesne olmamalı ve aday net bir şekilde görülmelidir. Kalman filtresinin parametrelerinin, tasarlanan sisteme göre güncellemesi için başlangıçtan sonra bir süre geçmesi gerekmektedir. Buna doyuma ulaşması denilmektedir ve başlangıç sahneleri (frame) hesaplamaya katılmamalıdır. KF güçlü bir tahmin edici olmasına rağmen önceki değerlere göre yeni değer tahmin ettiğinden, uzun süreli çakışma veya veri kaybı yaşandığında tahminler gerçek verilerden uzaklaşabilmektedir. Bu yüzden uzun süreli çakışma olabilecek hareketlerin ölçümünden kaçınılmalı veya hesaplamalar için dikkate alınmalıdır.



Şekil 1.2. Kinect Derinlik Çalışma Mesafesi

Kinect ve geliştirilen filtrenin kısıtları değerlendirildiğinde adayın yüzünün sensöre dönük olması, çakışma veya veri kaybının kısa süreli olması gerekmektedir. Bu kriterler çerçevesinde insan hareket analizinde en temel hareketlerden biri olan çömelme (squat) hareketinin incelenmesine karar verilmiştir. Çömelme hareketi aynı zamanda alt ekstremitte (kalçadan başlayan, uyluk, bacak ve ayağı içeren uzuv) kuvvet gelişimi için kullanılan en önemli hareketlerden birisidir. Halter, tenis servis atışı, ergonomi gibi birçok hareketin eğitilmesi aşamasında çömelme hareketinden faydalanılmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmada, örnek hareket olarak çömelme hareketinden faydalanılmıştır.

Tezi organize ederken ikinci bölümde, insan hareket analizindeki temel kavramlar, hareket analizinin önemi ve kullanım alanlarından bahsederek, insan hareketini yakalama yöntemleri ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde Bayesçi filtre yaklaşımının temel mantığı ve en yaygın kullanılan Bayesçi filtrelerden biri olan Kalman filtresinin yapısı ele alınmıştır. Hareket analizindeki konum bilgileri doğrusal veriler olmadığından, GKF hakkında da bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tasarlanan sistem hakkında bilgi verilerek, sistemin matematiksel modelinin oluşturulması, Kinect cihazından alınan bilgilerin analiz edilmesi, geliştirilen KF ve GKF'nin modeli ve parametrelerinin belirlenmesinden bahsedilmiştir. Geliştirilmiş sistem ile Kinect cihazının ürettiği veriler karşılaştırılarak, istatistiksel olarak karşılaştırılması da bu bölümde verilmiştir.

Son bölümde ise bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sistemin sonuçları verilmiş, bu çalışmanın farklı alanlara uyarlanmasına ve gelecek çalışmalara ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. İNSAN HAREKET ANALİZİ

Hareket yakalama, yüksek hızlı kamera veya çeşitli elektronik ekipmanlar kullanarak, nesnelerin veya insanların hareketlerini algılayıp, sayısallaştırıp, kaydetme işlemidir.

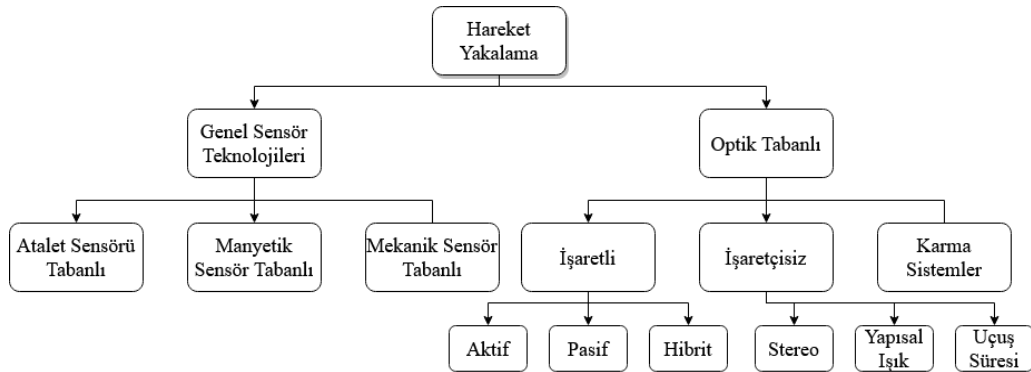
Üç boyutlu insan hareket analizi, koordinat sisteminde yerleri tespit edilen eklemlerin veya vücut bölgelerinin, belirlenen noktalardan veya birbirlerinden uzaklıkları, açığa çıkan hızları, yer değiştirmeleri, geçen süreleri araştırmak için kinematik incelemeler yapılmasıdır. Kinematik ise hareketin, ona etki eden kuvvetleri incelemeksizin konumunu, hızını, ivmesini ve zamana göre değişimini incelemektedir. Bu sebepten dolayı literatürde insan kinematik analizi ismiyle de yer almaktadır.

İnsan hareket analizi çok genel bir terimdir ve çok fazla alanda kullanılmaktadır. İlgili vücut bölümlerinin sayısına ve hareket süresine göre hangi yöntemin tercih edileceğine karar verilmesi gerekmektedir. Örneğin insan-bilgisayar etkileşiminde genellikle sadece el hareketlerini incelenirken; karmaşık aktivite, spor, dans gibi uygulamalarda tüm vücut bölümleri incelenmektedir. İnsan hareketi kavramsal olarak jestler, eylemler, etkileşimler, bireysel ve grup aktiviteleri olarak kategorize edilebilmektedir. Temsil ve tanıma yöntemlerine videolardaki insan vücudunun izlenmesi ile karar verilmektedir. Temsil için en yaygın kullanılan yaklaşımlar 2B kinematik/çubuk figür, 3B kinematik/şekil modeli ve görüntü modeli olarak sınıflandırılabilir. Kinematik modelleme yönteminde insan; insanın eklem sayısı, serbestlik derecesi, uzuv uzunluğu gibi özellikler ile temsil edilmektedir. Görüntü modelinde ise insanın kendi görüntüsü üzerinde şekil veya bölge gibi özellikler çıkartılmakta veya saklanmaktadır. Temsilin yanı sıra hareketin karmaşıklığından da tanıma işlemine karar verilebilmektedir. Basit eylemlerde sıralı veya tek katmanlı zaman uzayı yaklaşımları kullanılabilir. Karmaşık eylemlerde ise çok katmanlı yaklaşımlar kullanılması gerekmektedir. İnsan hareketi tanıma ve analizi teknikleri çok ilerleme sağlamasına rağmen, hala gelişimini tamamlamamıştır. Bu alandaki çalışmalar devam

etse de genel kullanıma hazır bir teknoloji çözümü üretilememiştir. Nesnelerin üst üste gelmesi, gölgeler, aydınlatma ve ölçüm gürültüsü gibi parametreler insan hareket algılama tekniklerinin geliştirilmesinde çözümü aranan problemlerin başında gelmektedir [11].

3B insan yürüyüşünün analizi ilk kez 1891’de, fizikçi Otto Fischer ve anatomist Wilhelm Braune tarafından, matematiksel hesaplama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En bilinen çalışmaları 1985 yılında yaptıkları “İnsan Hareketi” (Der Gang des Menschen) isimli çalışmadır. Bu çalışmada, 3B fotografik yöntemler kullanılmış ve hareket bilimlerinde bilimsel çalışmaların temelini oluşturmuştur. Diğer bir çalışmalarında ise insan vücudundaki anatomik referans noktalarını belirlemişler ve literatürde bu noktaları doğru tanımlayan ilk kişiler olarak kabul edilmektedirler [30].

İnsan hareket yakalamayı Şekil 2.1.’de olduğu gibi, sensör teknolojileri ve optik yöntemler olmak üzere iki ana kategoride inceleyebiliriz. Her teknolojinin güçlü yanları olsa da olası her kullanım için mükemmel olan tek bir hareket yakalama teknolojisi yoktur.



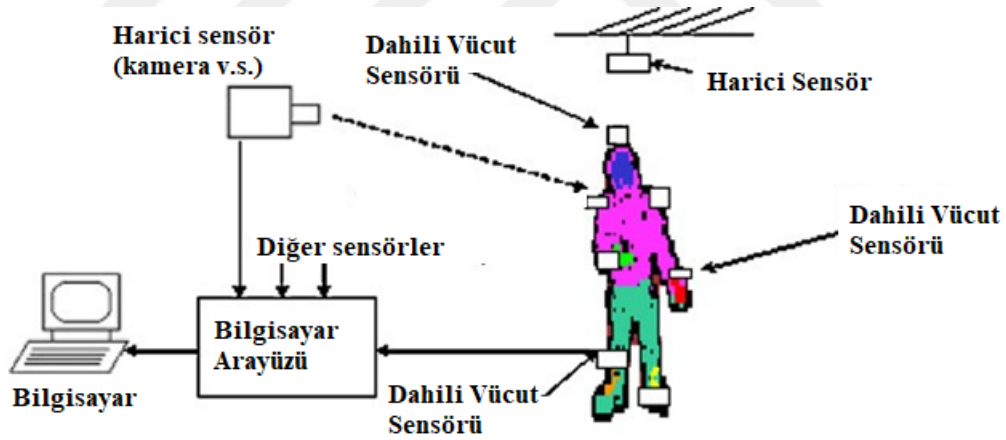
Şekil 2.1. İnsan Hareketi Yakalama Yöntemleri

2.1. Genel Sensör Teknolojileri

İnsan hareketini yakalamada, gelişmiş hareket sensörü teknolojilerini kullanarak, insan vücudunun (veya bir kısmının) poz değişikliklerini dinamik olarak temsil eden

ve gerçek zamanlı veriler üreten sistemlerdir [31]. Şekil 2.2.'de, görsel (kamera v.s.) ve dahili vücut sensörleri kullanılarak insan hareketlerinin tespit edilebildiği bir hareket izleme sistemi gösterilmektedir. Hareket sensörü teknolojisi, hareketin doğru tanımlanmasını, izlenmesini ve sonradan işlenmesini içermektedir. Günümüzde basınç, manyetik ve ataletsel sensörler (ivmeölçerler, jiroskoplar vb.) yaygın olarak kullanılan konum belirleme sensörleridir.

Görsel olmayan yakalama sistemlerinde kullanılan sensörler, hareket bilgisi toplamak için insan vücuduna yapıştırılmaktadırlar. Bu sensörler genellikle mekanik, eylemsizlik, akustik, radyo veya mikrodalga ve manyetik tabanlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bazıları el veya ayak parmağı hareketleri gibi küçük genlikleri algılayabilecek kadar küçük olabilmektedir. Genel olarak, her tür sensörün kendi avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Yöntemine, ölçülecek veriye ve bölgesine bağlı olarak hangi çeşit sensörlerin kullanılması gerektiği önem taşımaktadır [32].



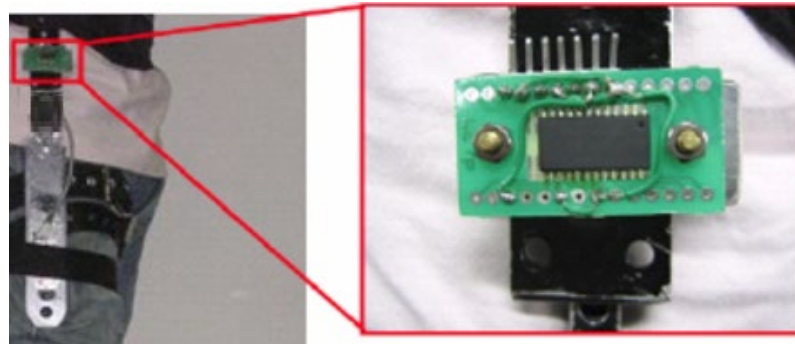
Şekil 2.2. Örnek Bir İnsan Hareketi İzleme Sistemi [26]

2.1.1. Atalet sensörü tabanlı sistemler

Bu teknoloji, küçük ataletsel sensörler kullanılarak, biyomekanik modeller ve sensör füzyon algoritmaları kullanımına dayanmaktadır [33]. Atalet sensörlerinin (atalet yönlendirme sistemi) hareket verileri, genellikle hareketin kaydedildiği veya görüntülediği bir bilgisayara kablosuz olarak iletilmektedir. Çoğu atalet sisteminde, dönme hızlarını ölçmek için jiroskop, manyetometre ve ivmeölçer kombinasyonunu

içeren atalet ölçüm birimleri (IMU'lar) kullanılmaktadır. Bu veriler yazılım yardımıyla iskelete çevrilmektedir. Optik işaretleyiciler gibi, IMU sensörleri de ne kadar fazla olursa veriler gerçeğe o kadar yaklaşmaktadır. Bu sensörler hareket ve yer değişimi bilgisini verdiği için önceki konumuna göre göreceli hareketler bilgisi hesaplanabilmektedir. Mutlak konumu ölçmek için harici kameralar, yayıcılar veya işaretleyiciler kullanılması gerekmektedir. Ataletsel hareket yakalama sistemleri, bir insanın altı serbestlik dereceli vücut hareketini gerçek zamanlı olarak yakalamakta ve manyetik sensörü de içermesi durumunda sınırlı yön bilgilerini de verebilmektedirler. Ataletsel sistemleri kullanmanın faydaları; dar alanlar, taşınabilirlik ve geniş yakalama alanları dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda yakalama yapılabilmesidir. Dezavantajları arasında ise daha düşük konumsal doğruluk ve zamanla birleşebilen konumsal sapma sayılabilmektedir. Bu sensörler elektromanyetik gürültüye duyarlıdır. Oyun geliştiricileri arasında atalet sistemlerinin popülaritesi her geçen gün artmaktadır [34].

Doğrusal veya açısal ivmeyi çıkış sinyaline dönüştürmek için ataletsel ivmeölçerler (piezoelektrik, piezoresistif veya değişken kapasitif) kullanılmaktadır [35]. Şekil 2.3'te insan hareketini 3B olarak algılayan bir ivmeölçer gösterilmektedir. İvmeölçerler fiziksel olarak küçük ve hafif tasarlandıkları için, taşınabilir aygıtlarda (ele, bacağa, başa takılan) rahatlıkla kullanılabilirler. Ayrıca, ivmeölçerlerin sonuçları karmaşık hesaplamalar gerektirmemektedir. İvmeölçerler hareketin temel ivme bilgilerine ihtiyaç duyulduğunda sorunsuz olarak çalışabilmektedirler.



Şekil 2.3. Üç Eksenli İvmeölçer

İvmeölçerler hız veya yönelimi tahmin etmek için kullanıldıklarında sensör verisindeki gürültü veya sensörün tepki süresinden dolayı sürüklenme problemine maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle, hareket izleme aşamasında dış düzeltmelere ihtiyaç duyulmaktadır [36]. Her sensörün kendi dezavantajları olmasına rağmen, mevcut diğer sensörler tamamlayıcı olarak kullanılabilir. Örneğin, konum hesaplamasının doğruluğunu artırmak için, mobil robotların tasarımında ivmeölçerler yerine odometre (kilometre sayacı) veya küresel konum belirleme sistemleri (GPS) kullanılmaktadır.

2.1.2. Manyetik sensör tabanlı sistemler

Manyetik hareket yakalama yönteminde, kişiye bağlı alıcıların konumunu ve yönünü hesaplamak için büyük merkezi manyetik vericiler kullanılmaktadır [37]. Manyetik sistemlerde işaretleyici olarak mıknatıslar kullanılmakta ve alıcılar kamera görevi görmektedir. Sistem, işaretçilerin konumlarını manyetik akıdaki bozulmalarla tespit etmektedir.



Şekil 2.4. Bobby Bodenheimer-Manyetik Hareket Yakalama Sistemi [38]

Bu sistemlerin, mekanik hareket sistemlerinden artısı, altı serbestlik derecesine kadar ölçüm yapılabilmesidir. Önemli avantajlarından birisi de veri aktarımında ve ölçümde

tıkanmanın az olması yani gerçek zamanlı ölçüm gerçekleyebilmesidir. Eksi yönleri ise manyetik sistemler için yakalama alanının, optik sistemlerin alanına göre daha küçük olmasıdır. Diğer bir dezavantajı ise aynı alanda çalışan birden fazla aktöre sahip manyetik sistemlerde, başka bir manyetik yakalama sisteminin sensörleri tarafından oluşturulan parazit nedeniyle konum ölçümünün doğruluğunu azaltmasıdır. Ayrıca, manyetik sistemler metal nesnelere ve elektrik tesisatı, ofis donanımı veya binanın demirbaşları gibi çevresel koşullardan kaynaklanan manyetik ve elektriksel parazitlere maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle, mıknatıslar yalnızca kontrol edilebilir bir ortamda yüksek doğruluk sağlamaktadırlar. Manyetik hareket yakalama sistemleri ile, çok hassasiyet gerektiren yüz hareketleri ve ifadeleri yakalamak mümkün değildir. Sensör görevi gören mıknatıslar da oldukça pahalıdır [39]. Kişinin hareketlerini engelleyen kabloların olmasından dolayı taşınabilirliği zor olması ve mesafe arttıkça manyetik bozulmaların oluşması dezavantajları arasında sıralanabilmektedir [37].

2.1.3. Mekanik sensör tabanlı sistemler

Mekanik mocap sistemleri, doğrudan vücut eklem açılarını takip etmekte ve sensörlerin vücuda bağlanma şekli nedeniyle ‘dış iskelet hareket yakalama sistemleri’ olarak adlandırılmaktadırlar. Hareketi algılanacak aday, iskelet benzeri yapıyı vücuduna bağlayarak eklemli mekanik parçaları hareket ettirmekte, böylece eklemlerin göreceli hareketi ölçülmektedir. Bu iskelet şeklindeki algılayıcılar genellikle; birleşme noktalarında potansiyometreler olan, birbirine bağlanmış, eklemli, sert metal veya plastik malzemeden oluşan düz çubuklardan oluşmaktadırlar [39–41]. Şekil 2.5.’te MetaMotion firmasının geliştirmiş olduğu Gypsy 7 Electro isimli mekanik hareket yakalama sistemi yer almaktadır.



Şekil 2.5. Gypsy 7 Electro-Mekanik Hareket Yakalama Sistemi [40]

Bu tür yakalamanın en önemli avantajı, herhangi bir manyetik veya ışık gürültüsünden etkilenmemesidir. Aynı zamanda, sınırsız yakalama hacmine sahip gerçek zamanlı, nispeten düşük maliyetli, tıkanıklıktan arındırılmış ve kablosuz sistemlerdir. Dezavantajları ise, ekipmanın sıklıkla yeniden kalibre edilmesi gerekmesi, şeklin mutlak konumunu ve vücudun hangi yöne baktığı veya hareket ettiği ölçülememesidir. Mutlak konum ancak dönme hareketlerinden hesaplanarak bulunabilmektedir.

2.2. Görsel Tabanlı (Optik) Yakalama Sistemleri

Optik hareket yakalama (motion capture-mocap) sistemlerinde, kalibre edilmiş görüntü sensörlerinden (kamera v.b.) alınan 2B konum bilgileri, üçgenleme veya özel algoritmalar kullanarak 3B konumları hesaplanmaktadır. Konum bilgisini elde etmek için kişiye bağlı özel işaretleyiciler kullanılabilir. Her bir kameranın bakış açısına göre 2B konumları tespit edilmekte, bu veriler analiz edilerek işaretçilerin 3B koordinatları hesaplanmaktadır.

Daha yeni sistemlerde, dinamik olarak tanımlanan özellikler kullanılarak 3B veriler üretilebilmektedir. Bu yöntemde işaretçiler kullanmasına ihtiyaç yoktur. Çok sayıda

kişinin izlenmesi veya yakalama alanının genişletilmesi için daha fazla kamera eklenmesi gerekmektedir.

Optik mocap sistemlerinde hesaplanmak istenen her bir nokta için üç serbestlik derecesine (3 Dof: x, y, z konumları) sahip veriler üretilmektedir. Dönme bilgisi ise üç veya daha fazla işaretleyicinin bilgilerinden hesaplanabilmektedir. Örneğin dirsek açısını hesaplamak için omuz, dirsek ve bilek işaretçilerinin konumlarından faydalanılmaktadır [42].

Kullanıcı sayısını artırmak, tıkanıklığı azaltmak ve verileri manuel elde etme zorunda kalmadan izleme becerisini geliştirmek için atalet sensörleri ile optik sensörleri birlikte kullanıldığı hibrit sistemler geliştirilmiştir [42].

Optik mocap sistemlerinde, geliştirilmiş özel yazılımları çalıştıracak donanımlar ve yüksek çözünürlüklü kameralar gibi son teknoloji ürünleri kullanıldığından en pahalı mocap sistemlerin başında gelmektedir. Bu sistemleri kullanmanın avantajları, diğer yakalama sistemlerinin yanı sıra çok yüksek örnekleme oranına sahip oldukları için hızlı hareketlerin daha doğru şekilde yakalanmasına olanak tanınmasıdır. Örnekleme oranı genellikle kullanılan kameralara bağlıdır. Kameranın çözünürlüğü arttıkça örnekleme sayısı da aynı oranda artacaktır.

Optik mocap sistemlerinin başka bir avantajı ise, bu sistemlerin sunduğu özgürlüktür. Çünkü diğer sistemlerin aksine, kablo veya sınırlı çalışma alanı kısıtları yoktur. İşaretçiler kişi üzerinde kısıtlama veya hantal bir etki yaratmazlar. Ayrıca, işaretçiler herhangi bir direnç sağlamadığından, yakalama işleminde kullanılan işaretçi sayısının bir limiti yoktur. Fakat çok fazla işaretçi kullanılması gereksiz işlem yükü getirmektedir.

Optik mocap sistemlerinin dezavantajlarının başında, el gibi hızlı hareket eden uzuvların yakalanması veya işaretçinin diğer işaretçilerle örtüşmesi gibi durumlarda konum tespitinin zorlaşmasıdır. Bu sorun, ek kameralar veya işaretçiler yerleştirilmesiyle aşılabilsede izleme sırasında CPU için daha yüksek işlem süresi

anlamına gelmektedir. İşaretçi sayısının artması aynı zamanda izleme karmaşıklığına yol açacağı için tam bir çözüm de üretmeyebilmektedir. Kullanılan kamera çözünürlükleri arttıkça da işaretçinin tespit işlemi iyileşse de yine işlem süresi artmaktadır. Çoğu zaman toplanan veriler gürültü içerdiği için kullanılmadan önce değişik filtrelerden geçirilmesi gerekmektedir.

Optik sistemler, vücudun önemli noktalarına yerleştirilen işaretçiler yardımıyla veya işaretçi kullanmaksızın özel yazılım modülleri ile insan figürünü tanımaktadır. Optik takip sistemleri, gövde parçalarına işaretçilerin takılması gerekip gerekmediğine bağlı olarak işaretleyici tabanlı (marker-based) veya işaretçisiz (markerless) olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1. İşaretçi tabanlı görsel yakalama sistemleri

1973'te Johansson, biyolojik hareketini algılamak için, ünlü Hareketli Işık Göstergesi (MLD) psikolojik denemesini araştırmıştır [43]. İnsan deneklerin eklemelerine küçük yansıtıcı işaretçiler eklemiş ve bu işaretçilerin yörüngeler sırasında izlenmesini sağlamıştır. Bu deney, insan hareketi takibinde bir dönüm noktası olmuştur [35].

İşaretçilerin görüntü üzerinde hiçbir noktaya benzememesi işaretçinin kolay tanımasına imkân vermektedir. Böylelikle ölçülmek istenen eklem referans noktası her bir frame için daha belirgin hale getirilmiştir. Bu temel teori günümüzün en gelişmiş hareket izleyicilerinde hala bulunmaktadır.

İşaretçi tabanlı yakalama sistemi, insan hareketlerini izlemek için vücudun belirli noktalarına işaretleyiciler yerleştirilerek kameralardan bu işaretçilerin konumlarının hesaplandığı bir tekniktir. İnsan iskeleti oldukça eklemli bir yapıda olduğundan, bükülmeler ve dönüşler yüksek serbestlik derecesinde hareket üretmektedir. Sonuç olarak, her vücut parçası tutarsız ve güvenilir olmayan hareket tahminine yol açabilecek öngörülemez ve karmaşık bir hareket sergilemektedir. Dağınık sahneler veya çeşitli aydınlatmalar görüntüyü tek başına yorumlamayı zorlaştırmaktadır. Bu

sorunlara bir çözüm olarak işaretçi tabanlı görsel yakalama yöntemi tercih edilmektedir [35].

İşaretçili optik mocap sistemlerinin kullanımındaki en büyük dezavantaj, döndürülmüş eklemlerin veya üst üste binen işaretçilerin algılanamamasıdır. İşaretçi konumu belirlenemediği için de 3D oluşturma işlemi mümkün olamamaktadır. Bu durumu çözmek için işaretçi ve kamera sayısı artırılabilir. Bu durumda da işlem sayısı üstel olarak artmaktadır.

İşaretçili izleme sistemleri pasif, aktif veya hibrit tarzda olabilmektedir. Pasif sistemde, herhangi bir ışık üretmeyen, sadece gelen ışığı yansıtan bir dizi işaretçi kullanılmaktadır. Buna karşılık, aktif sistemdeki işaretçiler kızılötesi ışık üretmekte ve daha sonra bir kamera sistemi tarafından toplanmaktadır. Hibrit sistemlerde ise hem aktif hem de pasif olmak üzere iki tür işaretçi de bulunmaktadır.

Pasif sistemler izlenecek nesneye takılan işaretçilerin kendisine yönlendirilmiş olan ışık kaynağını (kuvvetli ışık veya kızılötesi) geri yansıtacak bir malzeme ile kaplanarak kameradan yerinin tespit edildiği sistemlerdir. Şekil 2.6.'da farklı büyüklükteki pasif işaretçiler görülmektedir. Pasif işaretçi kullanılan sistemlerde kurulum ve periyodik zamanlarda daha düzgün ölçüm yapılabilmesi için kameraların kalibre edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Kalibrasyon ile her bir kameranın merceğindeki bozulmalar hesaplanarak daha hassas ölçüm gerçekleştirilebilmektedir. Bir işaretçinin 3B konum bilgisi hesaplanırken, o işaretçinin en az 2 kameradan alınmış 2B konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Kamerayı derinlik olarak (z eksen, uzaklık) kalibre etmek için de kalibre nesnemizdeki işaretçilerin en az 2 kameradan görünerek kalibre edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.6. Farklı boyutlardaki pasif işaretçi

Qualisys firması hareket yakalama sistemleri üzerine birçok ürün geliştirmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılan ürünlerinin başında pasif işaretçi tabanlı sistemleri gelmektedir. Bu sistem her biri kızılötesi ışık demeti yayan 1-16 kameradan oluşan bir hareket yakalama sistemidir [44]. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi izlenecek nesneye küçük yansıtıcı işaretçiler yerleştirilmektedir. Kameraların yanında ve kameranın baktığı yöne doğru yanıp sönen kızılötesi ışık kaynağı bulunmakta ve daha sonra nesneden yansımaları kamera tarafından alınmaktadır. Sistem daha sonra birkaç kameradan gelen 2-B verilerini birleştirerek yansıtıcı hedefin 3B konumunu hesaplamaktadır.



Şekil 2.7. Qualisys Pasif İşaretçi Tabanlı Hareket Yakalama Sistemi

Qualisys sistemlerine benzer ve tercih edilen sistemlerden biri de Şekil 2.8.'de görünen VICON'dur. Özellikle sanal ve sürükleyici ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır [45]. Pasif işaretçi tabanlı sistemler en çok spor, oyun ve tıp bilimlerinde kullanılmaktadır. Taş ve arkadaşları yürüyüş analizi [46], Caniberk ve arkadaşları ise sporcuların 3B hareket analizini [47] VICON sistemi kullanıldığını bildiren çalışmalar yapmışlardır.



Şekil 2.8. Vicon Pasif İşaretçi Tabanlı Hareket Yakalama Sistemi

Aktif işaretçi tabanlı optik sistemlerde, kendinden ışık kaynağı olan işaretçiler kullanılmaktadır. Bu sistemde, kamera veya farklı bir kaynaktan ışık kaynağına gerek duyulmamaktadır. Bu ışık yayılımı için işaretçilerin bir güç kaynağına (pil gibi) ihtiyaç duyulmaktadır. İşaretçilerden yayılan ışıklar kameralar vasıtasıyla tespit edilerek 2B konumları elde edilmektedir. Pasif işaretçi tabanlı optik sistemlerdeki ile benzer yöntemle, iki veya daha fazla kameranın gördüğü işaretçilerin 3B konumları, üçgenleme algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır.

Pasif işaretçi kullanımında ışık işaretçiden yansırarak döndüğünden, kaynaktan çıkıp kameraya gelene kadar yaklaşık iki kamera-işaretçi mesafesi kat etmektedir. Aktif işaretçi kullanımında ise ışık işaretçiden direk kameraya gittiğinden bir kamera-işaretçi mesafesi kat etmektedir. Böylece aktif işaretçiler kullanıldığında tepkime süresi daha hassas olmakta ve kameranın ölçeceği mesafe de iki katına çıkabilmekte.

Aktif işaretçi tabanlı optik yakalama sistemlerinden en yaygın kullanılanlardan birisi Şekil 2.9.'da görünen CodaMotion'dur. CodaMotion, 3B ortamı tanınması için önceden kalibre edildiğinden yeniden kalibre edilmesine gerek yoktur. 3 m mesafe için; X ve Z eksenlerinde 1-5 mm, Y eksenini için ise en fazla 2.5 mm hassasiyete sahiptir [48]. Ölçüm sonuçları gerçeğe çok yakın olduğundan bazı akademik çalışmalarda bu sistemin çıktıları referans olarak kullanılmıştır [49, 50].



Şekil 2.9. CodaMotion aktif işaretçi tabanlı mocap sistemi

Hibrit sistemler ise hem pasif hem de aktif işaretçi kullanılan sistemlerdir. Konum bulma işleminde genellikle tek renk ışık kaynakları kullanılabildiği gibi, renkli LED işaretleyiciler de kullanılabilmektedir. Bu sistemlerde, her renk vücudun belirli bir noktasına takılmakta ve bilgisayar o rengi o nokta ile eşleştirmektedir. En eski işaretçi tabanlı sistemlerinden biri, 1980 yılında geliştirilen, dönen aynalar ve renkli cam yansıtıcı işaretleyicileri olan hem pasif hem de aktif işaretçiler kullanılan hibrit bir mocap sistemidir [42].

2.2.2. İşaretçisiz görsel yakalama sistemleri

İşaretsiz optik mocap sistemlerde, kişileri izlemek için özel ekipman kullanılması gerekmeksizin sadece optik algılayıcılar (kamaralar) kullanarak, özel yazılım algoritmalarıyla 3B elde edilmektedir. Bu algoritmaların genel mantığı, alınan görüntülerin derinlik bilgilerini hesaplamaya çalışarak 3B nesne tespiti yapmaktır.

İşaretçi tabanlı sistemlerde meydana gelen problemlerden dolayı işaretçisiz sistemlerin kullanımını tercih edilmektedir. Bu problemler, standart kemik yer işaretlerinin belirlenmesinde güvenilir olamaması; kemiklerin üstündeki yumuşak dokunun

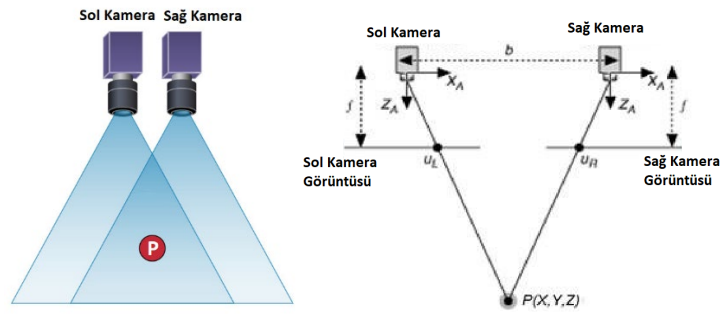
hareket edebilir ve gürültülü verilerine yol açabilmesi; işaretçinin kendi ataleti nedeniyle sallanabilmesi; işaretçilerin tamamen kaybolabilmesidir [35].

Kameralar, nesne hareketlerinin algılanmasında yüksek doğruluğu gösteren milyon piksel çözünürlüklere sahip olabilmektedir. Buna ek olarak, günümüzde kameralar düşük maliyetle kolayca elde edilebilirken, kamera parametreleri kullanıcı tarafından esnek bir şekilde yapılandırılabilir. Bu özellikler kameraların gözetim uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasında önemli sebeplerin başında gelmektedir. Kamera kullanımının dezavantajı ise bu teknikle 3B yer tespiti ve hata azaltılması için yoğun hesaplama gerektirmesidir. Bu işlem yükü aynı zamanda verinin elde edilmesinde gecikmeye sebep olabilmektedir.

Tek bir kameradan 3B görüntü elde etmeye çalışmak yeterince doğru bilgi vermediği için genellikle derinlik bilgisi veren özel kameralar kullanılmaktadır. Derinlik bilgisini kullanarak 3B görüntü elde etmek için stereo (çoklu kamera), yapısal ışık (structural light, SL) ve uçuş süresi (flight of time, FoT) metotlarını kullanan algılayıcılar tercih edilmektedir. Her metodun birbirine göre üstünlükleri olduğundan, kullanılacak alana göre tercihte bulunmak gerekmektedir.

2.2.2.1. Stereo kamera





Stereo kamera yönteminde iki veya daha fazla kameradan elde edilen görüntüler değerlendirilerek 3B konumunu hesaplanmaktadır. İnsan gözünün nesnelere 3B görme özelliği örnek alınmıştır. Her bir kameradan alınan görüntülerdeki özellikler eşleştirilmekte ve kameraların konumu, bakış açıları da hesaplama katılarak epipolar geometri yöntemiyle 3B konum bilgisi hesaplanmaktadır. İki kamera ile gerçekleştirilen stereo kameranın hesaplama modeli Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Stereo kamera modeli

Stereo kameralar genellikle hafif ve güvenilirdirler. Ancak yüksek miktardaki verilerin işlenmesi ve gönderilmesi nedeniyle yüksek işlem hızlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Başka bir deyişle, işlenmekte olan büyük miktarda veriyi işleyebilmek için Grafik İşleme Birimlerinin (GPU'lar) gereksinimi vardır. En yaygın kullanılan stereo kameralar ZED, Zed Mini, Intel D415 ve Intel D435 kameralardır. Tablo 2.1.'de yaygın kullanılan stereo kameraların algılayabildikleri maksimum ve minimum derinlik bilgileri, yatay ve dikey görüş açıları (field of view-FOV) verilmiştir.

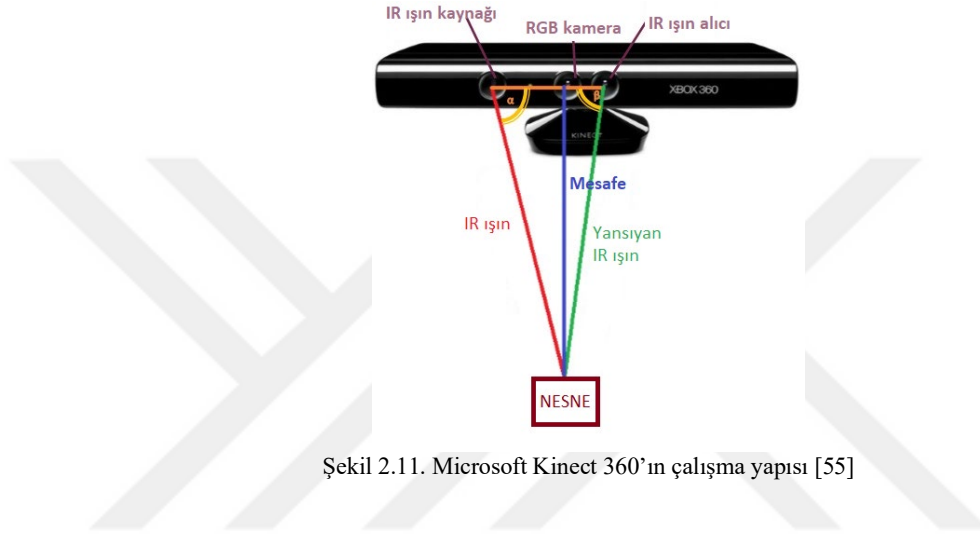
Tablo 2.1. Stereo kameraların özellikleri.

İsim	Resim	Maksimum Derinlik(m)	Minimum Derinlik(m)	Yatay FOV	Dikey FOV	Ağırlık (gram)
ZED mini [51]		12	0.15	90°	60°	62.9
ZED Camera [52]		20 - 15	0.5 - 1	90°	60°	159
Intel RealSense D415 [53]		10	0.3	69.4°	42.5°	72
Intel RealSense D435 [54]		10	0.3	91.2°	65.5°	72

2.2.2.2. Yapısal ışık (SL) kameralar





Bu yöntemle çalışan algılayıcılarda, ışık kaynağıyla (projektör) bilinen bir desen yansıtılmakta ve kamera ile bu desendeki bozulmalara bakılarak 3B konum bilgileri

hesaplanmaktadır. Kullanılan desenin ayrıntılı olması 3B hesaplamada doğruluğu artırır da işlem yoğunluğu artırmaktadır. SL sistemlerde projektör genellikle kızılötesi spektrumda çalıştığından desen insan gözüyle görülmemektedir. Tek kamera kullanıldığından dolayı stereo kameralara göre maliyeti düşük ve işlem yükü daha azdır. Yapısal Işık Teknolojisinde, ışık hassasiyeti, iç mekandan dış ortamlara geçerken sorunlara neden olabilecek önemli bir faktördür.



Şekil 2.11. Microsoft Kinect 360'ın çalışma yapısı [55]

Tablo 2.2. SL kameraların özellikleri

İsim	Resim	Maksimum Derinlik(m)	Minimum Derinlik(m)	Yatay FOV	Dikey FOV	Ağırlık (gram)
Kinect V1 [56] (Kinect 360) [56]		4	0.8	62°	48.6°	600
Intel SR300 [57]		1.5	0.2	71.5°	55°	109
Asus PrimeSense Carmine 1.09 [58]		1.4	0.35	57.5°	45°	395
Asus Xtion 2 [59]		3.5	0.8	74°	52°	145

SL kameralardan en yaygın kullanılanlar Microsoft Kinect V1(Kinect 360), Intel SR300, PrimeSense ve Xtion 2'dir. Tablo 2.2.'de yaygın kullanılan SL kameraların algılayabildikleri maksimum ve minimum derinlik bilgileri, yatay ve dikey görüş



açıları (field of view-FOV) verilmiştir. Microsoft Kinect 360'nun donanımsal yapısı ve mesafe hesaplarken kullandığı epipolar yöntemi Şekil 2.11.'de gösterilmiştir.

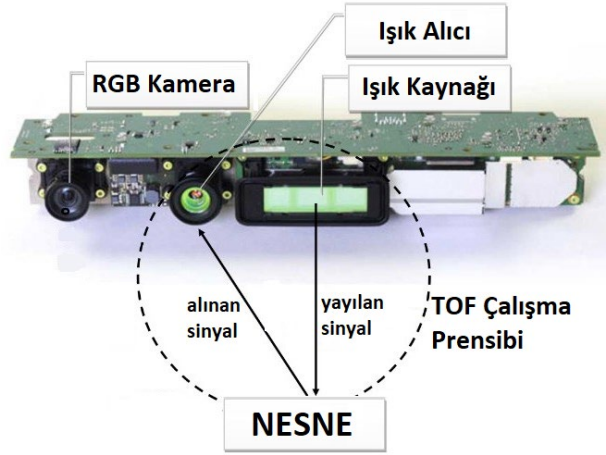
2.2.2.3. Uçuş süresi (ToF) kameralar

ToF kameralarda 3B bilgisi hesaplanırken öncelikle, verici (emitter) nesneye ışık atımları göndermektedir. Fotodiyot dizisi olan alıcı (reciever), bu ışıkların yansımalarını yakalamaktadır. Daha sonra, fotodiyotların her bir noktasında yansıyan ışığın mesafesini ölçmek için ışık hızı kullanarak mesafe hesaplanmaktadır. Bundan dolayı ismi Uçuş Süresi (TOF) tekniği olarak isimlendirilmektedir. Diğer kameralardaki gibi karmaşık hesaplamalar yerine direk ölçüm yapıldığı için daha hızlıdır. Işıkların birbiri ile çarpışmaması için aralarında mesafe olması gerektiğinden çözünürlüğü diğer kameralara göre daha düşük olabilmektedir. Algılayıcılarının (CMOS dedektörleri) ortam ışığına karşı duyarlı olması en önemli dezavantajdır. SL kameralar gibi ToF kameralar da çoğunlukla IR ışık kaynağı kullanmaktadırlar.

Microsoft Kinect V2, Sony DepthSense, 2B ve 3B Lidar algılayıcılar en yaygın kullanılan ToF kameralardır. Tablo 2.3.'te Microsoft Kinect V2 ve Sony DepthSense kameraların algılayabildikleri maksimum ve minimum derinlik bilgileri, yatay ve dikey görüş açıları verilmiştir. Microsoft Kinect v2'nin donanım yapısı ve 3B mesafe ölçerken kullandığı ışık çalışma ToF prensibi Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. ToF kameraların özellikleri

İsim	Resim	Maksimum Derinlik(m)	Minimum Derinlik(m)	Yatay FOV	Dikey FOV	Ağırlık (gram)
Microsoft Kinect V2 [56]		4.5	0.5	70°	60°	900 g
Sony DepthSense 325 [60]		1	0.014	74°	58°	227 g



Şekil 2.12. Microsoft Kinect V2'nin çalışma mantığı [55]

2.2.3. Görsel tabanlı karma yakalama sistemleri

Görsel tabanlı karma yakalama sistemlerinde, işaretçili ve işaretçisiz teknolojilerin ikisinden de yararlanılmaktadır. Bu kombinasyon stratejisi, iki yöntemin ayrı ayrı kullanılmasından kaynaklanan hataların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Örneğin Tao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [61], insan vücudu parçalarının sınırları veya silüetleri yakalanırken, bu parçalara monte edilen işaretleyiciler kamera görüş alanında değilse, işaretçinin hareket yörüngesine bakarak konumları tahmin edilmiştir. Bu strateji yoğun kalibrasyon ve hesaplama gerektirmektedir.

BÖLÜM 3. KALMAN FİLTRESİ

Kalman filtresi, büyük veriye sahip problemlerde mümkün olan en iyi (optimal) tahmin edicilerden birisidir. KF çok etkili ve kullanışlı bir tahmin edicidir. Kalman filtresi, bayes filtresinden türetilmiş istatistiksel bir yöntemdir.

Kalman filtresini anlamak için olasılık ve rastgele değişkenler hakkında temel bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Bir olayın örnek uzayda gerçekleşme olasılığı $P(A)$ olarak isimlendirilir ve formülü (Denklem 3.1)'de verilmiştir. A ve B gibi iki olaydan herhangi birinin gerçekleşme olasılığı ise iki durumun olasılık toplamlarına eşittir (Denklem 3.2). Birbirini etkilemeyen iki olayın birlikte gerçekleşme olasılığı ise bu ikisinin olma olasılığının çarpımı olarak gösterilmektedir (Denklem 3.3).

$$P(A) = \frac{\text{A olayını destekleyen olası sonuçların sayısı}}{\text{Toplam olası sonuçların sayısı}} \quad (3.1)$$

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (3.2)$$

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (3.3)$$

Bilinen bir B olayının sonrasında A olayının olma olasılığına koşullu olasılık denilmektedir ve $P(A|B)$ olarak gösterilmektedir. Koşullu olasılık hesaplanırken, A ve B olayının kesişim kümesinin, B olayının gerçekleşme olasılığına oranına bakılmaktadır (Denklem 3.4). Matematiksel denklemden de anlaşıldığı gibi $P(B)$ değerinin 0'dan büyük olması gerekmektedir.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (3.4)$$

Olasılık teorisinde, rassal iki olaydan (A ve B), bilinen B olayına koşullu bir A olayının olasılığı (Denklem 3.5), bilinen A olayına koşullu bir B olayının olasılığı (Denklem 3.6) birbirinden farklıdır (Denklem 3.7). Bu iki olasılık arasındaki ilişkiye Bayes Teoremi denilmektedir.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (3.5)$$

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (3.6)$$

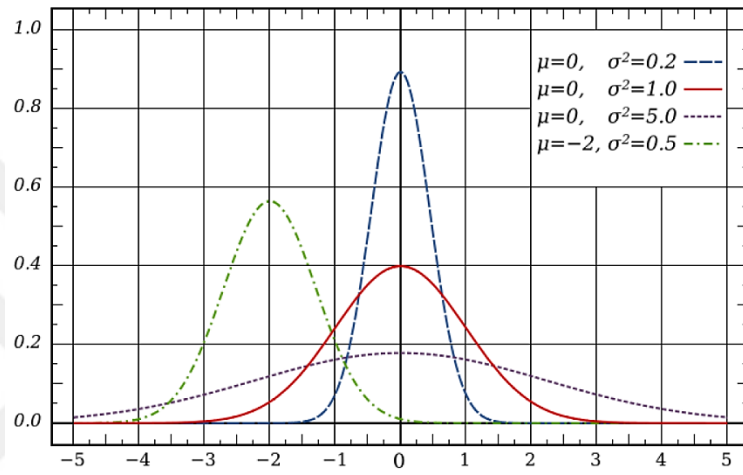
$$P(A|B) \neq P(B|A) \quad (3.7)$$

(Denklem 3.6)'daki denklemde $P(A \cap B)$ yalnız bırakılarak (Denklem 3.5)'te yerine yazıldığında (Denklem 3.8)'deki Bayes Teoremi denklemi elde edilmektedir.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (3.8)$$

Kalman filtresindeki önemli terimlerden birisi de gürültüdür. Gürültü, ölçülen bir sinyale istenmeyen katkı sağlayan sinyaller olarak tanımlanmaktadır. Gürültüye sahip olan görüntü veya videolarda, piksel değerlerinin yüksek frekanslı rasgele karışıklık gösterdiği görülmektedir. Bu gürültü genellikle kullanılan sensörlerin (kamera veya tarayıcı gibi) iletim veya sayısallaştırma işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu istenmeyen karışıklığa gürültü denilmektedir. Yapılan çalışmalarla gürültülerin matematiksel modelleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan matematiksel model, gauss gürültü modelidir. Günümüzde tasarlanan birçok sistemin de gauss gürültüsü oluşturduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Tasarlanan modelde de gürültünün gauss dağılımı sergilediği kabul edilmektedir.

Gauss (Normal) dağılımı, bir değişkenin değerlerinin nasıl dağıtıldığını açıklayan bir olasılık işlevidir. Gözlemlerin çoğunun merkezi tepe etrafında toplandığı ve merkezden uzaklaştıkça simetrik bir şekilde olasılığın azaldığı bir dağılımdır (Şekil 3.1.). Gerçek hayattaki birçok verinin normal dağılıma uygun olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı birçok rassal süreç problemlerinin çözümünde, istatistiksel dağılımının normal (gauss) dağılıma uygun olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 3.1. Normal Dağılım Grafiği

Normal dağılım, ortalama (Denklem 3.9) ve standart sapma (Denklem 3.10) olarak iki parametre ile temsil edilmektedir. Ortalama, normal dağılım grafiğinde merkezi tepe noktasının yerini belirlemektedir. Ortalama değerinin değişmesi grafiği sağa veya sola kaydırmaktadır. Standart sapma ise normal dağılım grafiğinin genişliğini belirlemektedir. Standart sapmanın değişmesiyle normal dağılım grafiği daralmakta veya genişlemektedir. Standart sapma aynı zamanda, değerlerin ortalamadan ne kadar uzaklaşacağını belirlemektedir. Normal dağılımın matematiksel formülü ise (Denklem 3.11)'de verilmiştir.

$$E(x) = \mu \quad (3.9)$$

$$Var(x) = \sigma^2 \quad (3.10)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.11)$$

3.1. Durum Uzayı Modeli

Birleşik bir bütün oluşturan, etkileşimli veya birbiriyle ilişkili varlıklar gurubuna sistem denilmektedir. Bir sistem birden çok parametreden oluşmaktadır. İnsan yapımı sistemler genellikle konsept, analiz, tasarım, uygulama, yapı, davranış, girdi verileri ve çıktı verilerinden oluşabilmektedir. Tüm bu parametreleri açıklamak ve temsil etmek için sistemlerin matematiksel modelinin ortaya konulmasına ihtiyaç duyulmaktadır [62]. Bütün dinamik sistemler, diferansiyel denklemler ile modellenmekte ve bu denklemler kullanılarak matematiksel modeli oluşturulmaktadır.

Fiziksel bir sistemin matematiksel modeli oluşturulurken; frekans domaininde çalışılıyorsa transfer fonksiyonlarından, zaman domaininde çalışılıyorsa da durum uzay denklemlerinden faydalanılmaktadır. Frekans domaini yaklaşımı, klasik yaklaşım olarak da isimlendirilmekte ve sadece doğrusal sistemlere uygulanabilmektedir. Durum uzay modeli ise modern yaklaşım olarak isimlendirilmekte ve hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemler için uygulanabilmektedir.

Durum uzayı gösteriminde; fiziksel bir sistemin matematiksel modeli oluşturulurken girdi, çıktı ve durum değişkenleri kullanılmaktadır. Durum değişkenleri zaman içinde gelişen değişkenlerdir. Çıktı değişkenlerinin değerleri, durum değişkenlerinin değerlerine bağlıdır. Girdi, çıktı ve durum sayısından soyutlamak için bu değişkenler vektörler olarak ifade edilmektedir [63]. Durum değişkenleri, herhangi bir zamanda sistemin tüm durumunu temsil edebilen sistem değişkenlerinin olası en küçük alt kümesidir [64].

Doğrusal bir sistemin durum uzay denklemleri temel olarak durum denklemi (Denklem 3.12) ve çıkış denkleminde (Denklem 3.13) oluşmaktadır. p girişli, q çıkışlı ve n durum değişkenli doğrusal bir sistem düşünüldüğünde her bir değişkenin tanımı ve matris-vektör boyutları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (3.12)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (3.13)$$

Tablo 3.1. Durum Uzay Değişkenleri

Değişken	Değişken Tanımı	Boyutu
x	Durum vektörü	n x 1
y	Çıkış vektörü	q x 1
u	Giriş/Kontrol vektörü	p x 1
A	Durum/Sistem matrisi	n x n
B	Giriş matrisi	n x p
C	Çıkış matrisi	q x n
D	İleri besleme matrisi	q x p
\dot{x}	x'in türevi	n x 1

Diferansiyel denklem modelinden sonra durum uzay formuna sokulması için öncelikle durum değişkenleri seçilmelidir. Daha sonra durum değişkenlerinin katsayılarından faydalanarak durum matrisleri oluşturulmalıdır. Son olarak da sistemin çıkış değişim denklemlerine bakılarak da çıkış matrisi oluşturulmalıdır. Sistemin durum uzay modeli oluşturulduktan sonra da A, B, C, D matrisleri kullanılarak istenilen işlemler gerçekleştirilebilmektedir.

3.2. Standart Kalman Filtresi

Kalman filtresi, ölçüm gürültüsüne sahip doğrusal bir dinamik sistemin iç durumunu tahmin eden verimli bir filtredir [65, 66]. R.E. Kalman'ın 1960 yılında yayınlanan makalesinde, ilk defa doğrusal filtreleme problemlerine özyinelemeli bir yaklaşımdan bahsedilmiştir [24]. Kalman filtresi o zamandan beri, özellikle otonom veya yardımcı takip alanlarında kapsamlı bir araştırmaya konu olmuştur. KF, ortalama karesel hatayı en aza indirmeyi hedeflemektedir. Bir sürecin önceki durumlarına bakarak sonraki muhtemel durumunu tahmin etmek için özyinelemeli bir hesaplama aracı sağlayan bir dizi matematiksel denklemden oluşmaktadır. Bunun yanında geçmiş, şimdiki zaman

ve gelecekteki durumların tahminlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Modellenen sistemin, davranışları net olarak bilinmediği durumlarda bile başarı sağlayabilmektedir [67].

Kalman filtresinin çalışma mantığı, bir sonraki durum tahmin edilirken, o ana kadarki bütün veriyi saklamak ve işlemek yerine, o verilerin standart sapması ve ortalaması hesaplamalarda kullanılmaktadır. Bu sayede çok daha az hafızayla işlem gücü yeterli olmaktadır.

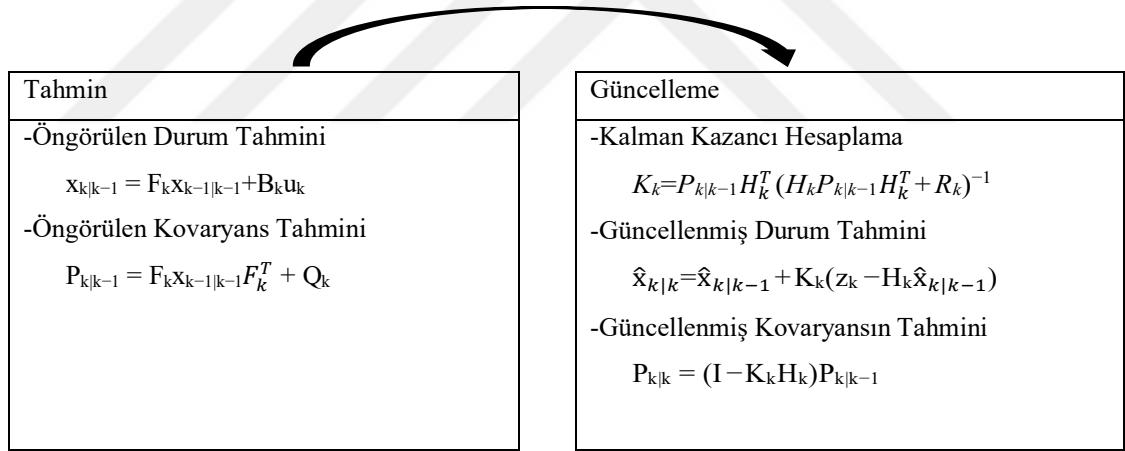
Kalman filtresi, gürültülü sensör verilerinden kaynaklanan belirsizliklerde ve rastgele dış faktörlerde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bir sisteme uygulanacak Kalman filtresi tasarlanırken, sistemin ürettiği model gürültüsü ve ölçüm gürültüsünün, gauss yani beyaz gürültü olduğu varsayılmaktadır.

Kalman filtresi, zaman içinde gözlemlenen ölçümlere ve ölçüm belirsizliğine dayanan, bilinmeyen gerçek değerlere yaklaşan tahminler üretmeyi amaçlayan bir yöntemdir [24]. Bu yöntem, tahmin edilen değerlerin ortalama kare hatasını en aza indirdiği için doğrusal sistemler için optimal bir tahmincidir [68]. Doğrusal bir sistemin durumunun tahmini, doğrusal dinamik sistem modeline (durum) ve onun belirsizliğine (kovaryans matrisi) göre değerler üreterek yapılmaktadır. Kalman Filtresi, önceki adımda hesaplanan değerler, ölçülen değerlerle karşılaştırarak ağırlıklı ortalamayı tahmin etmektedir. Durumun kovaryansı kullanılarak, ağırlıklı ortalama veya kalman kazancı hesaplanmaktadır. Kalman kazancının büyük olması belirsizliğin azaldığına, küçük olması ise belirsizliğin arttığını göstermektedir [69]. Süreç, yalnızca önceki duruma ve kovaryansına bağlı olarak yinelemeli olarak çalışmaktadır. Her adımda gürültülü ölçümlerle ağırlıklı ortalamaya göre yeni bir durum ve kovaryans tahmini yapılmaktadır. Bunlar güncellenerek tekrar edilmektedir. Böylece gerçek zamanlı uygulamalarda çalıştırılması mümkün olmaktadır. Kovaryanstan hesaplanan Kalman kazancı, tahminlere ve ölçümlere verilen ağırlıkları ayarlamaktadır.

Kalman kazancı, ölçümlere ve mevcut durum tahminine verilen nispi ağırlıktır ve belirli bir performansa ulaşmak için ayarlanabilmektedir. Kalman kazancının yüksek

olması durumunda, filtre en son ölçümlere daha fazla ağırlık vermektedir. Kalman kazancının düşük olduğunda ise filtre model tahminlerini daha yakından takip etmektedir.

KF iki adımdan oluşmaktadır. Birincisi tahmin adımındır. Bu adımda durum geçiş modelinin gürültü modelini dikkate alarak, bir önceki andaki duruma ve onun kovaryansına dayalı olarak doğrusal bir dönüşümle bir tahmin yapılmaktadır. İkincisi ise güncelleme adımındır. Bu adımda ise, tahmin sonrası sistemin girişi değerlendirilerek parametrelerin güncellenmesi gerçekleştirilmektedir. Yine güncelleme adımında Kalman kazancı hesaplanmakta ve güncellenmektedir. Gözlemlenen değerler ve gürültü modeli dikkate alınarak tahmin iyileştirilmektedir. Son olarak, durum için düzeltilmiş son değerler ve mevcut zaman adımı için kovaryans hesaplanmaktadır. Kalman filtresinin çalışma döngüsü Şekil 3.2.'de ve kullanılan parametrelerin tanımlamaları Tablo 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kalman Filtresi çalışma döngüsü

Bu parametrelerden bir kısmı sisteme giriş olarak kullanılırken, bir kısmı da hesaplamalar yoluyla elde edilir ve gerekirse yine sistemin girişi olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3.2. Kalman Filtresinde Kullanılan Parametreler

Değişken	Açıklaması
F_k	Durum geçiş modeli
B_k	Her zaman adımı için kontrol-girdi modeli
Q_k	İşlem gürültüsünün kovaryansı
H_k	Gözlem modeli
R_k	Gözlem gürültüsünün kovaryansı
$P_{k k-1}$	Tahmin kovaryans matrisi
R_k	Gözlem gürültüsünün kovaryansı
I	Birim matris
K	Kalman kazancı

KF, en basit dinamik bayes ağlarından biri olarak gösterilmektedir. Kalman filtresinde çıkış sinyalinin ölçüm verilerini ve sistem modeli denklemini kullanarak, sistem durum değişkeni ve giriş sinyalinin optimal tahmini gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. KF, stokastik sistemler için doğrusal, tarafsız ve hatasız varyanslı optimal tahmin algoritmasıdır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan sistemlerde, standart Kalman filtresinin işlevi gerçek duruma yaklaşmak için yeterince güçlü değildir. Bu nedenle, kalman filtresi mantığını kullanan ve doğrusal olmayan sistemler için güçlü algoritmalar geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanlardan birisi de genişletilmiş kalman filtresidir.

3.3. Genişletilmiş Kalman Filtresi

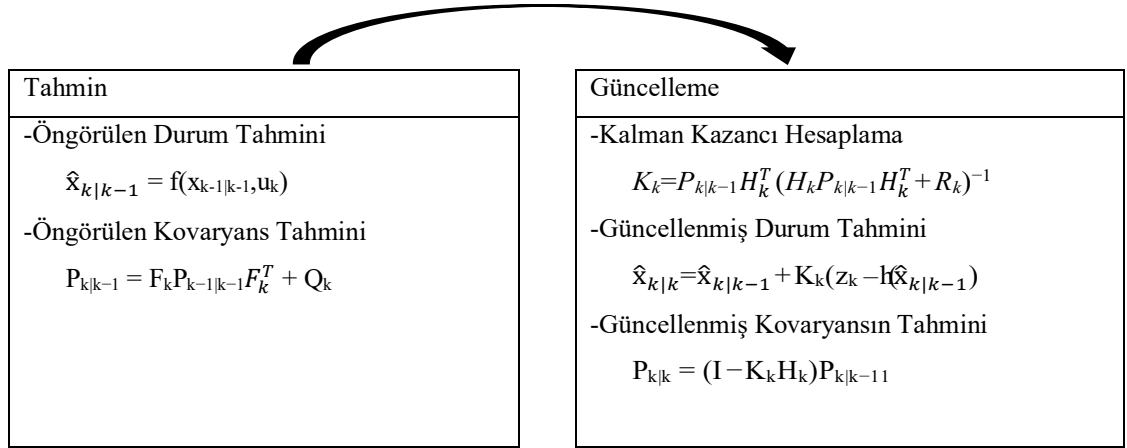
Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF), Kalman filtresinin doğrusal olmayan sistemlere uygulanan versiyonudur. Kalman filtresinin en büyük dezavantajı doğrusal bir varsayım olmasıdır. KF sadece sistemin zaman içindeki geçişi ve gözlemsel modeli doğrusal olduğu durumlarda çalışmaktadır. Gündelik hayatımızdaki problemlerin çoğunda, oluşturulan model doğrusal değildir. Bu sınırlamayı aşmak için birçok alternatif yöntem geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan bir uygulamada KF mantığıyla çalışan, oldukça güçlü yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en iyi bilinen ve kullanılanların başında Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) gelmektedir. Bu yöntem,

doğrusal olmayan bir süreci çok kısa bir bölgede doğrusal bir süreç olarak kabul etmektedir. Durum tahminine yakınlaştırmak için, orijinal durum ve ölçüm denklemlerinin yerine, doğrusal olmayan modelin Taylor serisi açılımı kullanılmaktadır.

Genişletilmiş Kalman filtresinde, durum geçişi ve gözlem modellerinin durumu doğrusal fonksiyonları olması gerekmemektedir. Bunun yerine türevlenebilir fonksiyonlar olabilmektedir. Genel gösterimi ile giriş modeli (Denklem 3.14)'e, çıkış modeli ise (Denklem 3.15)'teki gibi gösterilmektedir. u_k kontrol vektörü, w_k kovaryansı Q_k olan işlem gürültüsü, v_k ise kovaryansı R_k olan gözlem gürültüsüdür. Her iki gürültünün de sıfır ortalamalı Gauss gürültüsü olduğu varsayılmaktadır. f fonksiyonu durumu hesaplamak için kullanılırken, h fonksiyonu ise tahmin edilen ölçümü hesaplamak için kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan bir sistemlerde kovaryans hesaplanırken bu fonksiyonlar direk olarak kullanılamamaktadır. Bunun yerine, fonksiyonların kısmi türev matrisleri hesaplanmaktadır. Genişletilmiş kalman fitresinin çalışma döngüsü Şekil 3.3.'te verilmiştir. Bu denklemlerdeki F_k (Denklem 3.16), f fonksiyonun x 'e göre türevi; H_k (Denklem 3.17) ise h fonksiyonunun x 'e göre türevidir [70].

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k \quad (3.14)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (3.15)$$



Şekil 3.3. Genişletilmiş Kalman Filtresi Çalışma Döngüsü

$$F_k = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k} \quad (3.16)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (3.17)$$

BÖLÜM 4. KALMAN FİLTRESİ İLE KİNEMATİK ANALİZ

İnsan kinematik analizi çalışmalarında en önemli aşama kinematik verilerin elde edilme aşamasıdır. Kinematik verilerin doğru ve gürültüsüz elde edilmesi, yapılan hesaplamalar ve analizlerin gerçeğe daha yakın olmasıyla doğru orantılıdır. Hareket yakalama sistemlerinde kullanılan sensörlerin ölçüm esnasında veya veri aktarımında parazit ve gürültüler meydana gelmektedir. Bazen ek donanımlar kullanılarak bazen de yazılım ve geliştirilen algoritmalar vasıtasıyla bu istenmeyen bozulmalar giderilmeye çalışılmaktadır. Geliştirilen iyileştirme sistemlerinin performansı hesaplanırken de mutlaka güvenilir veya gerçek verilerle karşılaştırma yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ucuz ve kurulumu kolay bir hareket yakalama sensörü olan Microsoft Kinect cihazının veri iyileştirilmesi için bir sistem geliştirilmiştir. Sensörden elde edilen bilgilerin doğruluğunu test etmek için adayların gerçek uzuv uzunlukları ölçülerek ortalama karesel hatası hesaplanmıştır. Sonraki aşamada sensör verilerine, tasarlanan filtre uygulanmış ve gerçeğe çok daha yakın veriler elde edildiği görülmüştür.

4.1. Gerçek Uzunlukların Elde Edilmesi

Sakarya Üniversitesi (SAÜ), Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu (BESYO) bölümlerine öğrenci alımını Özel Yetenek Sınavı (ÖZYS) ile gerçekleştirmektedir. Adaylar koordinasyon ismi verilen bir parkuru tamamlama sürelerine göre puan almaktadırlar. Çalışmamızda 2014 yılında SAÜ BESYO ÖZYS'na başvuran adayların kinematik verileri incelenmiştir.

Adayların ön kol, üst kol, alt bacak ve üst bacak uzunluklarının ölçümü Şekil 4.1.'de görünen dijital kaliper ile ölçülmüştür. Ölçümler, adaylar ayakta dik pozisyonda, sağ kol dirseği 90° olacak şekilde sabit dururken gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Dijital Kaliper

Bütün ölçümler adayların vücutlarının sağ tarafından (sağ üst kol, sağ alt bacak vb.) gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2.). Verilerin doğruluğunu artırmak için her uzunluk iki defa ölçülmüştür. İki ölçüm arasındaki hassasiyet 0.05cm olarak alınmıştır. Bu iki değer birbirine yakın olmaması durumunda üçüncü ölçüm gerçekleştirilerek en yakın iki değer ortalaması alınmıştır.



a) ön kol

b) üst kol

c) alt bacak

d) üst bacak

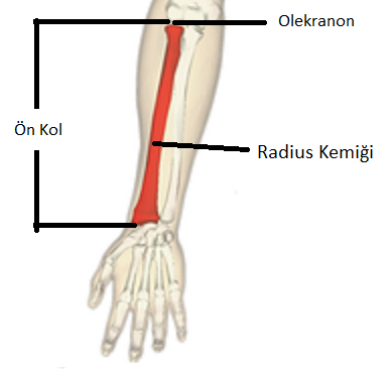
Şekil 4.2. Aday Gerçek Uzunluk Ölçümleri

Uzunlukların ölçümü yapılırken antropometrik ölçüm standartlarına uyulmuştur. Üst kol uzunluğu için, ön kol yere paralel, dirsek 90° olacak şekilde bükülerek, göbek hizasında tutulmakta ve olekranon (dirsekteki iri çıkıntı) ile akromion (omuzun çatı kemiği) arasındaki mesafe ölçülmüştür (Şekil 4.3.). Ön kol ölçümü yapılırken aynı pozisyon korunarak, olekranon ile radius (ön kol) kemiğinin bileğe bağlandığı en uç noktası arasındaki mesafe ölçülmüştür (Şekil 4.4.). Alt bacak boyu için patella (diz kapağı) ile lateral malleolus (ayak bilek dış çıkıntısı) arası; üst bacak boyu ölçümü için

ise patella ile trokanter (uyluk kemiğinin kalçada olan yumru başı) çıkıntısı arasındaki mesafe ölçülmüştür (Şekil 4.5.).



Şekil 4.3. Üst Kol Ölçümü



Şekil 4.4. Ön Kol Ölçümü



Şekil 4.5. Üst Bacak Ölçümü

4.2. Microsoft Kinect ile Uzunlukların Hesaplanması

Microsoft Kinect cihazı insan vücudundaki 20 adet noktanın üç boyutlu uzayda koordinat bilgilerini tahmin edebilmektedir. Kinect cihazı saniyede 30 poz (frame) işleyebilmektedir. Adaylara, en temel hareketlerden biri olan çömelme (squat) hareketi yaptırılarak, Kinect cihazıyla bu 20 noktanın koordinatları 3B olarak bulunmuştur (Şekil 4.6.). Adaylara çömelme hareketini iki kere tekrarlatılmıştır.



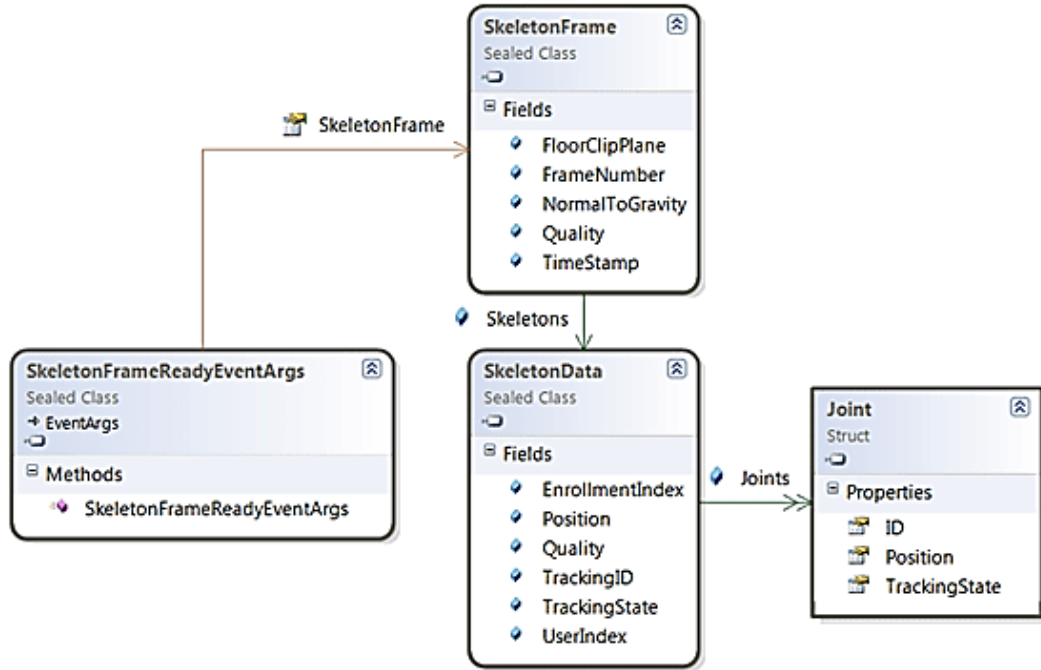
Şekil 4.6. Çömelme Hareketi

Kinect ilk olarak Microsoft Xbox oyun konsolu için geliştirilse de 2012 yılından itibaren Windows işletim sistemi için yazılım geliştirme kiti (SDK) yayınlamıştır. Bilgisayara bağlanarak SDK ile derinlik, RGB ve iskelet bilgileri alınarak çeşitlik analizler yapılmasına olanak verilmektedir. Böylelikle Kinect, insan hareket analizi sistemleri arasında yerini almıştır. Kinect cihazı, Xbox oyun konsolları için geliştirildiği için kablosu bilgisayara direk olarak bağlanamamakta ve ekstra güce ihtiyaç duyulmaktadır. Kinect cihazını bilgisayara bağlamak için Şekil 4.7.'de görünen, bir tarafı Kinect'in girişi, diğer ucu da güç ve USB olan bir kablo kullanılması gerekmektedir. Kinect cihazı oyun konsolu haricinde alındığında genellikle bu kablo ile beraber satışı yapılmaktadır.



Şekil 4.7. Kinect Bilgisayar Bağlantı ve Güç Kablosu

Microsoft'un yayınladığı SDK ile VB.Net, C# ve C++ dilleri destek verilmektedir. Bilgisayardan Kinect cihazından sağlıklı veri alabilmek için en az Windows 7 işletim sistemi, çift çekirdek 2,66 işlemci, 2GB RAM, DirectX 9,0C ve Kinect SDK kurulu olması gerekmektedir. Visual Studio uygulaması açıldıktan sonra ilk olarak yeni bir C# projesi oluşturulması gerekmektedir. Açılan proje ekranında Çözüm Gezini (Solution Explorer) penceresinde Başvurular'a (References) sağ tıklayarak açılan pencerede "Microsoft Kinect" eklenmelidir. Kinect for Windows SDK'sının iskeletle alakalı bilgilere ulaşılabildiği metot ve özelliklerin yer aldığı UML(Unified Modeling Language) sınıf (class) diyagramı Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Kinect İskelet UML Class Diyagramı

Kinect ile 3B koordinatları bulunan iki nokta (A, B) arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılan formül (Denklem 4.1)'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan uzunluklar, Kinect cihazıyla tespit edilen ve Tablo 4.1.'de verilen başlangıç-bitiş noktaları arasındaki mesafeler hesaplanarak elde edilmiştir.

$$\text{Mesafe}(A,B)=\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (4.1)$$

Tablo 4.1. Gerçek Uzunlukların Kinect Noktalarına Karşılıkları

Gerçek Uzunluk Adı	Kinect	
	Başlangıç (A)	Bitiş (B)
Ön kol	Sağ El Bileği (WristRight)	Sağ Dirsek (ElbowRight)
Üst Kol	Sağ Dirsek (ElbowRight)	Sağ Omuz (ShoulderRight)
Alt Bacak	Sağ Ayak Bileği (AnkleRight)	Sağ Diz (KneeRight)
Üst Bacak	Sağ Diz (KneeRight)	Sağ Kalça (HipRight)

Birçok elektronik cihazda olduğu gibi Kinect cihazında da hatalı ölçümler olabilmektedir. Kinect sadece belirli bir bölgede tanıma işlemi yapabildiği için kısa süreli alan dışına çıkmalarda ve algılanacak noktaların üst üste gelmesi durumunda sağlıklı sonuçlar verememektedir. Bu tarz durumlar için bir tahmin veya gürültüleri giderecek bir filtreye ihtiyaç duyulmaktadır.

4.3. Kalman Filtresi Tasarımı

Bir sisteme Kalman filtresi tasarlayabilmek için öncelikle o sistemin matematiksel modelinin kurulması gerekmektedir. İnsan hareketini modellemek için her bir noktanın zamana göre konumu, yer değiştirmesi, hızı ve ivme bilgilerinden faydalanılmıştır. Sabit ivmeli bir hareket ele alındığında zamana göre konum (r) değişim denklemi (Denklem 4.2)'de, hız değişim denklemi (Denklem 4.3)'te, sabit olan ivme denklemi ise (Denklem 4.4)'te verilmiştir. (Denklem 4.2) konum denkleminin zamana (t) göre birinci dereceden türevi hız denklemini (Denklem 4.5), ikinci dereceden türevi ise ivme denklemini (Denklem 4.7) oluşturmaktadır.

$$r_{t+1} = r_t + v_t \Delta t + \frac{1}{2} a_t \Delta t^2 \quad (4.2)$$

$$v_{t+1} = v_t + a_t \Delta t \quad (4.3)$$

$$a_{t+1} = a_t \quad (4.4)$$

$$v = \frac{dr}{dt} \quad (4.5)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2} \quad (4.6)$$

$$F = \begin{bmatrix} I_{[3 \times 3]} & \Delta t I_{[3 \times 3]} & 0.5 \Delta t^2 I_{[3 \times 3]} \\ 0_{[3 \times 3]} & I_{[3 \times 3]} & \Delta t I_{[3 \times 3]} \\ 0_{[3 \times 3]} & 0_{[3 \times 3]} & I_{[3 \times 3]} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \\ V_x \\ V_y \\ V_z \\ A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0.5 \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0.5 \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0.5 \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \\ V_x \\ V_y \\ V_z \\ A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Tasarım aşamasında modellenmesi gereken diğer değişken de gözlem matrisidir (H_k). Tahmin işlemi gerçekleştirildikten sonra gözlem (ölçüm) denklemi (Denklem 4.12) ile sistem parametreleri güncellenmektedir. H_k gerçek durum uzayını, gözlemlenen durum uzayına eşitleyen matristir. Çıkış denklemlerine bakılarak gözlem matrisi (Denklem 4.13)'teki gibi belirlenmiştir. Gözlem matrisinin de sade gösterimi (Denklem 4.14)'te verilmiştir.

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (4.12)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$H_k = [I_{[3 \times 3]} \ 0_{[3 \times 3]} \ 0_{[3 \times 3]}] \quad (4.14)$$

Sisteme ilk değer olarak atanması gereken diğer bir matris de tahmin kovaryans matrisidir (P). Bu değer sistem içerisinde kendi kendini güncellese de ilk değer atanması gerekmektedir. Genellikle sıfır matrisi olarak belirlense de rastgele değerler atandığı çalışmalar da mevcuttur. Sistemimizde bütün eklem noktaları ve adaylar için standart bir hesaplama olması açısından ilk değer (P_0) olarak sıfır matris (Denklem 4.15) kullanılmıştır.

$$P_0 = [0]_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

4.4. Genişletilmiş Kalman Filtresi Tasarımı

Kalman filtresinin en büyük dezavantajı sadece doğrusal sistemler ile çalışabilmesidir. Yalnızca durum geçiş modeli (F) ve gözlemsel modelinin (H) doğrusal olduğu durumlarda çalışmaktadır. Kinect cihazının algıladığı ve üzerinde çalışılan noktalar doğrusal hareket etmediğinden dolayı, modellenen sistem de doğrusal değildir. Bundan dolayı alternatif bir çözüme ihtiyaç duyulmuştur. KF kadar iyi performans veren ve en yaygın kullanılan doğrusal olmayan yöntemlerden birisi de Genişletilmiş Kalman Filtresi'dir (GKF).

GKF'nin temel mantığı F ve H matrisleri doğrusallaştırıldıktan sonra kalman filtresi algoritmasının uygulanmasıdır. Doğrusallaştırma işlemi Taylor serileriyle gerçekleştirilebilmektedir. Taylor serisi, bir fonksiyonun verilen bir noktadaki (a) sonsuz türevin toplamı şeklinde yazılmasıdır (Denklem 4.16). Taylor serinin sıfır (a=0) merkezli türevine bakıldığında Maclaurin serisi olarak isimlendirilmekte ve daha basit ve kullanışlı bir hale gelmektedir (Denklem 4.17).

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n \quad (4.16)$$

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n \quad (4.17)$$

F matrisini tek bir eksene göre yer değişim denklemlerine göre yazarsak (Denklem 4.18) matrisi oluşmaktadır. Bu matrisi Maclaurin serisine (Denklem 4.17) göre açtığımızda her adım için sırasıyla (Denklem 4.19), (Denklem 4.20), (Denklem 4.21) denklemleri elde edilmektedir. Üçüncü dereceden türevinden sonra sıfır matrisi elde

edildiğinden Maclaurin serisi ikinci dereceden türeve kadar devam ettirilmiştir. Elde edilen türevleri (Denklem 4.17) de yerine yazılırsa (Denklem 4.22) denklemi elde edilmektedir. Toplama işlemi gerçekleştiğinde ise (Denklem 4.23) elde edilmektedir.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0.5\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$f(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\frac{f'(0)}{1!}t = \begin{bmatrix} 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}t \quad (4.20)$$

$$\frac{f''(0)}{2!}x^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\frac{t^2}{2} \quad (4.21)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}t + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\frac{t^2}{2} \quad (4.22)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & t & 3/2t^2 \\ 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Tek bir eksene göre yapılan hesaplamalar geliştirdiğimiz 3 eksenli yaklaşıma uyarlandığında F matrisi (Denklem 4.24)'teki gibi olacaktır. H matrisi de Maclaurin serisi açılımı sonrasında (Denklem 4.25)'teki gibi olacaktır.

$$f(F) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 1.5\Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 1.5\Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 1.5\Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$f(H) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Bu dönüşümlerden sonra doğrusal olmayan F ve H matrisleri sıfır noktası etrafında türevi alınarak doğrusallaştırılmıştır. Artık doğrusal hale getirilmiş bu parametreler ile kalman filtresi algoritması yeniden kullanılabilir. Bu sayede doğrusal olmayan sistemler doğrusal hale getirilerek filtre uygulanabilmiştir.

4.5. İstatistiksel Hata Oranlarının Karşılaştırılması

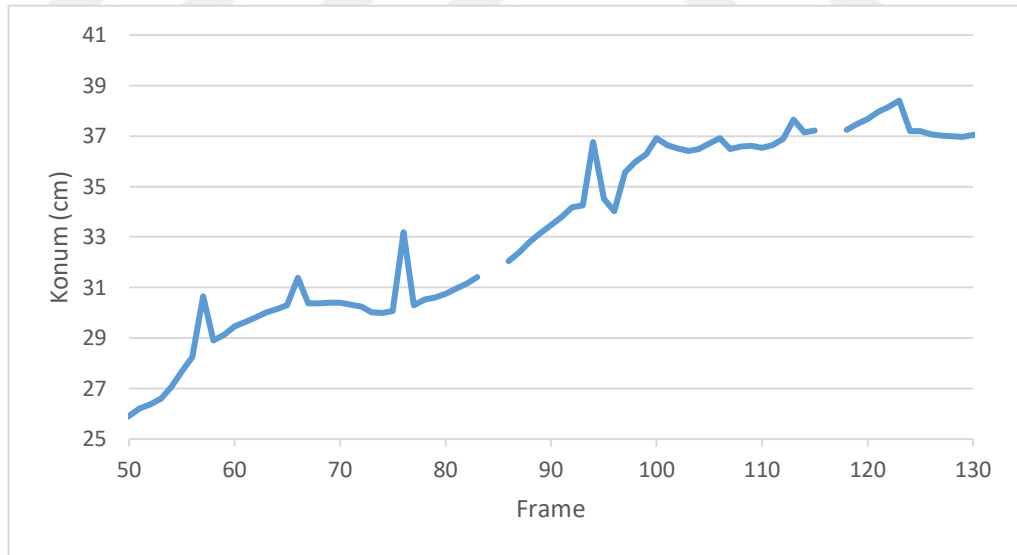
İnsan hareket analizi çalışmalarının bir kısmında kişinin duruş ve konum bilgileriyle çalışıldığından yapılan ölçümlerin hassasiyeti önem taşımamaktadır. Çalışmaların büyük bir kısmında ise vücut organlarının birbirine göre açısı, hızı ve ivmesi gibi parametreler önemli olduğundan gerçeğe en yakın ölçüm yapılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında adaylara iki defa çömelme hareketi yaptırılmıştır. Geliştirilen yazılım ile Kinect cihazından 20 noktanın 3B koordinatları gerçek zamanlı olarak alınmıştır. Kişilerin ölçülen gerçek uzunlukları ve Kinect cihazından elde edilen bu veriler ileride yapılabilecek farklı çalışmalar için kayıt edilmiştir. Gerçek zamanlı elde edilen bilgiler kayıt edilirken sırasıyla Microsoft Sql Server, MySql Server ve Microsoft Excell kullanılmıştır. Kinect cihazının saniyedeki frame sayısı ve 20 tane eklem noktanın 3B bilgileri düşünüldüğünde veri yazma için yeterince hızlı olmadığı gözlemlenmiştir. Kayıt hızı yavaş olduğundan veriler metin dosyalarında saklanmıştır. 3B konum bilgileri adayın her denemesindeki, her bir eklem noktası farklı metin dosyaları olarak kaydedilmiştir. Bu dosyalarda sadece eklem konumlarıyla alakalı bilgiler bulunmaktadır. Bu metin dosyalarının içerisinde frame numarası, deneme numarası, zaman etiketi, Kinect, Kalman Filtresi ve Genişletilmiş Kalman Filtresinin ürettiği x, y, z konum bilgileri yer almaktadır. Dosya ismi, deneme numarası, aday numarası ve eklem numarası yer alacak şekilde belirlenmiştir. "D1_A55_10.txt" isimli metin dosyası, 55 numaralı adayın 1. denemesindeki 10 numaralı eklem noktasının (sağ dirsek) verilerini içermektedir. Her bir eklem noktası için oluşturulan 20 tane dosyanın yanında bir tane de ölçümlerin yer aldığı metin dosyası oluşturulmaktadır.

Ölçümler dosyasının içerisinde ise frame numarası, deneme numarası, zaman etiketi, Kinect, KF ve GKF ile hesaplanan eklem noktalarına göre hesaplanmış ön kol, üst kol,

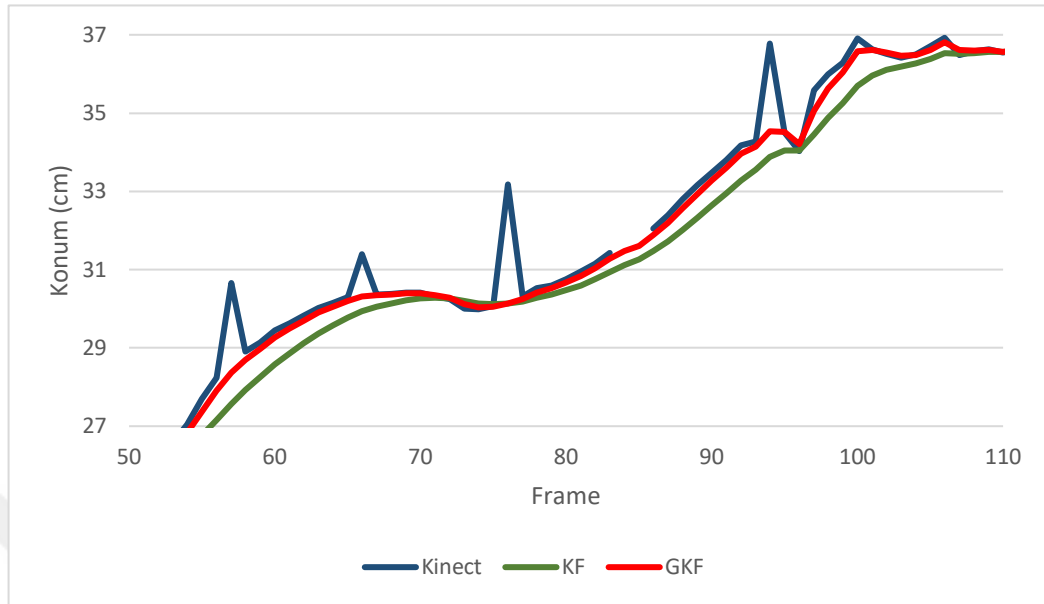
alt bacak, üst bacak uzunlukları ve adayın gerçek ölçülmüş uzunlukları yer almaktadır. Dosya ismi diğerine benzer şekilde deneme numarası, aday numarası içerecek şekilde belirlenmiştir. “D1_A55_Olculer.txt” isimli metin dosyası, 55 numaralı adayın 1. denemesindeki uzunluk verilerini içermektedir. Metin dosyalarında kaydedilen veriler istatistiksel sorgular oluşturulması amacıyla, geliştirilen programın ara yüzü yardımıyla Microsoft SQL Server’a aktarılmıştır. Yapılan performans analizi ve karşılaştırmalarında da bu veri tabanındaki veriler kullanılmıştır.

19 numaralı adayın, sağ bileğinin X eksenindeki hareketi Kinect ile sayısallaştırıldığında Şekil 4.9.’daki grafik elde edilmektedir. Grafik incelendiğinde 57., 66, 76, ve 94. pozlarda (frame) gözle görülür bozulmalar olduğu, 84, 85, 116 ve 117. pozlarda ise cihazdan veri elde edilmediği gözlemlenmiştir. Bunun en temel iki sebebi vardır. Birincisi cihazın içinde yer alan elektronik ve yazılım algoritmasının yeterli olamamasıdır. İkincisi ve diğer sistemler de sıklıkla karşılaşılan, algılanacak noktanın sensör algılama alanında olmaması veya başka bir nokta ile çakışmasıdır.



Şekil 4.9. Aday Sağ Bileğinin X Eksenindeki Hareketinin Kinect Verileri

Aynı adayın sağ bileğinin X eksenindeki hareketinin Kinect verilerine KF ve GKF uygulandığında Şekil 4.10.’daki grafik elde edilmektedir. Grafikte görüldüğü gibi her iki filtrenin de gürültülü ve üretilemeyen konum bilgileri için de tahminde bulunduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.10. Aday Sağ Bileğinin X Eksenindeki Hareketine Filtre Uygulanması

KF doğrusal sistemlere uygun olduğundan doğruya daha yakın tahminlerde bulunmaktadır. Bu yüzden 50-70, 80-95 ve 96-108. pozlar arasında doğrusala benzeyen ve ölçümlerden uzaklaşan bir grafik gözlenmektedir. GKF ise bu harekette de olduğu gibi doğrusal olmayan sistemlere uygunluğundan dolayı, daha yumuşak geçişlerle gerçeğe daha yakın tahminlerde bulunduğu gözlemlenmiştir.

Uzunlukların hata oranları incelendiğinde üst bacak ve üst kol değerlerinin bazı framerde ani yükselmeler olduğu gözlemlenmiştir. Üst bacağın hata oranının yüksek olduğu framerler incelendiğinde adayın çömeldiği zamana denk gelmektedir. Bu pozisyonda sağ kalça, bacağın arka bölgesinde kaldığı için Kinect tarafından konumlandırılmadığı tespit edilmiştir. Üst kol incelendiğinde ise, sağ el bileğinin alan dışına çıktığı durumlarda da Kinect konum bilgisi oluşturamadığından uzunluklar yanlış hesaplanmaktadır. KF ve GKF bu pozisyonlarda tahminlerde bulunarak, uzunlukların yüzdelik hata oranını minimize etmektedir.

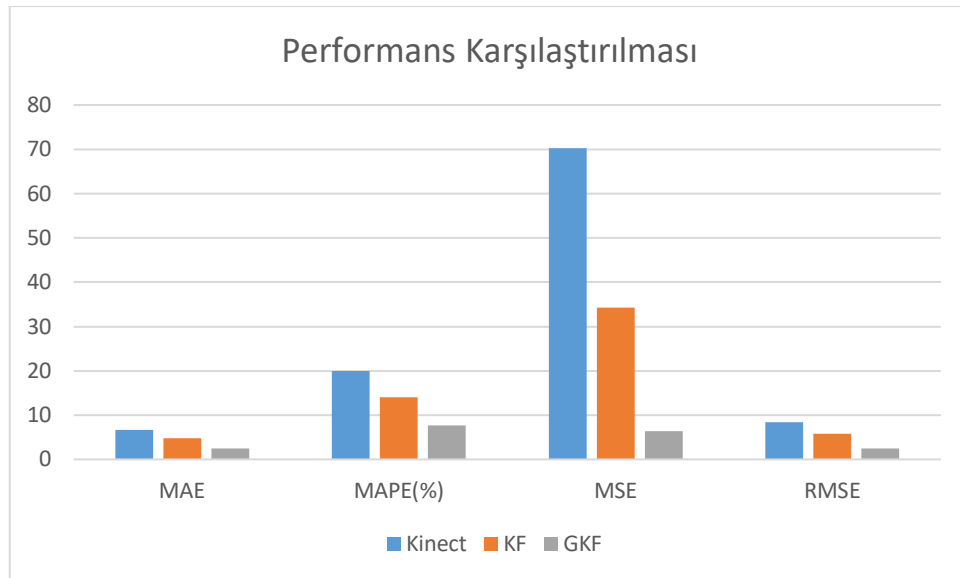
Adayların her bir pozunu (frame) incelenip gerçek değerler ile Kinect, KF ve GKF verileri karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistemin performansı ölçülürken istatistikte en yaygın kullanılan algoritmalar olan, ortalama mutlak hata (MAE-Mean

Absolute Error), ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE-Mean Absolute Percentage Error), ortalama kare hata (MSE-Mean Squared Error) ve ortalama kare hata karekökü (RMSE-Root Mean Square Error) hesaplanarak karşılaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kinect cihazı ile alınan veriler, gerçek değerlerle karşılaştırıldığında MAPE, MAE, MSE, RMSE değerlerinin yüksek çıktığı; KF yöntemiyle ise bu hataların bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Geliştirilen GKF algoritması uygulandığında ise MAE 2.523, MAPE 7.693, MSE 6.364 ve RMSE 2.523 değerlerine indiği gözlemlenmiştir. Veri elde etmede kullanılan yöntemlerin istatistiksel karşılaştırılması Tablo 4.2. ve Şekil 4.11.'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Yöntemlerin İstatistiksel Karşılaştırılması

	Kinect	KF	GKF
MAE	6,729	4,726	2,523
MAPE(%)	19,962	14,002	7,693
MSE	70,248	34,252	6,364
RMSE	8,381	5,853	2,523



Şekil 4.11 Yöntemlerin İstatistiksel Karşılaştırılması

Ölçülen her bir uzuv ayrı ayrı incelendiğinde MAE istatistik değerleri Tablo 4.3., MAPE yüzdelerik değerleri Tablo 4.4., MSE istatistikleri Tablo 4.5. ve RMSE istatistikleri ise Tablo 4.6.'da verilmiştir. Uzunluk ölçümlerinde kullanılan eklem noktaları zaman zaman çakışma ve kesintiye uğrasa da kişinin tam bir çömelme hareketi ele alındığında az bir framede gerçekleştirdiği için uzuvlar arası olasılıklar birbirinden çok farklılık göstermediği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.3. Uzuvarın MAE İstatistikleri

	Kinect	KF	GKF
GENEL	6,729	4,726	2,523
Üst kol	6,793	4,768	2,523
Ön Kol	6,706	4,711	2,492
Üst Bacak	6,709	4,712	2,493
Alt Bacak	6,708	4,711	2,493

Tablo 4.4. Uzuvarın MAPE İstatistikleri

	Kinect	KF	GKF
GENEL	19,962	14,002	7,693
Üst kol	19,862	13,921	7,652
Ön Kol	19,337	13,561	7,454
Üst Bacak	19,505	13,682	7,520
Alt Bacak	21,144	14,846	8,160

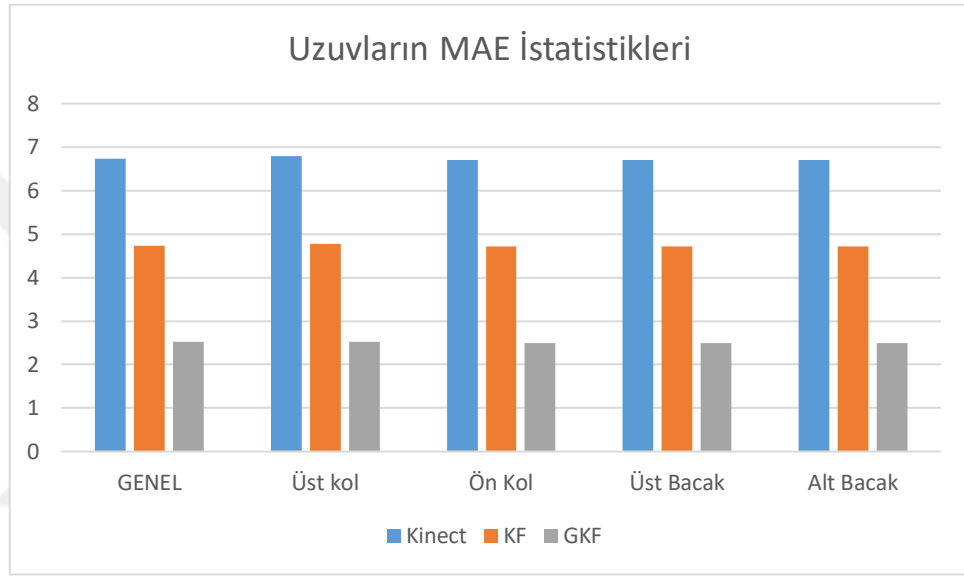
Tablo 4.5. Uzuvarın MSE İstatistikleri

	Kinect	KF	GKF
GENEL	70,248	34,252	6,364
Üst kol	71,481	34,819	6,364
Ön Kol	70,098	34,264	6,262
Üst Bacak	68,924	33,713	6,161
Alt Bacak	70,489	34,212	6,253

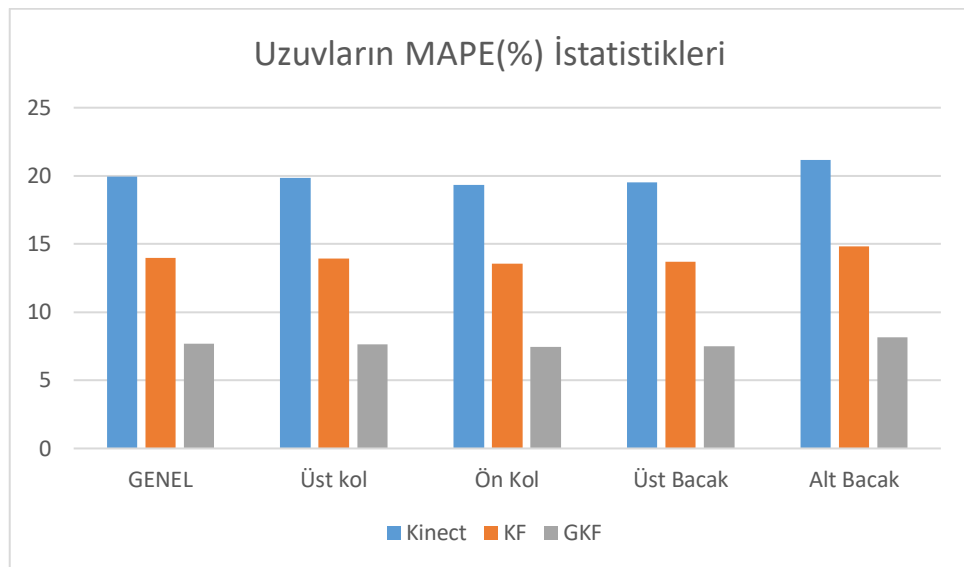
Tablo 4.6. Uzuvarın RMSE İstatistikleri

	Kinect	KF	GKF
GENEL	8,381	5,853	2,523
Üst kol	8,455	5,901	2,523
Ön Kol	8,372	5,854	2,502
Üst Bacak	8,302	5,806	2,482
Alt Bacak	8,396	5,849	2,501

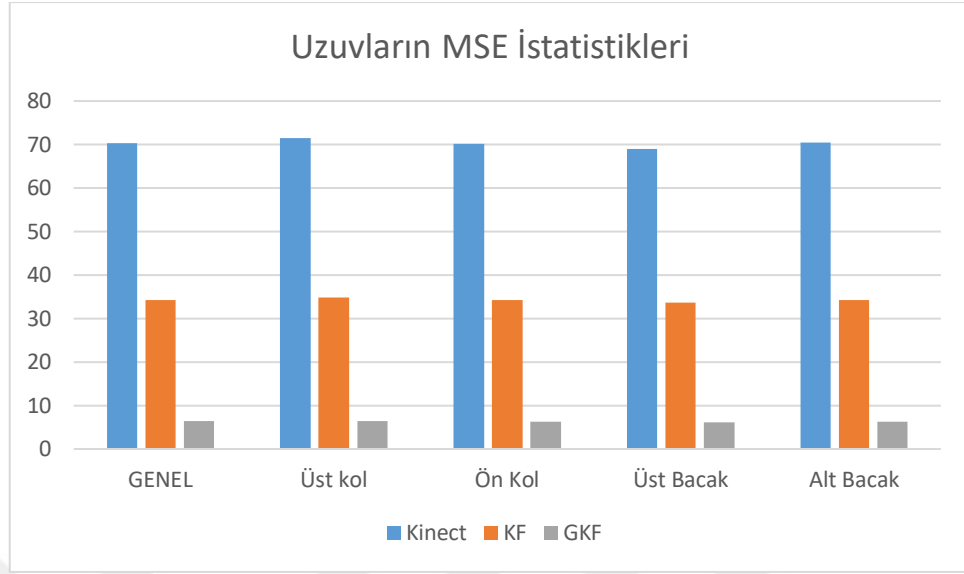
Hata oranlarının grafiksel gösterimi yapılacak olursa MAE istatistikleri Şekil 4.12., MAPE istatistikleri Şekil 4.13., MSE istatistikleri Şekil 4.14. ve RMSE istatistikleri Şekil 4.14.'te verilmiştir. İstatistikler her bir uzuv için incelendiğinde, Kinect cihazının ürettiği konumlara göre yapılan hesaplamaların hata oranının bütün uzuvlarda yüksek olduğu, GKF uygulanmış konumlara göre hesaplanan uzunlukların ise gerçek değerlere çok daha yakın olduğu görülmektedir.



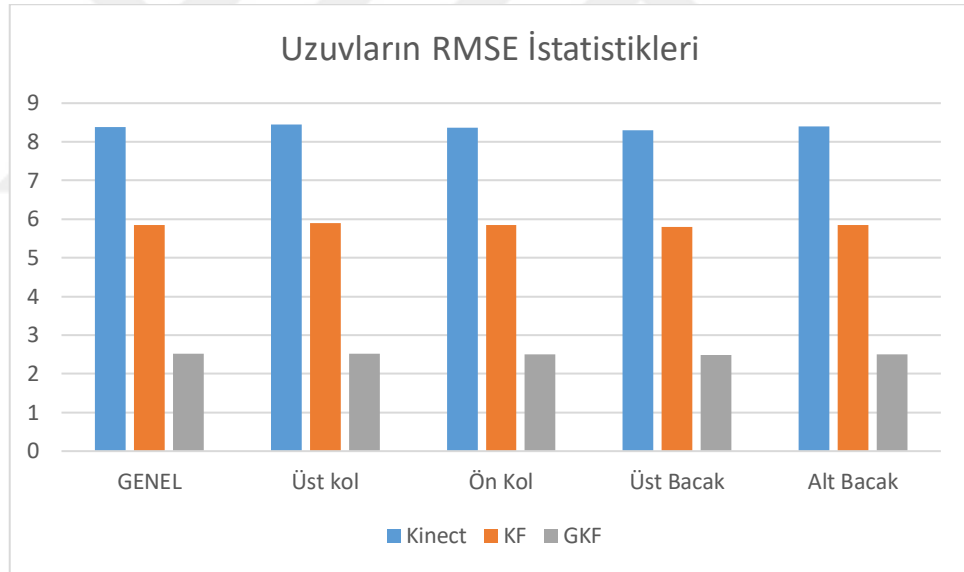
Şekil 4.12. Uzuvların MAE İstatistikleri



Şekil 4.13. Uzuvların MAPE(%) İstatistikleri



Şekil 4.14. Uzuvların MSE İstatistikleri



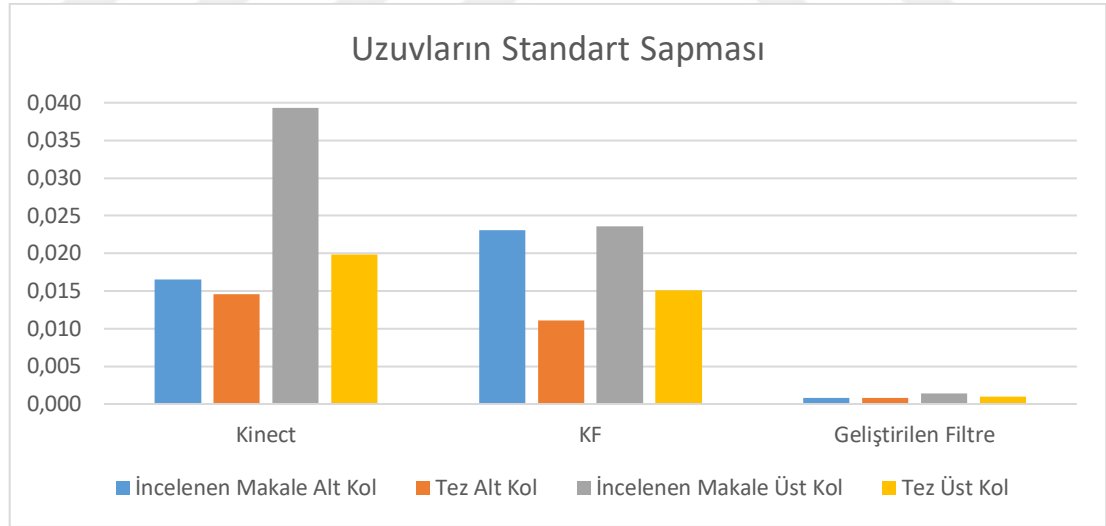
Şekil 4.15. Uzuvların RMSE İstatistikleri

Tripathy ve arkadaşlarının 2017 yılında Kinect tabanlı ölçümlerin kısıtlı kalman filtresi ile iyileştirmişlerdir [71]. Bu çalışmada Kinect 360 ve Kinect Xbox One cihazlarından elde edilen bilgiler kalman filtresi ve kısıtlı kalman filtresi kullanılarak iyileştirilmiştir. Performans karşılaştırması yapılırken herhangi bir ölçüm kullanılmamıştır. Uzuv uzunluğu sabit kalması gerektiğinden kovaryansı sıfır olması gerektiği düşünülerek, uzunlukların standart sapmasının sıfıra yakın olması performans göstergesi olarak

alınmıştır. Tez kapsamında yapılan ölçümlerin ve tasarlanan filtrelerin bu çalışmayla karşılaştırılması amacıyla benzer uzunlukların standart sapmaları Tablo 4.7. ve Şekil 4.16.'da verilmiştir. Geliştirilen filtre değerlerinin standart sapması için, incelenen çalışmada kısıtlı kalman filtresi sonucunda hesaplanan uzunluklar kullanılırken, tez çalışmamızda genişletilmiş kalman filtresi değerleri kullanılmıştır. Alt kol uzunluklarının standart sapması incelendiğinde yakın performans gözlemlense de üst kol değerlerinde gözle görülür bir fark bulunmaktadır. Standart sapma metodu ile üretilen uzunlukların doğruluğundan çok, uzunlukların biri birine olan sapmasına bakılmaktadır. Performans ölçümünde bir kriter olarak değerlendirilse de gerçek değerlerin elde edilmesinde tam bir çözüm üretmemektedir.

Tablo 4.7. Uzunlukların Standart Sapma Karşılaştırılması

	Kinect	KF	Geliştirilen Filtre
İncelenen Makale Alt Kol	0,0165	0,0231	0,0008
Tez Alt Kol	0,0146	0,0110	0,0007
İncelenen Makale Üst Kol	0,0393	0,0236	0,0014
Tez Üst Kol	0,0198	0,0151	0,0009



Şekil 4.16. Uzunlukların Standart Sapma Karşılaştırılması

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsan hareketlerinin analizi spor, fizik tedavi, sağlık, çalışan performansı başta olmak üzere, birçok alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda kişinin pozisyon, duruş ve hareketinin tespit edilmesi gibi hassasiyet gerektirmeyen bilgiler yeterli olabilmektedir. İnsan hareketinde hız, ivme, açı gerektiren çalışmalarda ise doğruluğun yüksek olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Daha doğru çözümler üretilmesi için çoklu sensörler (kamera vb.) veya kişinin üzerine takılan ekipmanlar (işaretçi vb.) kullanılmaktadır. Bu tür sistemler genellikle sabit mekanlarda çalışan pahalı, kurulumu ve kalibrasyonu zor sistemlerdir. İnsan üzerine yerleştirilen ekipmanlar hareketi kısıtlayabilmektedir. Aynı zamanda hareket analiz yapılacak olan herkese bu ekipmanların montaj edilmesi, ekipmanların hareket sırasında yerinden oynaması ve her aday için aynı standart noktaya montajı bu tür sistemlerin önemli dezavantajlarından. Aynı zamanda çoklu kamera kullanılmasına rağmen yine de kameraların görmediği noktalar olabilmekte ve bu sistemlerde bile sorunlar yaşanabilmektedir.

Kinect cihazı Microsoft tarafından Xbox 360 oyun konsolları için doğal kullanıcı arabirimi (NUI) olarak geliştirilmesine rağmen, birçok çalışmada kişilerin pozisyon, duruş ve hareket gibi hassasiyet gerektirmeyen analizlerinde kullanılmaktadır. Analizlerin çoğunda eklemlerin konumlarından çok, birbirleriyle olan ilişkileri kural tabanlı (el, kafa hizasının yukarısındaysa el kaldırılmıştır) olarak incelenmektedir. Bu tür çalışmalarda cihazın ürettiği gürültü, eklemlerin çakışması ve çalışma alanı dışına çıkılması gibi problemler göz ardı edilmek zorundadır.

Yapılan çalışma ile SAÜ, BESYO 2014 yılı ÖZYS'na giren adaylara yaptırılan çömelleme hareketi verileri incelenerek, gerçek vücut uzunluklarıyla Kinect verilerinden hesaplanan uzunluklar karşılaştırılmış ve ortalama mutlak hata yüzesi

%19,962, ortalama kare hata 790,248, ortalama mutlak hata yüzdesi ise 6,729 olarak hesaplanmıştır. Kinect cihazından alınan 3B konum bilgilerine, tasarlanan KF uygulandığında MAPE %14,002, MSE 34,252 ve MAE 4,726 olarak hesaplanmıştır. KF doğrusal olmayan sistemlerde istenilen performansı verememesine rağmen, Kinect cihazının ürettiği gürültüleri az da olsa azalttığı gözlemlenmiştir. Kinect verileri için doğrusal olmayan sistemlerde daha iyi sonuçlar üreten GKF tasarlandığında ise MAPE %7,693, MSE, 6,364 ve MAE 2,523 değerlerine düşürülmüştür.

Bu çalışma sayesinde hassasiyet gerektirmeyen ölçümler için kullanılan; ucuz, kurulumu kolay algılayıcıların (Kinect, Realsense gibi) verileri iyileştirilerek gerçeğe daha yakın veriler elde edilebilen bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, 3B uzayda hareket eden bir nesnenin (eklemler, uydu vb.) 3 eksenindeki hareket verilerindeki gürültülü veya belirsizlikleri düzeltilerek, gerçeğe daha yakın sonuçlar üretmesine olanak sağlayan bir altyapı oluşturmaktadır.

Tasarlanan filtrenin, 3B hareket yakalama sistemlerinde uygulanması fayda sağlayacaktır. En gelişmiş sistemlerden biri olarak gösterilen “Vicon Hareket Yakalama” sisteminde çoklu kamera kullanılmasına rağmen yakalanamayan, çakışan veya görünmeyen noktalar olabilmektedir. Aynı zamanda çoklu kameranın verisini iletilmesi ve işlenmesi gecikmeler de yol açabilmektedir. Bu tarzda sistemler için de GKF ile veri iyileştirmesi ve tahmini yapılarak, kamera sayısı azaltılabilecektir.

Birçok fizik tedavi ve atletizm merkezinde kişinin hareketleri asenkron olarak ölçülmeye çalışılmaktadır. Sonuçlara ulaşmak zaman ve iş gücü gerektirmektedir. Gerçeğe uygun ölçümler yapmaya olanak veren bu sistemle, insanların dirsek ve diz bükme açıları, istenilen hareketleri yapabilme oranı veya süresi gerçek zamanlı ölçülerek, anlık analiz ve raporlamalar oluşturulabilecektir. Benzer bir çalışma olarak sporcu veya dansçılara yapılması gereken hareketler ekran gösterilerek, kişinin hareketi gerçekleştirilmesi beklenerek, otonom bir eğitim ve antrenman sistemi geliştirilebilecektir. Sonuç olarak yapılan bu çalışma ile gerçek zamanlı hareket analizi sistemlerindeki gürültü ve belirsizlikleri gideren örnek bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Gavrilu, D. M., The visual analysis of human movement: A survey. *Comput. Vis. Image Underst.*, 73, 82–98, 1999.
- [2] Poppe, R., Vision-based human motion analysis: An overview. *Comput. Vis. Image Underst.*, 108, 4–18, 2007.
- [3] Aggarwal, J. K., Ryoo, M. S., Human activity analysis. *ACM Comput. Surv.*, 43, 1–43, 2011.
- [4] Aggarwal, J. K., Cai, Q., Human Motion Analysis: A Review. *Proc. IEEE Nonrigid Articul. Motion Work.*, IEEE, 90–102, 1997.
- [5] Aggarwal, J. K., Nandhakumar, N., On the computation of motion from sequences of images-A review. *Proc. IEEE*, 76, 917–935, 1988.
- [6] Morris, B. T., Trivedi, M. M., A survey of vision-based trajectory learning and analysis for surveillance. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 18, 1114–1127, 2008.
- [7] Moeslund, T. B., Hilton, A., Krüger, V., A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Comput. Vis. Image Underst.*, 104, 90–126, 2006.
- [8] Cédras, C., Shah, M., Motion-based recognition a survey. *Image Vis. Comput.*, 13, 129–155, 1995.
- [9] Moeslund, T. B., Granum, E., A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture. *Comput. Vis. Image Underst.*, 81, 231–268, 2001.
- [10] Wang, L., Hu, W., Tan, T., Recent developments in human motion analysis. *Pattern Recognit.*, 36, 585–601, 2003.
- [11] Kale, G. V., Patil, V. H., A Study of Vision based Human Motion Recognition and Analysis. *Int. J. Ambient Comput. Intell.*, 7, 75–92, 2016.
- [12] Makris, D., Ellis, T., Learning Semantic Scene Models From Observing Activity in Visual Surveillance. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B*, 35, 397–408, 2005.
- [13] Guesgen, H. W., Marsland, S., Using Contextual Information for Recognising Human Behaviour. *Int. J. Ambient Comput. Intell.*, 7, 27–44, 2016.
- [14] Hoffmann, M., Marques, H., Arieta, A., Sumioka, H., Lungarella, M., Pfeifer, R., Body Schema in Robotics: A Review. *IEEE Trans. Auton. Ment. Dev.*, 2, 304–324, 2010.

- [15] Jeong, S., Shin, S., An, J., Chung, S., 3D Modeling Of Musculoskeletal Cobb's Angles. 2013 6th Int. Conf. Biomed. Eng. Informatics, IEEE, 393–397, 2013.
- [16] Shawky, W., Seif-Elnasr, S., Samy, I., Analysis Of Musculoskeletal Disorders In Personal Care Industries In Egypt. NILES 2019 - Nov. Intell. Lead. Emerg. Sci. Conf., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 13–16, 2019.
- [17] Abdel Aal, M. M., Awwad, S. H., Ahmed, F. H., Wasfi, A. G., Ghanim, T. M., Nabil, A. M., Survey: Automatic Recognition Of Musculoskeletal Disorders From Radiographs. Proc. - 2018 13th Int. Conf. Comput. Eng. Syst. ICCES 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 56–62, 2019.
- [18] Lin, J. F.-S., Kulic, D., Online Segmentation of Human Motion for Automated Rehabilitation Exercise Analysis. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., 22, 168–180, 2014.
- [19] Bertini, M., Del Bimbo, A., Nunziati, W., Model Checking For Detection Of Sport Highlights. Proc. 5th ACM SIGMM Int. Work. Multimed. Inf. Retr. - MIR '03, ACM Press, New York, New York, USA, 215, 2003.
- [20] Watanabe, T., Shibusawa, S., Kamada, M., Yonekura, T., Ohtsuka, N., Design and Development of Lower Limb Chair Exercise Support System with Depth Sensor. Trans. Networks Commun., 3, 2015.
- [21] Eski, H., Öz, C., Kocabıçak, Ü., A Real-Time Remote Physiotherapy System Using Motion Detection Sensor. Int. Sci. Technol. Conf., Russia, 17, 2015.
- [22] Patanapanich, M., Vanijja, V., Dajpratham, P., Self-Physical Rehabilitation System Using The Microsoft Kinect. 2014 Int. Conf. Inf. Technol. Syst. Innov. ICITSI 2014 - Proc., IEEE, 241–247, 2014.
- [23] Dao, T. T., Tannous, H., Pouletaut, P., Gamet, D., Istrate, D., Ho Ba Tho, M. C., Interactive and Connected Rehabilitation Systems for E-Health. IRBM, 37, 289–296, 2016.
- [24] Kalman, R. E., others., A new approach to linear filtering and prediction problems. J. Basic Eng., 82, 35–45, 1960.
- [25] Amamra, A., Aouf, N., GPU-based real-time RGBD data filtering. J. Real-Time Image Process., 14, 323–340, 2018.
- [26] Yi Zhang, Huosheng Hu, Huiyu Zhou., Study On Adaptive Kalman Filtering Algorithms In Human Movement Tracking. 2005 IEEE Int. Conf. Inf. Acquis., IEEE, 11–15, 2005.
- [27] Zhang, J. H., Li, P., Jin, C. C., Zhang, W. A., Liu, S., A novel adaptive kalman filtering approach to human motion tracking with magnetic-inertial sensors. IEEE Trans. Ind. Electron., 67, 8659–8669, 2020.
- [28] Xiaoping Yun, Aparicio, C., Bachmann, E. R., McGhee, R. B., Implementation And Experimental Results Of A Quaternion-Based Kalman Filter For Human Body Motion Tracking. Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., IEEE, 317–322, 2005.

- [29] Xiaoping Yun, Lizarraga, M., Bachmann, E. R., McGhee, R. B., An Improved Quaternion-Based Kalman Filter For Real-Time Tracking Of Rigid Body Orientation. Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), IEEE, 1074–1079, 2003.
- [30] Medved, V., Measurement of Human Locomotion, CRC Press, 2000.
- [31] Beth, T., Boesnach, I., Haimerl, M., Moldenhauer, J., Bös, K., Wank, V., Characteristics In Human Motion – From Acquisition To Analysis. Int. Conf. Humanoid Robot., Germany, 2003.
- [32] Welch, G., Foxlin, E., Motion tracking: No silver bullet, but a respectable arsenal. IEEE Comput. Graph. Appl., 22, 24–38, 2002.
- [33] Roetenberg, D., Luinge, H., Slycke, P., Xsens MVN: Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. Xsens Motion Technol. BV, 1–7, 2009.
- [34] Schepers, M., Giuberti, M., Bellusci, G., Xsens MVN : Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing. Xsens Technol., 1–8, 2018.
- [35] Zhou, H., Hu, H., Human motion tracking for rehabilitation-A survey. Biomed. Signal Process. Control, 3, 1–18, 2008.
- [36] Tian, Z., Wei, Y. L., Chang, W. N., Xiong, X., Zheng, C., Tsai, H. M., Lin, K. C. J., Zhou, X., Augmenting Indoor Inertial Tracking With Polarized Light. MobiSys 2018 - Proc. 16th ACM Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv., Association for Computing Machinery, Inc, 362–375, 2018.
- [37] Lympourides, V., D. K. Arvind, Parker, M., Fully Wireless , Full Body 3-D Motion Capture for Improvisational Performances. Perform. Arts, 3–6, 2007.
- [38] O'Brien, J., Hodgins, J., Computer Animation. 2001.
- [39] <https://teslasuit.io/blog/motion-capture-what-it-is/>, Erişim Tarihi: 15 Şubat 2020.
- [40] <http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>, Erişim Tarihi: 21 Şubat 2020.
- [41] Ribeiro, T. H., Motion Capture Technology — Benefits and Challenges. Int. J. Innov. Res. Technol. Sci. Int. J. Innov. Res. Technol. Sci., 48, 2321–1156, 2016.
- [42] https://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture#Optical_systems, Erişim Tarihi: 27 Şubat 2020.
- [43] Johansson, G., Visual perception of biological motion and a model for its analysis. Percept. Psychophys., 14, 201–211, 1973.
- [44] <https://www.qualisys.com/>, Erişim Tarihi: 06 Mart 2020.
- [45] <https://www.vicon.com/>, Erişim Tarihi: 07 Mart 2020.

- [46] Taş, S. T. A. Ş., Baki, A. B., Erdoğanoglu, Y. E., Akbaş, E. A., Kınıklı, G. İ. K., Erden, Z. E., Bayramlar, Y. K. B., Diz osteoartrit şiddetinin yürüyüşün kinematik parametreleri üzerine etkileri. *Eff. Knee Osteoarthr. Sev. Kinematic Gait Parameters*, 100–106, 2014.
- [47] Caniberk, M., Sesli, F. A., Çetin, C., Use of digital photogrammetry in 3D motion analysis and biomechanics of sports. *Turkish J. Sport. Med.*, 51, 117–127, 2017.
- [48] <https://codamotion.com/>, Erişim Tarihi: 07 Mart 2020.
- [49] Zhou, H., Hu, H., Harris, N. D., Hammerton, J., Applications of wearable inertial sensors in estimation of upper limb movements. *Biomed. Signal Process. Control*, 1, 22–32, 2006.
- [50] Zhou, H., Hu, H., Inertial sensors for motion detection of human upper limbs. *Sens. Rev.*, 27, 151–158, 2007.
- [51] <https://www.stereolabs.com/zed-mini/>, Erişim Tarihi: 02 Temmuz 2020.
- [52] <https://www.stereolabs.com/zed/>, Erişim Tarihi: 02 Temmuz 2020.
- [53] <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d415/>, Erişim Tarihi: 02 Temmuz 2020.
- [54] <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>, Erişim Tarihi: 02 Temmuz 2020.
- [55] Alkhawaja, F., Jaradat, M., Romdhane, L., Techniques Of Indoor Positioning Systems (IPS): A Survey. 2019 *Adv. Sci. Eng. Technol. Int. Conf.*, IEEE, 1–8, 2019.
- [56] <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>, Erişim Tarihi: 03 Temmuz 2020.
- [57] <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/92329/intel-realsense-camera-sr300.html>, Erişim Tarihi: 03 Temmuz 2020.
- [58] <http://xtionprolive.com/primesense-carmine-1.09>, Erişim Tarihi: 03 Temmuz 2020.
- [59] <http://xtionprolive.com/asus-xtion2>, Erişim Tarihi: 03 Temmuz 2020.
- [60] https://www.sony-depthsensing.com/Portals/0/Download/WEB_20120907_SK_DS325_Datasheet_V2.1.pdf, Erişim Tarihi: 04 Temmuz 2020.
- [61] Tao, Y., Hu, H., Building A Visual Tracking System For Home-Based Rehabilitation. *Chinese Autom. Comput. Soc. Conf.*, England, 443–448, 2003.
- [62] Backlund, A., The definition of system. *Kybernetes*, 29, 444–451, 2000.
- [63] https://en.wikipedia.org/wiki/State-space_representation, Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2020.
- [64] Weiss, G., Feedback control: Theory and design. *Automatica*, 22, 761–762, 1986.

- [65] Strid, I., Strid, I., Walentin, K., Block Kalman filtering for large-scale DSGE models. 2008.
- [66] Taşci, T., Öz, C., A closer look to probabilistic state estimation-case: particle filtering. *Optoelectron. Adv. Mater. Commun.*, 8, 521–534, 2014.
- [67] Welch, G., Bishop, G., *An Introduction to the Kalman Filter*, y.y.
- [68] Simon, D., *Optimal state estimation: Kalman, H_∞ , and nonlinear approaches*, 2006.
- [69] Gomez, J. M., *Kalman Filtering. Appl. Math. Integr. Navig. Syst. Third Ed.*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston ,VA, 181–234, 2007.
- [70] https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter, Erişim Tarihi: 13 Ekim 2020.
- [71] Tripathy, S. R., Chakravarty, K., Sinha, A., Chatterjee, D., Saha, S. K., Constrained Kalman Filter For Improving Kinect Based Measurements. *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst., IEEE*, 1–4, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin ESKİ, 15.09.1980 tarihinde Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Samsun'da tamamladı. 1997 yılında 19 Mayıs Lisesi'nden mezun oldu. 1997 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nü 2002 yılında bitirdi. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2005 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.