

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



AKILLI VERİ ALIM ELDİVENİ PROTOTİPİ

Yüksek Lisans Tezi

Levent YAVAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE

SAMSUN
2022

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

İmza

... / ... / 2022

Levent YAVAN

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: AKILLI VERİ ALIM ELDİVENİ PROTOTİPİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 23/06/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 2

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

... / ... / 2022

Dr.Öğr.Üyesi Cengiz TEPE

ÖZET

AKILLI VERİ ALIM ELDİVENİ PROTOTİPİ

Levent YAVAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Eylül/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE

El ve parmak hareketlerinden veri toplama biyomedikal bilimlerde ve bir çok mühendislik uygulamasında kullanılır. Bu hareketlerden veri toplanırken farklı sensörler ve yöntemler kullanılır. Uygulamalarda kullanılan sensör sayısı, tipi ve yerleşim yerleri farklılık göstermektedir. Seçilen sensör tipine bağlı olarak doğruluk, hassasiyet ve esneklik değişmektedir. Günümüzde bu anlamda el ve parmak hareketlerinden veri alınmasında IMU(ivme+jiroskop) sensörlerin kullanımı daha çok tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında el üstüne ve parmaklara yerleştirilen IMU sensörleri sayesinde parmakların açısal konum, açısal hız ve ivme bilgileri elde edilmiştir. Sensörler 3 eksen ivme 3 eksen jiroskop olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Her bir parmak ucuna ve el üzerine yerleştirilen toplam 6 adet sensör Raspberry Pi 4 kartına bağlanmıştır. Sensörlerden elde edilen ivme ve jiroskop verileri SPI haberleşme yöntemi kullanılarak Raspberry Pi kartına aktarılmıştır. Sensörlerden gelen veriler Python programla dili ile işlenerek gerekli hesaplamalar ve grafikler elde edilmiştir. Parmak uçlarına ve el üstüne yerleştirilen IMU sensörlerinden elde edilen ivme ve jiroskop verileri Kalman filtresi ile füzyon yapılarak açısal konum, ivme ve açısal hız bilgileri elde edilmiştir. Gelen verilerin görselleştirilmesi ve grafik kullanıcı arayüzü için PyQt5 kütüphanesi tercih edilmiştir. Hazırlanan kullanıcı arayüzünde her bir parmak için açı, ivme ve açısal hız bilgilerinden istenen veriler gerçek zamanlı olarak sayısal ve grafiksel olarak gösterilmektedir. Aynı zamanda seçilen parmak için açı, ivme ve açısal hız verisinin tamamı gerçek zamanlı sayısal ve grafiksel olarak gösterilmektedir. Elde edilen bütün veriler istenirse kayıt altına alınabilmekte tekrar incelenebilmesi için görseleştirilmekte ve dışarıya aktarılabilir. Kullanıcı arayüzünde her bir sensörün veri alınmadan önce offset ayarı, ivme, jiroskop ölçüm hassasiyet aralığı ve örneklem oranı seçimine imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Sensörlerin parmak uçlarına düzgün yerleşmesi, parmak hareketlerinin rahat olabilmesi ve kolay giyilebilmesi için esnek kumaştan eldiven tasarımı yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: IMU, İvmeölçer, Jiroskop, SPI ile IMU sensör okuma, Veri alım eldiveni, Kalman Filtresi, Parmak hareket açısı, Python ile IMU sensör okuma

ABSTRACT

SMART DATA RECEPTION GLOVE DESIGN

Levent YAVAN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Master, September/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Cengiz TEPE

Data collection from hand and finger movements is used in biomedical sciences and many engineering applications. Different sensors and methods are used when collecting data from these movements. The number, type and location of sensors used vary. Accuracy, sensitivity and flexibility vary depending on the sensor type chosen. Today, in this sense, the use of IMU (acceleration + gyroscope) sensors is more preferred in obtaining data from hand and finger movements.

In this thesis study, the fingers' angle, speed and position information were obtained using IMU sensors placed on the hand and fingers. The sensors have 6 degrees of freedom, three-axis acceleration and three-axis gyroscope. A total of 6 sensors placed on each finger tip and hand are connected to the Raspberry Pi 4 board. The acceleration and gyroscope data obtained from the sensors were transferred to the Raspberry Pi board using the SPI communication method. The data coming from the sensors were processed with Python programming language and necessary calculations and graphics were obtained. Angular position, acceleration and angular velocity information were obtained by fusing the acceleration and gyroscope data obtained from the IMU sensors placed on the fingertips and the hand with the Kalman filter. PyQt5 library is preferred for visualization of incoming data and graphical user interface. In the prepared user interface, the data requested from each finger's angle, acceleration and gyroscope information are displayed numerically and graphically in real-time. At the same time, all the angle, acceleration and gyroscope data for the selected finger are displayed numerically and graphically in real-time the data obtained can be recorded, visualized and exported for re-examination if desired. It is designed in the user interface to allow the selection of offset adjustment, acceleration, gyroscope measurement sensitivity range and sample rate before data is received for each sensor. Gloves made of flexible fabric are designed for the sensors to be placed on the fingertips properly, for the finger movements to be comfortable and easy wearing.

Keywords: IMU, Accelerometer, Gyroscope, IMU sensor reading with SPI, Data acquisition glove, Kalman Filter, Finger movement angle, IMU sensor reading with Python

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Dr. Öğr.Üyesi Cengiz TEPE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Levent YAVAN



İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORUBEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Kapsamı.....	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Akademik Çalışmalar	3
2.2. Ticari ve Açık Kaynak Çalışmalar	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1.Donanım	10
3.1.1. İvmeölçer	10
3.1.2. Jiroskop.....	12
3.1.3. Ataletsel Ölçü Birimi (IMU)	13
3.1.4. İvmeölçer ve Jiroskop Seçim Kriterleri	14
3.1.5. Kullanılacak IMU Sensörünün Belirlenmesi	15
3.1.6. BMI160 IMU Sensörünün Teknik Özellikleri.....	22
3.1.7. Raspberry Pi.....	23
3.1.8. BMI160 İle Raspberry Pi Bağlantısı ve Haberleşme Protokolleri.....	24
3.1.9. Devre Bağlantı Şeması	28
3.1.10. Eldiven Üzerine Sensörlerin Yerleştirilmesi	29
3.2. Yazılım	30
3.2.1. SPI Kanalına Bağlanacak Sensör Sayısını Artırma	31
3.2.2. Yazılım İçin Gerekli Modüller	33
3.2.3. Kullanıcı Arayüzü.....	33
3.2.3.1. İvme ve Jiroskop Normal Mod	34
3.2.3.2. Konfigürasyon Ayarları	34
3.2.3.3. Tek Parmak İstenen Veri Grafiği	35
3.2.3.4. Tek Parmak Tüm Veri Grafiği	36
3.2.3.1. Tüm Parmaklar İstenen Veri Grafiği.....	37
3.2.3.2. Kayıtlı Verilerin Görüntülenmesi	38
3.2.4. Açısal Değerlerin Hesaplanması.....	39
3.2.4.1. İvmeölçer Verileri İle Açının Hesaplanması.....	39
3.2.4.2. Jiroskop verileri ile açının hesaplanması	40
3.2.5. Tamamlayıcı (Complementary) Filtresi	41
3.2.1. Kalman Filtresi	43
4. BULGULAR.....	46
4.1. Ofsetleme İşlemi.....	46
4.2. Sensör Verilerine Tamamlayıcı Filtre Uygulanması.....	48
4.3. Sensör Verilerine Kalman Filtre Uygulanması	49
4.4. Tek Parmak İstenen Verinin Ölçülmesi	49

4.5. Tek Parmak Tüm Verilerin Ölçülmesi	51
4.6. Tüm Parmak Verilerin Ölçülmesi	51
4.7. Kayıtlı Verilerin Görselleştirilmesi	52
5. TARTIŞMA.....	55
5.1. Tasarlanan Akıllı Veri Alım Prototipinin Literatür ile Karşılaştırılması	55
5.2. Tasarlanan Akıllı Veri Alım Prototipinin Ticari Ürünler ile Karşılaştırılması	57
6. SONUÇ	59
KAYNAKÇA.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61



SİMGELER VE KISALTMALAR

CAD	: Bilgisayar Destekli Dizayn
DIP	:Distal Interfalangeal
DOF	:Serbestlik Derecesi
FOC	:Hızlı Ofset kompensasyonu
FSR	: Kuvvete Duyarlı Direnç
GPS	:Küresel Konumlama Sistemi
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş Çıkış
I2C	:İnter- İntegrated Circuit
ID	:Kimlik Numarası
IMU	: Ataletsel Ölçü Birimi
MCP	:Meta Karpofalangeal
MEMS	:Mikro Elektro Mekanik Sistem
MISO	: Master In Slave Out
MOSI	:Master Out Slave In
ODR	:Veri Çıkış Oranı
PIP	:Proksimal Interfalangeal
SCL	: Serial Clock
SCLK	: Serial Clock
SDA	: Serial Data Line
SPI	: Seri Çevresel Arayüz
SS	:Slave Select
UART	:Evrensel Asenkron Alıcı Verici

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Elin anatomik yapısı (Caeiro-Rodríguez et al., 2021)	9
Şekil 3.2. Akıllı veri eldiven tipleri (Caeiro-Rodríguez et al., 2021).....	10
Şekil 3.3. İvmeölçerin çalışma prensibi	11
Şekil 3.4. Kapasitif MEMS ivmeölçerin İç Mekanizması (Howtomechatronics, 2022).....	12
Şekil 3.5. Coriolis etkisi(Device, 2022).....	12
Şekil 3.6.Kapasitif MEMS jiroskopun iç mekanizması (Howtomechatronics, 2022)	13
Şekil 3.7. İki tip sensör içeren IMU (Ahmad et al., 2013).....	14
Şekil 3.8. Üç tip sensör içeren IMU (Ahmad et al., 2013).....	14
Şekil 3.9. IMU deney test düzeneği CAD tasarımı	16
Şekil 3.10. Gerçeklenen deney düzeneği	16
Şekil 3.11. Deney düzeneği elektriksel bağlantı şeması	17
Şekil 3.12. A-Filtresiz açı grafiği B-Kalman filtreli açı grafiği.....	19
Şekil 3.13. Deney düzeneği kullanıcı arayüzü.....	20
Şekil 3.14. IMU sensörleri ve enkoder açı grafiği	21
Şekil 3.15. IMU sensörlerinin ortalama karesel hata grafiği	21
Şekil 3.16. BMI160 IMU sensör ön ve arka görünüşü (soldan sağa)	22
Şekil 3.17. Raspberry Pi 4 Modeli	24
Şekil 3.18. Raspberry Pi 4 GPIO diyagram.....	24
Şekil 3.19. I2C master-slave iletişim şeması	25
Şekil 3.20. Raspberry Pi konfigürasyon penceresi-1	26
Şekil 3.21. Raspberry Pi konfigürasyon penceresi-2	27
Şekil 3.22. SPI master-slave iletişim şeması.....	27
Şekil 3.23. SPI mod 0 (CPOL=0, CPHA=0) (Dhaker, 2018)	28
Şekil 3.24. SPI mode 2 (CPOL=1, CPHA=1) (Dhaker, 2018)	28
Şekil 3.25. Devre bağlantı şeması.....	29
Şekil 3.26. Sensör yerleşim blok diyagramı	29
Şekil 3.27. Sensörler yerleştirilmemiş eldiven şekli	30
Şekil 3.28. Sensörler yerleştirildikten sonraki eldiven şekli	30
Şekil 3.29 Arayüz pencerelerinin birbiri ile bağlantısı	33
Şekil 3.30. Kullanıcı arayüzü ana menü	34
Şekil 3.31. Sensör konfigürasyon ayarları	35
Şekil 3.32. Tek parmak istenen veri grafiği	36
Şekil 3.33. Tek parmak tüm veri grafikleri.....	37
Şekil 3.34. Tüm parmaklar istenen veri grafiği.....	38
Şekil 3.35. Kayıtlı verilerin gösterilmesi	39
Şekil 3.36. Eksenlerdeki dönüş hareketi	40
Şekil 3.37 Tamamlayıcı filtre blok diyagramı (Gui et al., 2015).....	41
Şekil 3.38 Tamamlayıcı filtre akış şeması (Hajdu, Brassai, & Szekely, 2017)	43
Şekil 3.39. Kalman filtresi blok diyagramı	45
Şekil 4.1. İşaret parmak IMU sensörü ofset alma	47
Şekil 4.2. Ofsetleme öncesi hareketsiz durumda jiroskop değerleri	47
Şekil 4.3. Ofsetleme sonrası hareketsiz durumda jiroskop değerleri	47
Şekil 4.4. Ofsetleme öncesi yatay pozisyonda ivme değerleri.....	48
Şekil 4.5. Ofsetleme sonrası yatay pozisyonda ivme değerleri.....	48
Şekil 4.6. X ve Y eksenindeki hareketlere uygulanan tamamlayıcı filtre	48
Şekil 4.7. X ve Y eksenindeki hareketlere uygulanan Kalman filtre örneği.....	49
Şekil 4.8 Tek parmak istenen veri grafiğinin çizdirilmesi	50
Şekil 4.9. Gonyometre ile ölçüm doğrulama	50
Şekil 4.10. İşaret parmakla ilgili tüm verilerin görselleştirilmesi	51
Şekil 4.11. Tüm parmak hareketlerinden elde edilen açısal hız grafiği	52
Şekil 4.12. Kayıtlanmış bir ivme verisinin tekrar çizdirilmesi	53
Şekil 4.13. Kayıtlanmış ivme verisinin resim olarak dışarıya alınması	54

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Raspberry Pi Bağlantı Pin Numaraları	16
Tablo 3.2. Test için kullanılan IMU sensörlerin özellikleri	18
Tablo 3.3. BMI160 sensörünün teknik özellikleri	23
Tablo 3.4. Raspberry Pi BMI160 SPI haberleşme pin bağlantıları.....	28
Tablo 4.1. Sensör açı verileri ile gonyometre verilerinin karşılaştırılması	50
Tablo 5.1. Araştırma amaçlı yapılan akıllı eldiven özellikleri.....	55
Tablo 5.2. Ticari amaçlı ve açık kaynak akıllı eldiven tasarımları	57



1. GİRİŞ

Telefonunuz ile bir araba yarışı oynamak, değişen hava koşullarına rağmen bir dronu havada tutmak, evimizi bir robot elektrik süpürgeciyle süpürmesi, VR başlığı ile sanal bir galeride dolaşmak, hareket halindeyken net resim ve videolar çekmek, GPS sinyallerinin olmadığı kapalı bir mekânda nerede olduğunuzu bilmek, evinizden tenis kortunda oynuyormuş gibi tenis oynamak...Günümüzde kullanılan bu tür uygulamaları çoğaltmak mümkün ve hepsinin ortak yanı ise harekettir. Bütün bu uygulamalarda hareketin algılanması için sensörler kullanılır ve hassas hareket algılaması için en çok tercih edilen sensör IMU hareket sensörleridir. IMU sensörlerinin hassasiyetleri kadar fiziksel ölçülerinin oldukça küçülmesi uygulamalarda daha çok tercih edilmesine neden olmuştur. Üretim maliyetlerinin düşmesi uygulama alanlarını genişletmiştir. Bir IMU açısal hızı, ivmeyi ve manyetik alanı ölçen içinde farklı sensörleri barındıran sensörlerdir. Bu sensörlerin içinde 3 eksen ivmeölçer, 3 eksen jiroskop bazı türlerinde 3 eksen manyometre ve sıcaklık sensörü bulunur.

Her ekseninde ivme ve açısal hız ölçüm yapabilmeleri, boyutlarının küçülmesi, güç tüketimlerinin azalması insan hareketlerinin algılanabilmesi için giyilebilir cihazların yapılmasını mümkün kılmıştır. Giyilebilir teknolojiler günümüzde sağlık, spor ve eğlence gibi alanlarda kullanılmaktadır. Vücudun bir bölgesine ya da yakınına sensörü yerleştirebilmek toplanan verilerin doğruluğu ve kalitesi açısından önemlidir. Aynı zamanda yerleştirilen sensör kişiyi rahatsız etmemeli ve hareketini kısıtlanmamalıdır. Fiziksel ölçülerinin oldukça küçülmesi, vücudun herhangi bir bölgesine kolaylıkla yerleştirilebilmesi ve farklı sensörleri içinde barındırmasından dolayı IMU sensörleri giyilebilir teknolojilerinde en çok kullanılan sensördür. Bu özellikleri sayesinde bir sporcunun spor yaparken veya bir kişinin günlük rutin hayatını devam ederken hiçbir kısıtlama olmadan hareket verisi toplamak mümkündür.

Giyilebilir teknolojilerde günümüzde animasyon, robotik, sanal gerçeklik medikal ve biyomekanik gibi alanlarda eldiven teknolojileri sıkça görmek mümkündür. Bu tezde parmak uçlarına yerleştirilen IMU sensörleri sayesinde parmak hareketlerinin açısal konum, açısal hız ve ivme gibi verileri elde amaçlı giyilebilir bir eldivenin donanımsal ve yazılımsal olarak tasarımı yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

El ve parmaklardaki hareketlerin açısal konumu, hızı ve ivmesi tespit edilerek dijitalleştirilmesi sanal gerçeklik, biyomekanik ve animasyon olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardaki çalışmalarda el ve parmaklardaki hareket açılarının tespit edilerek gerçek zamanlı olarak dijital olarak elde edilmesi önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. El ve parmak hareketlerinin açı, hız ve konum tespitinde farklı sensörler ve farklı yerleşim şekilleri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında hazırlanan akıllı veri alım eldiven tasarımı çalışmasında amaç parmak hareketlerine dayalı biyomedikal ve diğer mühendislik alanlarında yapılacak çalışmalarda kullanılmak amacıyla IMU sensörleri kullanılarak parmak hareketlerin açısal konum, açısal hız ve ivme değerlerinin hassas bir şekilde ölçülerek gerçek zamanlı olarak Raspberry Pi'ye aktararak verilerin görselleştirilmesi ve kayıt edilmesini sağlayan bir arayüz oluşturmaktır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez kapsamında parmak hareketlerini kısıtlamayan rahat giyilebilir bir eldiven tasarımı yapılarak parmak uçlarına IMU hareket sensörleri yerleştirilmiştir. Parmak hareketlerinin açısal konum, açısal hız ve ivme bilgisinin dijital bilgiye dönüştürülerek RaspberryPi aktarılmış ve bir program arayüzü üzerinde veriler görselleştirilerek kaydedilmiştir. Verilerin işlenmesinde programlama dili olarak Python programlama dili görsel arayüz tasarımında PyQT5 kullanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Veri eldivenleri el hareketlerini tanıma için bir dizi sensör, veri işleme devreleri, kablolu veya kablosuz bağlantı tipi ve sensörleri yerleştirmek için malzemelerden meydana gelen giyilebilen cihazlardır. Veri eldivenleri el kinematiğine uygun giyilebilir sistemlerdir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte mekanik, dirençli, optik, kapasitif ve son olarak IMU sensörleri el kinematiğini izlemek için veri eldivenlerine entegre edilmiştir. Mevcut veri eldivenleri ticari ve araştırma olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Bu tez kapsamında parmak hareketlerinin verilerini elde etmek için yapılan ticari ürünler ve araştırma amaçlı veri eldivenleri incelenerek özetlenmiştir.

2.1. Akademik Çalışmalar

Rizwan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada Amerikan işaret dilinde hareketlere karşılık gelen alfabe ve kelimeleri çevirebilen giyilebilir bir eldiven geliştirdiler. Yaptıkları eldivende parmak bükülmelerini tespit etmek için flex sensör ve el hareketlerini algılamaya yardımcı olan bir ivmeölçer kullanmışlardır. Hareketleri alfabelere ve kelimelere çevirmek için basit bir sınıflandırma algoritması kullanarak sonuçları android işletim sistemi olan bir telefonda görüntülenebilir ve duyulabilir hale getirmişlerdir (Rizwan, Khan, & Imran, 2019).

Bor-Shing Lin ve arkadaşları tıp alanında kullanılmak üzere el parmak eklemlerinin hareket aralıkları hesaplamak için IMU sensörlerinden faydalanan bir eldiven tasarımı yapmışlardır. Bu eldiven kolayca giyilebilir ve el hareketlerinin ham verilerini toplayıp bir füzyon algoritmasından geçirdikten sonra doktorlar tarafından yorumlanabilecek bir hale dönüştürmektedir (Lin et al., 2018).

James Connolly ve arkadaşları Anthritis hastalığının teşhisinde klinik ortamda kullanılacak bir eldiven tasarlamışlardır. Anthritis el parmak eklemlerinin tutulmasına neden olan ağrılı ve sakat bırakabilen bir hastalıktır. Bu hastalık teşhisinde parmak ölçümleri klinik personel tarafından yoğun emek gerektiren muayenelerle tespit edilir. Ancak bu ölçümler çoğu zaman yanlıştır. Geliştirdikleri eldiven sayesinde başparmak ve diğer parmaklardaki hareket kaybını doğru şekilde ölçülebilmektedir. Tasarımı yapılan eldivenin farklı el büyüklükleri olan kişilere uyum sağlayabilen ve 9 serbestlik derecesine sahip olan IMU sensörleri ile donatılmıştır (Connolly, Condell, O'Flynn, Sanchez, & Gardiner, 2017).

Chaithanya Kumar Mummadi ve arkadaşları parmak uçlarına takılan IMU

sensör verileri kullanarak eldivene gömülü hareket sınıflandırıcı içeren bir eldiven tasarımı yapmışlardır. 57 katılımcıyla yaptıkları deney setinde Fransız işaret dilinden alınan 22 el hareketi test etmişlerdir. Jiroskop ve ivmeölçer verilerini tamamlayıcı filtre geçirerek %93 'lük bir başarıma elde etmişlerdir. Yaptıkları eldiven bluetooth bağlantısı ile hareketleri gerçek zamanlı olarak işleyerek hareketleri akıcı bir şekilde kullanabilmişlerdir (Mummadi et al., 2018).

Rachel C.King ve arkadaşları laparoskopik cerrahisinde beceri geliştirmeye yönelik bir eldiven tasarımı yapmışlardır. Laparoskopik cerrahi karmaşık alet kontrolü, kapsamlı el becerisi ve el-göz koordinasyonu isteyen cerrahi bir işlemdir. Yaptıkları çalışmada laparoskopik el hareket verilerinin yakalanması için kullandıkları ivmeölçerlerden gelen verileri kablosuz olarak aktarmışlardır. Daha sonra yapılan eğitimlerden alınan verilerin cerrahi performans gelişimi sağladığını deneysel olarak doğrulamışlardır (R. C. King, Atallah, Lo, & Yang, 2009).

Pei-ChiHsiao ve arkadaşları eli yaralanan hastaların elin iyileşme durumunu doktorların değerlendirebilmeleri için bir veri eldiveni geliştirmişlerdir. Yaralı elin iyileşme durumunda el hareketi ve fonksiyonlarının gerçek zamanlı izlenmesi sağlayan eldiven aynı zamanda doktorların hastaların el fonksiyonlarını değerlendirmek için faydalı parametreler elde edebilecekleri rehabilitasyon aracı olarak kullanılabilir (Hsiao, Yang, Lin, Lee, & Chou, 2015).

Yeongyu Park ve arkadaşları parmak hareketleri ölçmek için bir algılayıcı eldiven tasarlamışlardır. Parmakların hareketlerinin engellenmemesi için sistemde lineer potansiyometre, esnek teller ve yay kullanılmıştır. Parmak esnetildiğinde parmak eklemlerindeki kırışıklıklar yumuşatılmasından esinlenilerek her parmağın arkasına esnek tel bağlanmışlardır. Esnek telin parmak hareketine bağlı olarak uzunluğunda meydana gelen değişim ölçülerek eklem açılarını hesaplamışlardır (Park, Lee, & Bae, 2014).

Bor-Shing Lin ve arkadaşları el kinematiğini doğru ve güvenilir bir şekilde yakalamak için modüler bir veri eldiveni önermişlerdir. Hazırladıkları eldiven sayesinde doktorların rehabilitasyon tedavilerinde faydalı olması için parmakların açılma hızlarını, ivmelerini ve eklem açılarını hesaplamışlardır. Test amaçlı 15 sağlıklı 15 felçli katılımcıdan alınan veriler füzyon algoritmasından geçirmişler ve alınan verileri doğrulamak için ham veri, statik ve dinamik doğrulama yapmışlardır. (Lin, Lee, Chiang, Huang, & Peng, 2019).

SejalGhate ve arkadaşları bir oyun kumandası ile eşleşebilen bir eldiven geliştirmişlerdir. Bu eldivende gerinim algılama için gerilebilir mikrofiber sensörleri parmaklara, 9 eksenli IMU sensörünü bileğe entegre ederek bilek ve parmak hareketini ile açık kaynaklı Unity3D oyun platformunda bir oyun avatarını kontrol etmişlerdir (Ghate, Yu, Du, Lim, & Yeo, 2020).

P.Gunawardane ve arkadaşları parmak hareketleri izleyip jest tanıma cihazlarından Leap Motion Controller ile karşılaştırmak için bir eldiven tasarlamışlardır. Tasarımlarında flex sensör, jiroskop ve ivmeölçer kullanmışlardır. Bu veri eldiveninden parmakların konumu, yönelimi, bükülme açısı, hız ve ivme verilerini elde ettikten sonra benzer verileri Leap Motion denetleyicisinden alıp bir performans karşılaştırması yapmışlardır (Gunawardane & Medagedara, 2017).

Hussein Sarwat ve arkadaşları inme sonrası iyileşen çok sayıda hastanın rehabilitasyon merkezi, hastane ve fizyoterapistleri meşgul etmeden bir veri eldiveni, mobil uygulama ve makine öğrenimi algoritması içeren bir sistem sayesinde evde rehabilitasyonunu sağlamışlardır. Sistem iyileşme oranı yüksek düzeyde olan inme geçiren hastalar tarafından kullanılabilir olduğunu ve gerekli değerlendirme parametreleri uzman doktorlara mobil uygulama üzerinden gönderilerek hastaların takibi yapılabileceğini göstermişlerdir. Tasarımlarında her parmak eklem açılarını belirlemek için flex sensör, kavrama kuvveti ölçmek için FSR sensörü ve bilek hareketini bulmak için 6 eksenli bir IMU sensör kullanmışlardır (Sarwat et al., 2021).

Faisal ve arkadaşları insan aktivitelerinde el hareketlerini tanımada 3 eksen ivmeölçer, 3 eksen jiroskop ve 5 flex sensör içeren bir eldiven tasarımı yapmışlardır. Veri eldivenini kullanarak 35 gönüllüden bir veri seti oluşturdular. Bu veri setin üzerinde 4 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanarak bu algoritmaların başarımlarını karşılaştırmışlardır (Faisal, Abir, & Ahmed, 2021).

P.Weber ve arkadaşları IMU ve flex sensörlerden insan robot etkileşim uygulamaları için bir eldiven tasarlamışlardır. Tasarladıkları eldivende proksimal ve distal parmak eklemlerinin ayrı ölçümlerinin yanı sıra IMU sensör sayesinde konum tespiti sağlamışlardır. Parmak uçlarına yerleştirilen titreşim motorları sayesinde dokunsal geri bildirim elde etmişlerdir. Tasarımı yaptıkları eldiveni iCub insansı robot üzerinde denemişlerdir (Weber, Rueckert, Calandra, Peters, & Beckerle, 2016).

H.T. Chang ve arkadaşları el hareketlerini yakalamak için 16 adet IMU

sensörlerinden oluşan bir eldiven tasarlamışlardır. Alınan verilerinden daha doğru hesaplamalar yapmak için bir füzyon algoritması önermişler ve bu algoritmanın doğruluk performansını değerlendirmek için bir döner platform üzerinden aldıkları sonuçlarla karşılaştırmışlardır (Chang & Chang, 2019).

Bin Fang ve arkadaşları insan hareketlerini hem koldan hem de elden aynı anda alabilen bir eldiven tasarlamışlardır. Bu veri eldiveni el-kol teleoperasyon sistemi için geliştirmişlerdi. 18 adet IMU sensöründen meydana gelen eldiven tasarımında üretilen çalıştırma komutları Bluetooth kablosuz iletişim aracılığıyla robota iletmışlerdir. Daha sonra sistemin etkinliğini doğrulamak için birkaç deney gerçekleştirmişlerdir (Fang, Guo, Sun, Liu, & Wu, 2015).

Li-Hu Jhang ve arkadaşları endüstriyel operasyonlar için bir mobil robotu ve 6 eksenli bir robot kolunu kontrol etmek için bir eldiven tasarlamışlardır. Güvenli çalışma uygulamalarında mobil robot kolu tasarlanan eldiven ile kablosuz olarak yönlendirmişlerdir. İnsanların tehlikeli görevlere girmeden veri eldiveni ve mobil cihaz ile hedefine ulaştırmış görevi tamamlamıştır (Jhang, Santiago, & Chiu, 2017).

2.2. Ticari ve Açık Kaynak Çalışmalar

Cyber Glove System el hareketlerinin 3D olarak yakalanması noktasında veri eldiveni üreten ticari bir markadır. Eldiven tasarımının da bükülme sensörü ve flex sensör kullanılmıştır Firmaya ait üretilen veri eldivenleri genelde sanal gerçeklik, hızlı prototipleme ve animasyon sektörlerinde kullanılmaktadır. Cyber Glove sistemi kullanıcının parmaklarının ve elinin hareketini doğru bir şekilde yakalayan ve yazılımla bağlantılı olarak hareketi bilgisayar ekranındaki bir grafik ile eşleyerek kullanıcının hareketlerini manipüle etmesini sağlayan kablosuz bir veri eldivenidir (Cyber Glove, 2022).

NASA ile iş birliği yapan kuruluşlardan Ntention Mars'ta yapılan araştırmalar için bir akıllı eldiven tasarlamıştır. Bu akıllı eldiven astronotların dronlar dahil olmak üzere çok çeşitli robotik cihazları basit el hareketleriyle kablosuz çalıştırmaya olanak tanımıştır. Uzayda araç dışı faaliyetlerde uzay giysilerinin hantal kalması astronotların örnek toplama görevlerindeki el becerileri ve hassasiyetleri sınırlamaktadır. Bu noktada robotları ve dronları kontrol etmek için bir veri eldiveni geliştirilmiştir. Kullanılan sensör tipi hakkında herhangi bir bilgi yoktur (Ntention, 2022).

5DT veri eldiveni Fifth Dimesion Technologies firması tarafından üretilen 14

adet optik fiber sensör kullanan bir veri eldivenidir. Eldiven hareket yakalama ve animasyon teknolojisinde kullanılmak üzere üretilmiştir. Sensörler el parmaklarının eklem yerlerine yerleştirilmiş USB kablosu aracılığıyla bir bilgisayar arayüzüne bağlanmıştır. Yerleştirilen optik fiber sensörler 10 bit veri çözünürlüğüne sahip olup beden olarak birçok kişiye uyum sağlayabilecek esnek bir yapıya sahiptir (5DT, 2022).

Neofect firması tarafından inmeden kurtulanların işlevlerin eski haline getirmek için hastanın el ve bileğine uyan bir eldiven geliştirdi. Bu bir tür rehabilitasyon sistemidir. Flex sensörleri ve IMU'ların bir kombinasyonu kullanarak parmaklar, bilek ve ön kol hareket verilerini ölçer. Eldivenden elde edilen veriler Bluetooth üzerinden kablosuz Neofect yazılımına aktarılır. Bu yazılım oyun tabanlı eğitim görevlerinden oluşmaktadır. Sürükleyici oyunlar ve günlük aktivitelerle hastaların rehabilitasyonlarına yardımcı olmaktadır (Neofect, 2022).

Stretch Sense firması tarafından üretilen akıllı eldiven film ve oyun animasyonu için çözümler üretmektedir. El parmaklarındaki her bir eklem bükülmesini IMU sensörleri ile yakalamaktadır. Birçok 3D yazılımları desteklemektedir (Stretch Sense, 2022).

Xsens firması tarafından ticari olarak üretilen eldiven tasarımında flex sensör ve IMU sensör kullanılmıştır. Her parmağın iki eklemine yerleştirilmiş flex sensörler ve ince parmak hareketlerini ölçmek içinde IMU sensörler kullanılmıştır. Eldiven otomatik filtreler ile IMU sensörlerindeki kaymaları önlemekte ve Xsens yazılımı ile desteklenmektedir. Tasarlanan eldiven hareket yakalama, işaret dili ve artırılmış gerçeklik uygulamalarında kullanılmaktadır (Xsens, 2022).

BeBopSensors firması tarafından yapılan veri eldiveni sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere dijital ellere sahip profesyonel oyuncu ve tasarımcılar için geliştirilmiştir. Kullanıcılara dijital nesnelere sanki gerçek hayatta varmış gibi tutmasını, manipüle etmesini ve dokunsal geri bildirim sağlamaktadır (BeBop, 2022).

Capto Glove firması oyun ve akıllı cihazlar için giyilebilir bir eldiven tasarlamıştır. Geliştirdikleri eldiven özellikle bilgisayar oyunları, sanal gerçeklik ve birçok geliştirilmiş uygulamayı desteklemektedir (CaptoGlove, 2022).

Polhemus firması el ve parmak takibi için farklı bir sistem geliştirmiştir. Geliştirilen modelde parmak ve el hareketlerinin pozisyonu ve yönünü ölçen 6 DOF

serbestliği olan IMU sensör kullanılmıştır. Tasarımlarında farklı olarak izlemek istediğiniz parmağa ya da parmaklara sensörler takılabilmektedir (Polhemus, 2022).

Nansense firmasının geliştirdiği eldivende başparmakta 3 adet diğer parmaklarda ise 1 adet IMU sensör vardır. Eldiven kablosuz ya da kablolu kullanılabilmektedir. Kullanım yerine göre sensör sayısı farklılık gösteren modelleri vardır. Daha çok animasyonlarda ve gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılmaktadır (Nansense, 2022).

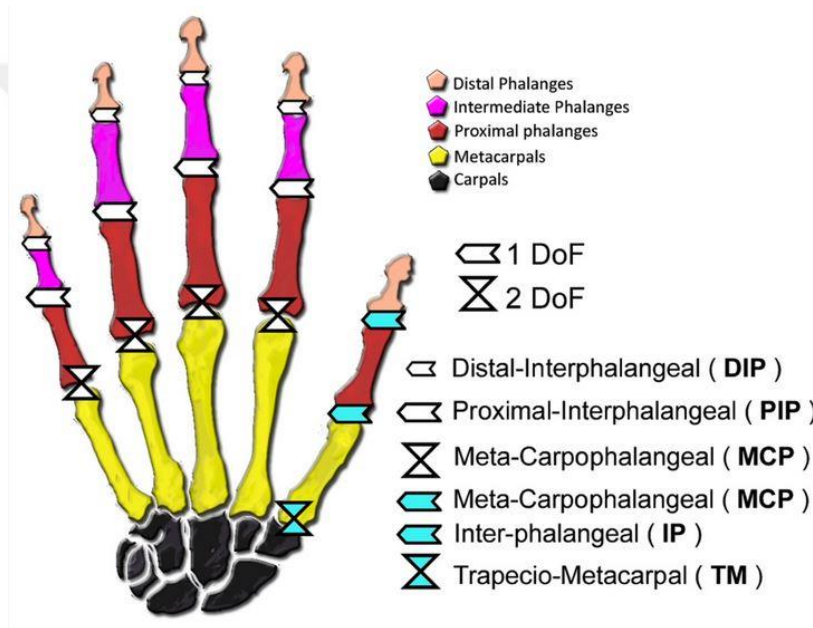
Keyglove giyilebilir açık kaynaklı ve oyun, sanat, tasarım, müzik, cihaz kontrolü ve 3D nesne işleme gibi uygulamalarda kullanılabilen bir veri eldivenidir. Dokunma temelli kontroller, hareket temelli kontroller ve geri bildirimli kontrollerde kullanılabilmektedir. Dokunmatik sensör ve flex sensörleri kullanılmıştır. Kablosuz bağlantı özelliği olup birçok farklı işletim sistemi platformunu desteklemekte ve tamamen açık kaynak tabanlıdır (Keyglove, 2022).

AnthroTronix firmasının geliştirdiği akıllı eldiven insansız sistemlerin komuta kontrol, robotları kontrol etme, simülasyonlu eğitimler ve rehabilitasyon amaçlı kullanılmaktadır. Eldiven tasarımında 9DOF IMU sensörleri kullanılmış olup kablolu ya da kablosuz bağlantı seçenekleri vardır (Anthrotronix, 2022).

Literatür taraması bakıldığında akıllı veri eldiven çeşitliği hem ticari hem de araştırma alanında hızla gelişme göstermektedir. Hareket izleme performansları, hareket aralığı, ölçmedeki doğruluk, kablosuz bağlantı hızları ve güncelleme hızı gibi birçok faktör sensör teknolojisine bağlı olarak gelişmektedir. Kullanım yerine göre materyal çeşitliği, ergonomik ve giyilebilir olması değişmektedir. Bunlara ağırlık, büyüklük, batarya durumları ve kablosuz olma özellikleri de eklenebilir. Veri eldivenleri tıp, uzaktan tedavi, hareket yakalama, video oyunları, simülasyon eğitimleri, sanal gerçeklik manipölasyonları gibi günümüz popüler uygulamalarında karşımıza çıkmaya devam edecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Akıllı eldivenlerin özellikleri insan elinin anatomisi ve fizyolojisi ile yakından ilgilidir. El ve parmak hareketlerini ifade etmek için kullanılan DOF yani serbestlik derecesi önemli bir kavramdır. Bu kavramı insan elinin anatomik yapısına bakarak açıklamak mümkündür. Şekil 3.1 bir elin anatomik yapısı gösterilmiştir. Başparmak hariç her parmağın üç kemiği (distal, intermedia, proksimal) ve üç eklemi vardır. Meta-karpofalangeal (MCP), proksimal –interfalangeal (PIP) ve distal interfalangeal (DIP). Başparmağın iki kemiği, iki eklemi ve birde ek bir hareket eklemi vardır (Caeiro-Rodríguez, Otero-González, Mikic-Fonte, & Llamas-Nistal, 2021)



Şekil 3.1. Elin anatomik yapısı (Caeiro-Rodríguez et al., 2021)

El ve parmaklarla gerçekleştirilen hareketleri algılamak ve ifade etmek için farklı veri alım eldivenleri geliştirilmiştir. Bu eldivenler genellikle ele giyilebilen kumaş türünde ya da elin iskelet yapısına uygun kumaş olmayan ip veya sert bağlantılar içermektedir. Nadiren de olsa bazı eldivenlerde parmak ve elin derisi açıkta olup sensörlerin bulunduğu yerlerde sadece kumaş, plastik veya diğer malzemeler kullanılarak kapatılır. Şekil 3.1.'de farklı eldiven tipleri gösterilmektedir.



CaptoGlove



Raphael



ExoGlove

Şekil 3.2. Akıllı veri eldiven tipleri (Caeiro-Rodríguez et al., 2021)

Akıllı eldivenler farklı birçok farklı amaç için kullanılabilir. Ancak öncelikli olarak el parmak pozisyon tahmin ve takibi bir diğeride parmaklardaki dokunma hissini simüle etmektir. Bu iki amaca göre eldiven tasarımında kullanılacak sensör tipi ve yerleşim yeri belirlenmektedir. El ve parmak pozisyon tahmin ve takibinde sensör tabanlı veya görsel tabanlı çözümler kullanılır. Görsel tabanlı çözümlerde görüş alanının dışındaki el ve parmak hareketlerini yakalayamadıkları için uygun çözüm değildir. Sensör tabanlı çözümlerde IMU, flex yani bükülme ve gerinim olmak üzere üç tip sensör kullanılır. Bu tip akıllı eldivenlerde performansı belirleyen en önemli kriterler sensörün tipi, serbestlik derecesi, örnekleme aralığı ve güncelleme hızıdır.

Bu tez kapsamında ele giyilebilen kumaş tipinde ve sensör tabanlı yapılan akıllı eldiven prototipi donanım ve yazılım olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır.

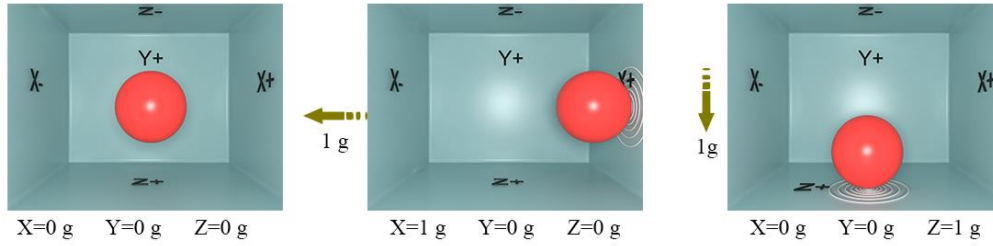
3.1.Donanım

El ve parmakların pozisyon ve hareketlerinin algılanmasında en çok tercih edilen sensörler ivmeölçer (accelerometer), jiroskop (gyroskop) ve magnometredir. Bu sensörler ayrı ayrı kullanılabileceği gibi bütün bu sensörleri içinde barındıran IMU sensörü kullanılabilir. Araştırma amaçlı veya ticari olarak yapılan akıllı veri alım eldivenlerinde görüleceği gibi IMU sensörleri daha çok tercih edilmektedir. Kullanılacak uygulamaya göre sensör özellikleri, veri alım için kullanılan iletişim protokolleri ve alınan verileri işleyecek mikrodenetleyici önem kazanmaktadır.

3.1.1. İvmeölçer

İvme bir cismin hareket hızının zamanla değişim miktarı olarak tanımlanır. İvme sensörleri hangi eksen boyunca hareket ediyorsa o eksenindeki hareketin ivme bilgisini verir. Eğer 3 eksene sahipse 3 eksenindeki hareketin ivmesi bilgisini verecektir.

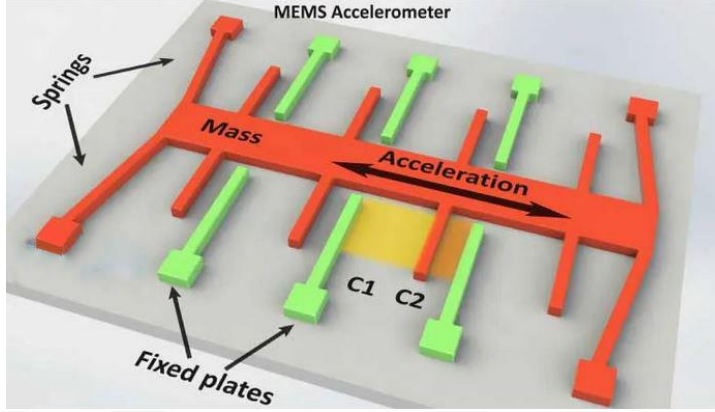
İvmeölçer sadece hareketten kaynaklanan ivmeyi ölçmez aynı zamanda yer çekimden kaynaklanan ivmeyi de ölçer. Dolayısıyla dinamik bir hareket olduğunda hareket eksenindeki ivmeyi ölçerken statik durumda ise bağlı olduğu sistemin yer yüzeyi ile yaptığı açıyı diğer eksenlerden gelen verilerle ölçülebilir. Hareket eksenindeki hız değişimi sıfır ise yani sabit hızla hareket ediyorsa hızında bir değişim olmaz dolayısıyla ölçülen ivme sıfır olacaktır. Sensör hareketsiz ve yere paralel durumda z ekseninde 9.8m/sn^2 yer çekim ivmesini ölçer. İvme sensörlerinde veri çıkışları genelde g kuvveti türünden ifade edilir ve 1g 9.8m/sn^2 eşittir. İvmeölçerin nasıl çalıştığını anlamak için bir kutu içerisinde duran bir küp ile anlatmak mümkündür. Şekil 3.3 ‘deki kutuyu eğer ağırlıksız bir ortamda düşünersek küre küpün ortasında duracak ve bütün eksenlerde ölçülen ivme sıfır olacaktır. Kutuyu aniden 1g kuvveti ile sola doğru -X yönünde hareket sağlarsak küre +X yüzeyine çarpacaktır. Kürenin yüzeye uyguladığı kuvvet 1g olacaktır. Kutuyu dünya üzerinde düşünersek küre Z+ yüzeyine düşecek ve 1g’lik kuvvet yüzeye uygulayacaktır. Yer çekimi her yerde olduğu için ivme sensörlerinden çıkışlarında daima bir değer alınır.



Şekil 3.3. İvme ölçerin çalışma prensibi

İvme sensörleri ivmeyi ölçerken farklı teknikler kullanmaktadır. En çok kullanılan tekniklere göre ivmeölçerleri mekanik, kuvars ve mikro elektromekanik sistem (MEMS) ivmeölçer olmak üzere gruplandırılabilir. MEMS tipi ivmeölçerler özellikle fiziksel ölçülerin küçülmesi ve düşük maliyetlerinden dolayı günümüzde daha çok tercih edilmektedir. MEMS tipi sensörler bir silikon yonga üzerine monte edilmiş küçük bir elektrikli ve mekanik cihazdır. MEMS tipi ivmeölçerlerinde birçok tipi mevcuttur ancak daha çok kapasitif özellikli sensörler daha yaygındır. Şekil 3.4’de bir kapasitif MEMS ivmeölçerin iç yapısı gösterilmiştir. Bir yönde hareket etmekle sınırlandırılmış bir yaya bağlı kütle bir yöne doğru ivmeli bir hareket yaptığında plakalar ile kütle arasındaki kapasitans değişir. Kapasitede meydana gelen değişim miktarı ivme değerine karşılık gelir. Bu ivme sadece bir eksenindeki hareket içindir.

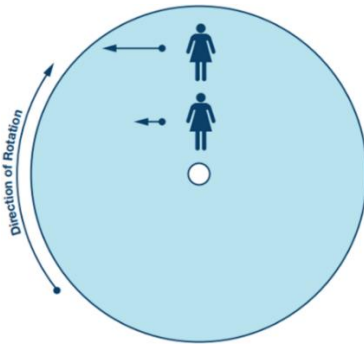
Eğer 2 ya da 3 eksenle ivme değeri hesaplanacaksa ivme ölçerler dik eksenlerde birbirine bağlanarak ivme verisi elde edilir. Bu tez kapsamındaki uygulamada kapasitif MEMS tipi sensör kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Kapasitif MEMS ivmeölçerin iç mekanizması (Howtomechatronics, 2022)

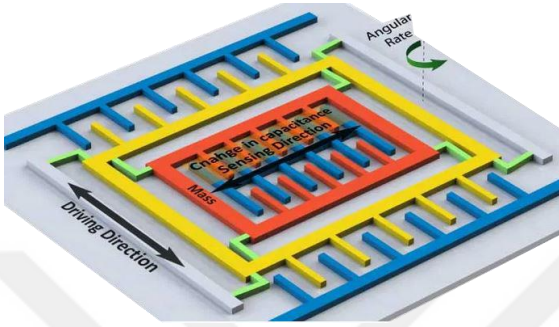
3.1.2. Jiroskop

Jiroskoplar kısaca belirli bir eksenledeki açısal hızı (dönme hızı) ölçen sensörlerdir. Açısal hızı genellikle 1 saniyedeki dönüş açısı (derece/saniye) olarak tanımlanır ve hesaplanır. Jiroskoplar uygulama alanlarına göre mekanik jiroskoplar, optik jiroskoplar ve MEMS jiroskoplar olarak ayrılabilir (Passaro, Cuccovillo, Vaiani, De Carlo, & Campanella, 2017). Fiziksel ölçülerinin küçülmesiyle daha çok MEMS tipi jiroskoplar tercih edilir. Bu tip jiroskoplarda açısal hız Coriolis etkisi sayesinde ölçülür. Coriolis etkisi şekil 3.5 ‘deki şekille açıklanabilir. Merkeze yakın olduğunuz ve merkezden uzak olduğunuz noktalarda yere göre hız mavi oklarla gösterilmiştir. Saat yönüne dönmekte olan bir platformda merkezden kuzeye doğru bir rotayı sürdürmek isteyen bir kişinin batıya doğru olan hız bileşenini artırması gerekir. Bu hız artırımı için gerekli olan ivme Coriolis ivmesidir.



Şekil 3.5. Coriolis etkisi (Device, 2022)

Jiroskoplar anlık açısal hızı ölçerler dolayısıyla ölçüm yaptığı eksenlerde bir açısal hareket olmadığında çıkışlarındaki değer sıfırdır. Şekil 3.6’da kapasitif etkiyle çalışan bir MEMS jiroskop sensörünün iç yapısı gösterilmiştir. Jiroskop ölçüm yaptığı ekseninde doğrusal bir hareket yaparken çıkış vermeyecek ancak açısal bir dönüş yaptığında kapasite değişimi olacaktır. Bu kapasite değişim oranı da açısal hızla karşılık gelir.

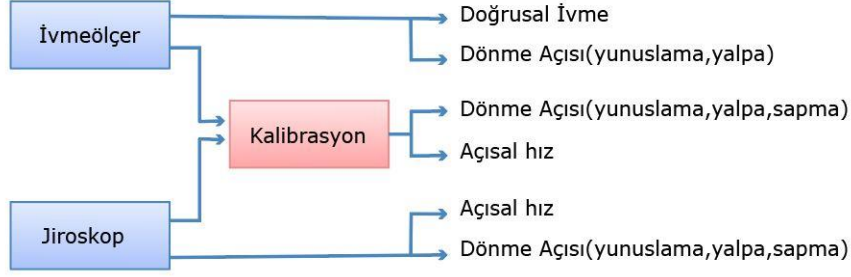


Şekil 3.6.Kapasitif MEMS jiroskopun iç mekanizması (Howtomechatronics, 2022)

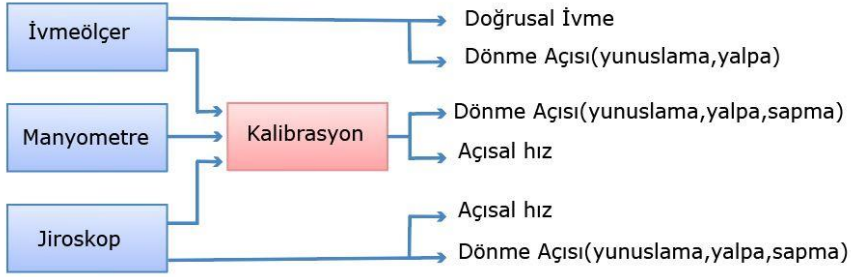
3.1.3. Ataletsel Ölçü Birimi (IMU)

Bir ivme ölçerin ölçüm yapabildiği eksen sayısı yani serbestlik derecesi DOF ile ifade edilir. Eğer 2 ekseninde ölçüm yapabiliyorsa 2 DOF, üç ekseninde ölçüm yapabiliyorsa 3 DOF’dur. Aynı şekilde jiroskop sensörlerinin ölçüm yapabildikleri eksen sayısı DOF ile ifade edilir. Bir ivmeölçer 3 ekseninde ölçüm yapabiliyorsa 3 tane sensör kullanılmış demektir, bir jiroskop 3 ekseninde açısal hız ölçebiliyorsa 3 adet sensör kullanıldığı anlamına gelir. Ataletsel ölçü birimi çok sayıda ivmeölçer ve jiroskopun bir araya getirilmesiyle oluşan birimlerdir. Bu durumda ataletsel ölçü birimleri sahip oldukları ivme ve jiroskop serbestlik derecelerinin toplamı kadar serbestlik derecesine sahiptir. Bir IMU 3 eksen ivmeölçer 3 eksen jiroskop barındırıyorsa içinde altı serbestlik derecesine sahiptir ve 6 DOF IMU olarak ifade edilir. IMU sensörleri sadece ivmeölçer ve jiroskop barındırmaz bazı çiplerde magnetrede barındır.

IMU sensörlerinde ivme değeri ivmeölçerden, açısal hız jiroskoptan ayrı ayrı elde edilir. Açık değeri ise her iki sensörden elde edilebilir. Aynı zamanda iki veri birleştirilerek daha doğru açısal hız ve açı değerleri hesaplanabilir. (Ahmad, Ghazilla, Khairi, & Kasi, 2013). Şekil 3,7’de iki tipi sensör içeren 6DOF, şekil3,8’de üç tip sensör içeren 9DOF IMU gösterilmiştir.



Şekil 3.7. İki tip sensör içeren IMU (Ahmad et al., 2013)



Şekil 3.8. Üç tip sensör içeren IMU (Ahmad et al., 2013)

3.1.4. İvmeölçer ve Jiroskop Seçim Kriterleri

İvmeölçer ve jiroskop birçok uygulamada kullanılmakta olup uygulamanın özelliğine, hassasiyeti ve hızına bağlı olarak seçilmesi gerekir. Bir ivmeölçer doğrusal hareketi algılamakla birlikte dönme hareketini algılamaz. Bir jiroskop dönme hareketini algılamakla birlikte doğrusal bir hızlanma hareketini algılamaz. İvmeölçer doğrusal hızlanma ve titreşimi ölçmek için kullanılırken, jiroskop belirli bir eksen etrafındaki açısal hızı ve açısal konumu ölçmek için kullanılır. Genel olarak ivmeölçer ve jiroskop seçerken bazı temel kriterlere dikkat edilerek seçilmeli.

İvmeölçer ve jiroskop için genel seçim kriterleri;

- Çalışma ortamı: Minimum ve maksimum sıcaklık, nem
- Veri çıkış türü: Analog, dijital
- Eksen sayısı: Ölçüm yapılacak eksen sayısı
- Hassasiyet: İvmeölçer için $\pm g$ aralığı, jiroskop için min-mak saniyedeki ölçülen açı miktarı (deg/sn)
- Veri çıkış hızı aralığı (ODR): Saniyede sensörün verdiği veri miktarı (hz)
- Haberleşme protokolü: I2C, SPI
- Güç tüketimi: Normal ve uyku modunda tükettiği enerji
- Sıcaklığa bağlı kayma miktarı

- Ofset hatası: Ofset yapıldığında oluşan hata miktarı.

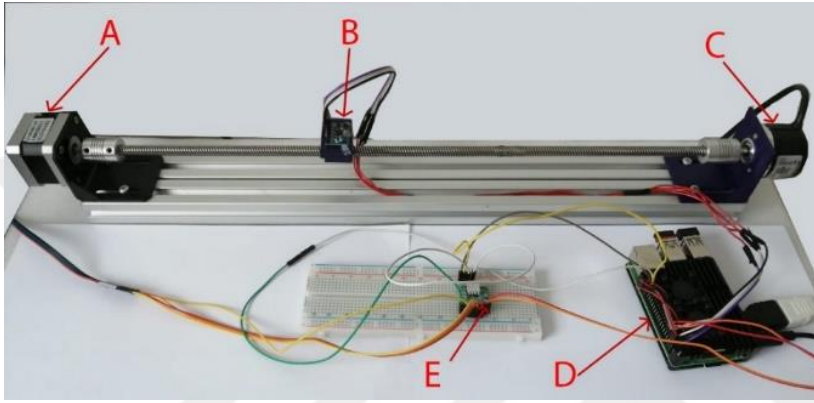
3.1.5. Kullanılacak IMU Sensörünün Belirlenmesi

Akıllı veri alım eldivenin prototipinin en önemli donanımsal parçası içerisinde ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinin barındıran IMU sensörüdür. IMU sensörlerinden toplanan veriler ölçüm hataları, kalibrasyon sorunları ve ortam gürültülerinden meydana gelen hatalardan dolayı farklı olabilir. IMU sensörlerindeki küçükte olsa meydana hatalar uygulamada büyük sapmalara neden olabilir. Bu hataları en aza indirmek için kullanılan sensörlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Bu noktalar çıkışların analog veya dijital olması, eksen sayısı, hassasiyet, bant genişliği ve ölçü skalasıdır. Ticari olarak satılan sensörlerin performansına ve kullanım alanına yönelik net bir ayırım yoktur. Dolayısıyla bu sensörler belirlenirken kullanım alanındaki performans gereksinimlerini iyi belirlemeli ve buna uygun seçim yapılmalıdır.

Veri eldiveninde kullanılacak sensörü belirlemek için özel bir kullanım alanı olmayan ve bireysel kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen üç tane IMU sensörü seçilmiştir. Bu seçilen IMU sensörlerinden elde edilen ivme ve jiroskop bilgilerinin doğruluğunu test etmek için bir deney düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Test deney düzeneği IMU sensör, enkoder, step motor ve Raspberry Pi den oluşmaktadır. Step motor ve enkoder bir mil üzerinde birbirine bağlanmış IMU sensörü dönen hareketli mekanizmaya monte edilmiştir. Test düzeneği Raspberry Pi ile kontrol edilmektedir. Kontrol yazılımında Python programlama dili kullanılmıştır. Test düzeneği step motor ile istenen açı kadar dönmesi sağlamaktadır. IMU sensöründen alınan ivme ve jiroskop verileri gerçek zamanlı olarak tasarlanan arayüz çizdirilmektedir. Tüm sensörlerin önce kalibrasyonu yapılmış sonra veri alınmıştır. Sensörlerin X ekseninde yapılan açısal değişim değerlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Test düzeneği X ekseninde belli bir açıda step motor kullanılarak döndürülmüştür. Sonra her IMU sensör üzerinden X ekseninde ivme ve jiroskop verisi kalman filtresinden geçirilerek okunmuştur. IMU sensörlerin verilerinin doğruluğu enkoder verileri referans alınarak test edilmiştir. Şekil 3.9 deney düzeneğinin CAD tasarımı, şekil 3.10 da gerçekleştirilen deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.9. IMU deney test düzeneği CAD tasarımı



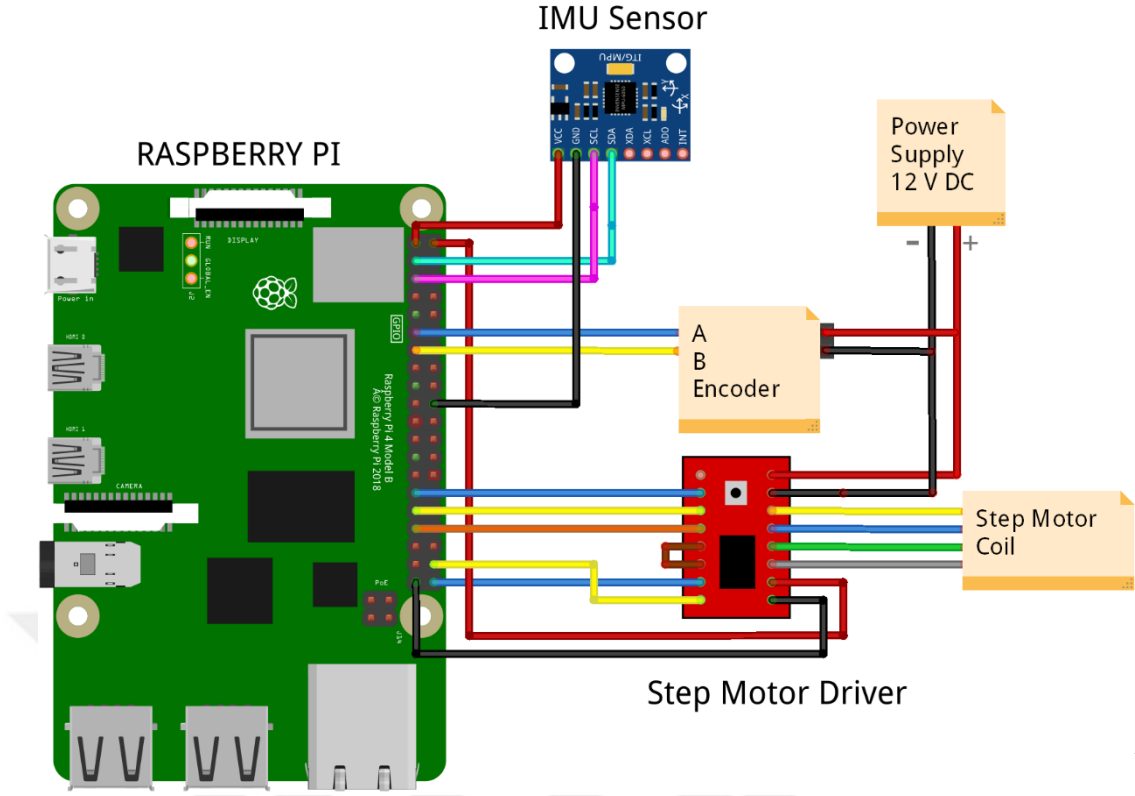
Şekil 3.10. Gerçeklenen deney düzeneği

A-StepMotor, B-IMU Sensör,C-Enkoder,D-Raspberry Pi,E-Step Motor Sürücü

Deney düzeneğinin kontrol edilmesinde kullanılan devrenin elektriksel bağlantı şeması şekil 3.11’de verilmiştir. IMU sensör, step motor ve enkoder elemanlarının Raspberry Pi’ye bağlantı pin numaraları tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Raspberry Pi Bağlantı Pin Numaraları

GPIO2 (SDA)	IMU sensör SDA	GPIO5	Step motor sürücü MS1
GPIO3 (SCL)	IMU sensör SCL	GPIO6	Step motor sürücü MS2
GPIO17	Enkoder A Kanalı	GPIO13	Step motor sürücü MS3
GPIO27	Enkoder B Kanalı	3,3V	IMU sensör VDD
GPIO20	Step motor sürücü DIR	5V	Step motor sürücü VDD
GPIO21	Step motor sürücü STEP		



Şekil 3.11. Deney düzeneği elektriksel bağlantı şeması

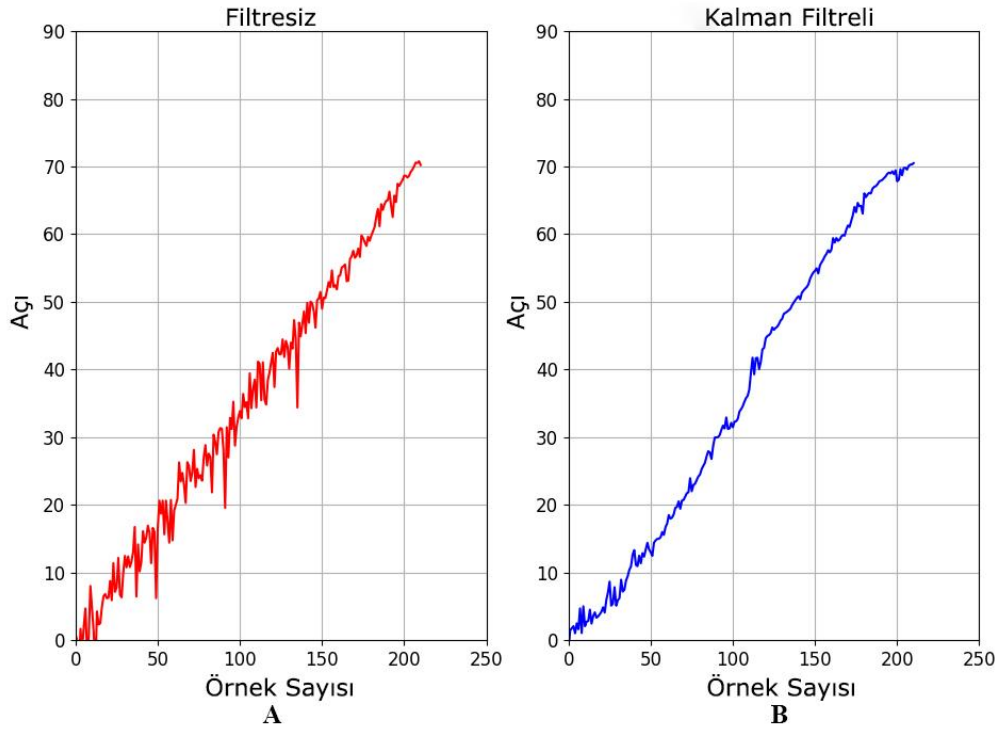
IMU sensör verilerin okunması ve deney test düzeneğinin kontrolü için platform olarak Raspberry Pi 4 modeli seçilmiştir. Raspberry Pi seçilmesi nedeni multitasking (çoklu görev) çalışabilmesi, giriş ve çıkış pinleri sayesinde elektronik ekipmanlarla ve sensörlerle iletişim kurulabilmesi, birçok haberleşme protokolünü ve programlama dilini desteklenmesidir. Açısal hareket için her adımında 1,80 dönüş sağlayan step motor (M. King, 2022) ve bu step motoru sürmek için bir step motor sürücü kullanılmıştır (Sorotec, 2018). Step motor sürücü mikrostep modunda çalıştırmak için gerekli uçlar aktif edilerek 1/32 adım mikro step adımda sürülmüştür. Bu sayede adım açısı küçültülerek hassasiyet artırılmıştır. Yapılan açısal hareketin doğrulunun kontrolü için step motorun miline her bir turda 1024 pals üreten bir enkoder bağlanmıştır (Autonics, 2021). Akıllı veri eldiven prototipinde kullanılmak üzere seçilen sensörler özel bir alana hitap etmeyen genel amaçlı kullanılan ticari ürünlerden seçilmiştir. Ayrıca IMU sensörlerinin özelliklerinden serbestlik derecesi, veri haberleşme protokolü, ivme ve jiroskop ölçüm aralıklarının aynı olmasına dikkat edilmiştir. Test için kullanılan IMU sensörlerin özellikleri aşağıdaki tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Test için kullanılan IMU sensörlerin özellikleri

IMU Sensör	Çalışma Gerilimi	Jiroskop Ölçüm Aralığı (°/sn)	İvme Ölçüm Aralığı (g)	İletişim Protokolü	Veri Çıkışı
S1	3-5 V	±250,500,1000,2000	±2,4,8,16	I2C	16 Bit
S2	3-2,6 V	±125,250,500,1000,2000	±2,4,6,8	I2C	16 Bit
S3	3-5 V	±250,500,1000,2000	±2,4,6,8	I2C,SPI	16 Bit

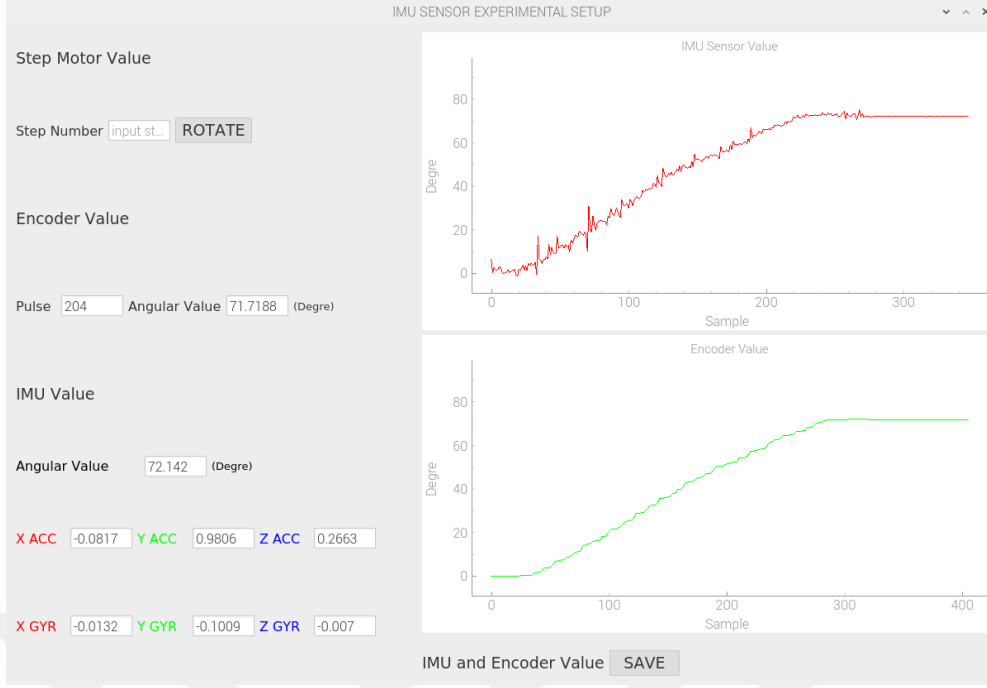
Deney düzeneğinde IMU ivme ve jiroskop sensörlerinden verilerin okunması için Python programlama dili, tasarlanan arayüzde PyQt5.0 kütüphanesi ve haberleşme protokolü olarak I2C kullanılmıştır. Veriler alınmadan önce her bir sensörün kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işleminde sensör düz bir zemin üzerinde hareketsiz iken 1000 kez X, Y, Z eksenlerinde ivme ve jiroskop verileri okunarak ortalaması alınmıştır. Sensörlerin ivme ve jiroskop ölçüm aralıkları aynı ölçekte ayarlanmış olup ivme için ± 2 g, jiroskop için $\pm 250^\circ/\text{sn}$ olarak seçilmiştir. Step motor tüm testlerde 72° dönecek şekilde step motor sürücüyeye pals uygulanmıştır. Bu dönüş açısı uygulandığında IMU sensör x ekseninde alınan açı bilgisi ve enkoder bilgisi okunarak kayıt edilmiştir. Step motor titreşimli hareketinden kaynaklı hatalar ve adım kaçırma nedenlerinden dolayı referans olarak step motor dönme açısı yerine enkoder üzerinden alınan açı bilgisi alınmıştır. Çünkü enkoder titreşimlerden elektriksel gürültülerden daha az etkilenmektedir. Ayrıca step motorun mekanik titreşimlerden etkilenmesi en aza indirmek için mekanik damper kullanılmıştır.

IMU sensörlerinden alınan ivme ve jiroskop verilerine kalman filtresi uygulanmıştır. Kalman filtresi bir sistemin giriş, çıkış verilerinden sistemin bir sonraki durumlarını tahmin ederek sistem durum güncellemesi ve yapılan ölçüm hatalarını minimuma indiren bir filtredir (Gui, Tang, & Mukhopadhyay, 2015). Şekil 3.12.'de ham IMU verileri ve kalman filtre uygulanmış IMU verileri görülmektedir.



Şekil 3.12. A-Filtresiz açı grafiği B-Kalman filtreli açı grafiği

Verilerin okunması ve kaydedilmesi için oluşturulan grafik arayüzde anlık olarak x, y, z eksenlerindeki ivme değerleri g kuvveti cinsinden ve üç ekseninde okunan jiroskop değerleri derece/saniye cinsinden gösterilmektedir. Bu veriler her 10 ms’de güncellenmektedir. Deney düzeneğine monte edilen IMU sensörün step motorun açısal hareketine bağlı olarak x ekseninde yaptığı açısal değişim değerleri ivme ve jiroskop verilerinin kalman filtresinden geçirilerek hesaplanmıştır. Aynı zamanda enkoder ile de açısal değişim değerleri de hesaplanmıştır. Bu değerler Şekil 3.13’teki arayüzde gerçek zamanlı olarak çizdirilmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

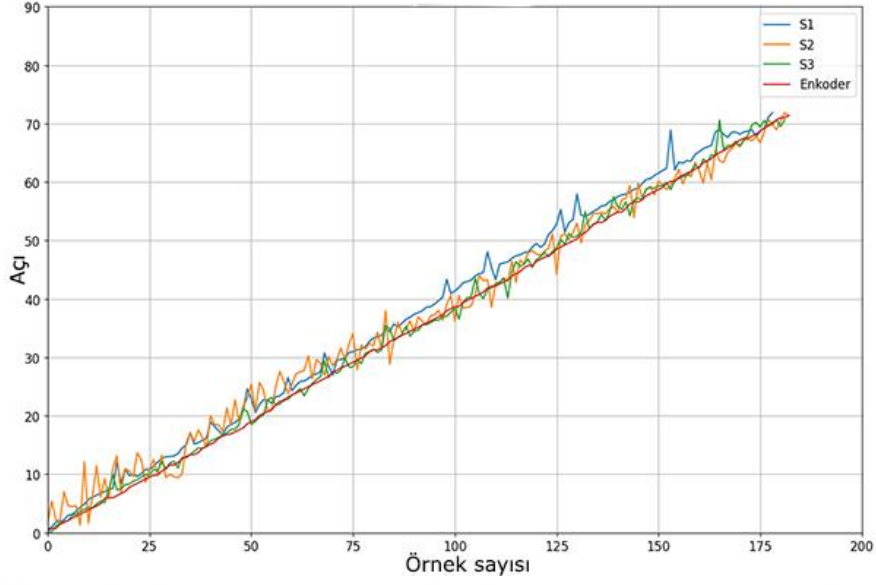


Şekil 3.13. Deney düzeneği kullanıcı arayüzü

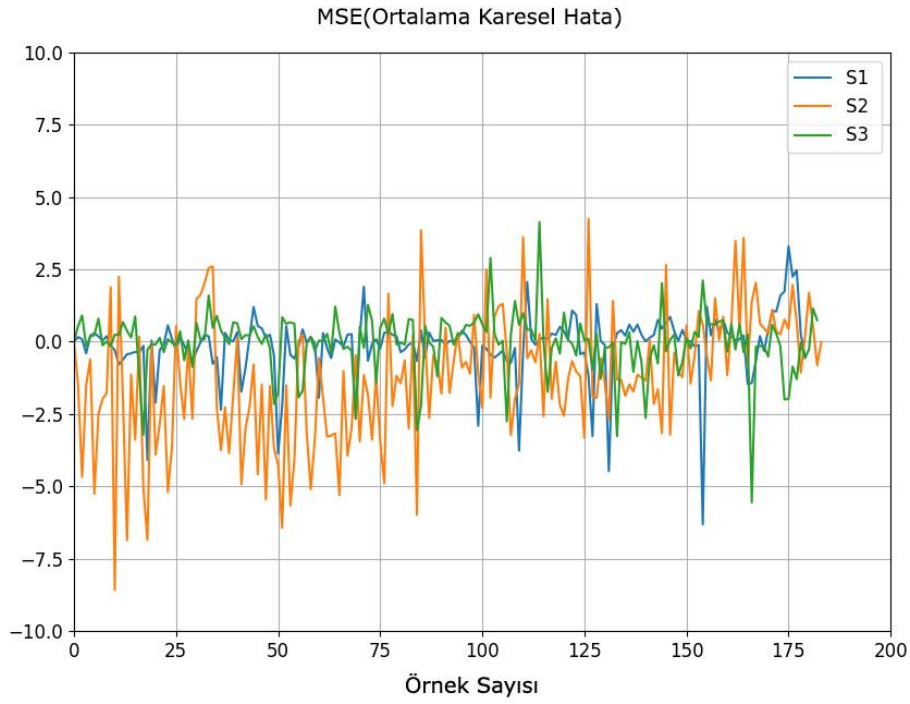
Deney düzeneğinde test edilen IMU sensörlerinden ve enkoder değerlerinden hesaplanan açı bilgileri kayıt edilmiştir. Bu açı değerleri Şekil 3.14 ve 3.15’de gösterilmiştir. Test öncesi tüm sensörlerin kalibrasyon ayarları yapıldıktan sonra deney düzeneğine montaj yapılarak veri alınmıştır.

Bu üç tane IMU sensöründen alınan açı değerlerinin doğruluğunu test etmek için step motorun vibrasyonu ve adım kaçırma eksikliklerinden dolayı referans açı değerleri olarak enkoder üzerinden hesaplanan açı değerleri kullanılmıştır. Sensörlerden alınan verilerin doğruluğunun kendi aralarında karşılaştırılması için ortalama karesel hata (MSE) değerlendirme kriteri kullanılmıştır. IMU sensörlerden hesaplanan açısal değerler enkoder üzerinden alınan değerlerden çıkartılarak hata işaretleri bulunmuştur. Hata işaretleri Şekil 3.15.’de verilmiştir. Bu hata işaretlerinin MSE değerleri denklem 3.1’e göre hesaplanmıştır. Bu üç sensörün MSE değerleri $S1(MSE)=1.2363$, $S2(MSE)=6.4147$ ve $S3(MSE)=1.0848$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre seçilen sensörlerden S3 en doğru sonucu vermiştir. Sonra doğruluklar sırasıyla S1 ve S2 şeklindedir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (3.1)$$



Şekil 3.14. IMU sensörleri ve enkoder açı grafiği



Şekil 3.15. IMU sensörlerinin ortalama karesel hata grafiği

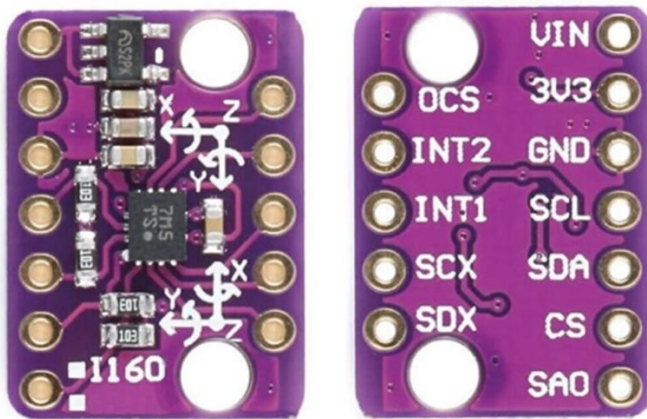
Yapılan test düzeneği ile sensörlerden alınan ivme ve jiroskop verilerinden hesaplanan açısal değişim değerlerinin doğruluğu kendi aralarında test edilmiştir. Çoğu üretici firma tarafından IMU sensörlerinin ölçüm hataları ile ilgili son kullanıcıya açık bir bilgi sunulmamaktadır. Dolayısıyla uygulamalarda kullanılmak üzere sensör seçimi yapılırken fiyat/performans bakımından farklı sorunlar yaşanabilmektedir. Bu anlamda hazırlanan deney düzeneği IMU sensörlerin

birbirlerine göre ölçüm hataları olabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada seçilen sensörlerden en doğru ölçümü sırasıyla S3, S1 ve S2 vermiştir. Ayrıca tasarlanan kullanıcı arayüzü sayesinde IMU sensörlerinden gelen veriler gerçek zamanlı olarak çizdirilmiş kayıt edilmiştir.

Yapılan bu IMU test deney düzeneği ile akıllı eldiven tasarımında kullanılacak olan en uygun sensörün tespiti yapılmıştır. Seçilen sensörlerden Bosh firmasının ürettiği BMI160 (S3) sensörü doğruluk olarak en iyi sonuçları verdiği için akıllı eldiven prototipinde kullanılmaya karar verilmiştir.

3.1.6. BMI160 IMU Sensörünün Teknik Özellikleri

BMI160 Bosh firmasının üretmiş olduğu fiziksel ölçüleri oldukça küçük (2.5x3.0x0.8mm) düşük güç tüketimli bir IMU sensör olup özellikle mobil uygulamalar, artırılmış gerçeklik, iç mekân haritalama, iç mekân navigasyon sistemleri, optik görüntü sabitleme gibi uygulamalarda kullanılır. Hedef uygulama cihazları tablet, cep telefonu, giyilebilir cihazlar, oyun kontrolleri ve quadkopterlerdir. İçerisinde adım sayısını hesaplayabilen gömülü bir algoritmaya sahiptir. Bu nedenle spor uygulamalarında tercih edilen bir üründür. Sensör 6 ya da 9 serbestlik derecesine sahip modelleri olup I2C ve SPI haberleşme protokollerini desteklemektedir. Bu tez kapsamında kullanılan model 6 serbestlik derecesine sahip ve içinde 3 eksen ivmeölçer ve 3 eksen jiroskop barındırmaktadır. İvmeölçer ve jiroskop 16 bit dijital çözünürlüğe sahiptir. Akıllı veri eldiveni prototipinde kullanılan sensör şekil 3.16'da sensörün genel teknik özellikleri tablo 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.16. BMI160 IMU sensör ön ve arka görünüşü (soldan sağa)

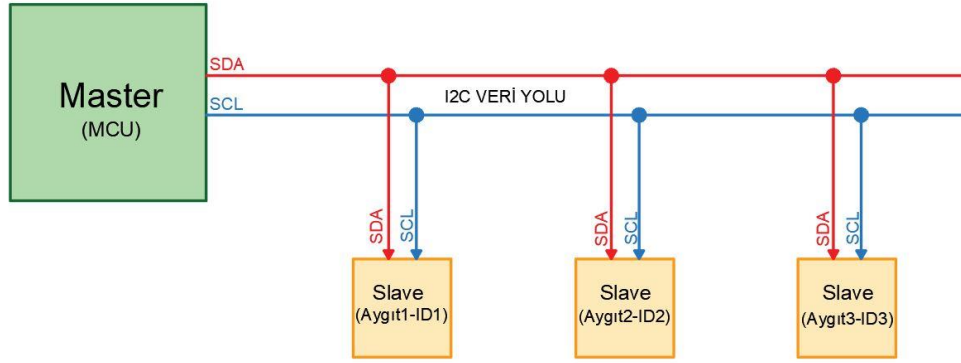
Tablo 3.3. BMI160 sensörünün teknik özellikleri

Parametreler	Teknik Veriler
Paket ölçüleri	2.5x3.0x0.8 mm
Çalışma sıcaklığı	-40 ... +85 ⁰ C
Besleme gerilimi	1.71 ... 3.6V
Dijital Çözünürlük	16 bit
İvmeölçer hassasiyeti	±2g: 16384 LSB/g ±4g: 8192 LSB/g ±8g: 4096 LSB/g ±16g: 2048 LSB/g
Jiroskop hassasiyeti	±125 ⁰ /s: 262.4 LSB/ ⁰ /s ±250 ⁰ /s: 131.2 LSB/ ⁰ /s ±500 ⁰ /s: 65.6 LSB/ ⁰ /s ±1000 ⁰ /s: 32.8 LSB/ ⁰ /s ±2000 ⁰ /s: 16.4 LSB/ ⁰ /s
Ofset hatası	İvmeölçer ±40 mg Jiroskop ± 3 ⁰ /s
Fifo kapasitesi	1024 byte
Çıkış veri hızı	İvmeölçer 1.6khz Jiroskop 6.4khz

3.1.7. Raspberry Pi

Akıllı veri alım eldiven prototipinde IMU sensörlerinde verilerin okunması için mikrodenetleyici olarak Raspberry Pi kullanılmıştır. Raspberry Pi düşük maliyetli, açık kaynaklı, multitasking (birden fazla programı aynı anda çalıştırma) özelliğinin olması ve GPIO (Genel Amaçlı Giriş Çıkış) pinleri sayesinde elektronik ekipmanlarla ve sensörlerle iletişim kurabilmektedir. Aynı zamanda Raspbian OS işletim sistemi ile herhangi bir program ihtiyaç duymadan Python programla dili ile programlaya olanak sağlayan araçlar mevcuttur. Raspberry Pi giriş çıkış pinleri ile I2C, SPI ve UART haberleşme protokollerini destekler ve PWM sinyali üreterek servo, step motor sürülebilir. Bu tez kapsamında Raspberry pi 4 modeli kullanılmıştır. Raspberry pi 4 modeli donanımsal olarak üzerinde QuadcoreCortex –A72 64 bit işlemci, 4 GB Ram, dahili wireless ve bluetooth bağlantısı, Gigabit Ethernet, 2 tane USB 3.0 ,2 tane USB 2.0 port, 2 adet mikro-HDMI port ve 40 adet GPIO pin barındırmaktadır. Üzerinde 1 adet I2C 2 adet SPI kanalı vardır. Şekil 3.17 ‘de Raspberry pi 4 modeli, şekil 3.18’de GPIO pin tanımlamaları verilmiştir.

I²C seri iletişim protokolüdür. Bu iletişim tekniğinde veri kaybolmaz ve diğer protokollere göre hızlıdır. İletişim için sadece 2 kablo kullanılır ve birden fazla cihaz iki hat üzerinden haberleşir. Bu hatlardan biri SDA (Serial Data) diğeri SCL (Serial Clock) olarak adlandırılır. SDA veri gönderip almaya SCL ise veri trafiğinin senkronizasyonunu sağlar. Bu protokolda haberleşen aygıtların tekil adresleri olmalıdır. İletişim kurulan her aygıtın diğer aygıtlarla benzer olmayan bir kimlik (ID) adresine sahiptir (Mankar, Darode, Trivedi, Kanoje, & Shahare, 2014). I²C seri iletişiminde en az bir master aygıt birde slave aygıtın olması gerekir. Bütün iletişim master ve slave arasında kimlik verisine göre yapılır. Şekil 3.19 'da I²C master-slave iletişim şeması verilmiştir.



Şekil 3.19. I2C master-slave iletişim şeması

I²C veri yolu standart 100 kHz'dir. Ancak bu 400 kHz kadar yükselebilir. Raspberry pi 4 modelinde 400 kHz veri hızını desteklemektedir. I²C veri yolu Raspberry pi üzerinde GPIO2 (SDA), GPIO3 (SCL) pinlerine atanmıştır. Veri yolunu kullanabilmek için aktif edilmesi gerekir. Varsayılan olarak I2C veri yolu Raspberry pi üzerinde pasif durumdadır. Aktif hale getirmek için Raspberry pi terminal penceresine *sudo raspi-config* komutu kullanılır ve gelen menüde *interfacin goptions* seçeneği tıklanır. Açılan pencereden I²C seçeneği aktif edilir ve sistem yeniden başlatılarak I²C veri iletişimi açılmış olur.

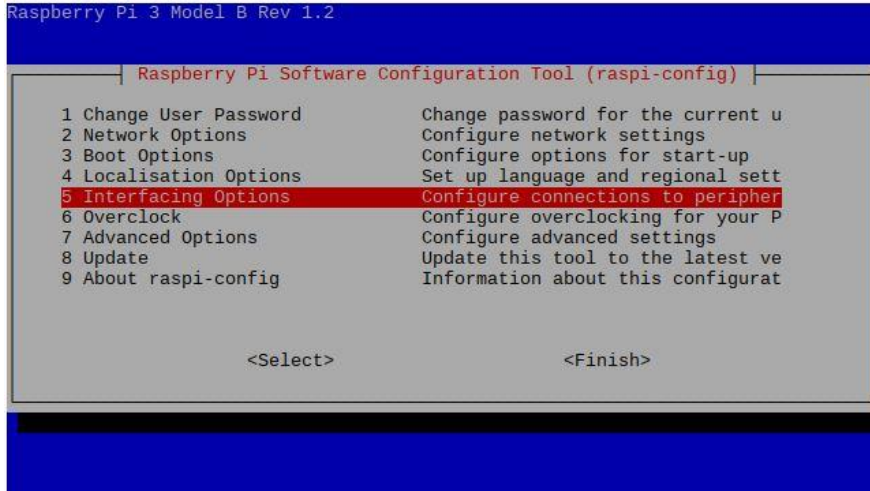
BMI160 sensörünün sahip olduğu kimlik numarası varsayılan olarak 0x68 'dir. İhtiyaç olması halinde alternatif kimlik numarası 0x69 oluşturulabilmektedir. Yani I²C seri iletişim protokolü kullanılarak en fazla 2 adet BMI160 sensörü ile veri iletişimi sağlanabilir. Daha fazla aynı sensörle veri iletişimi için I²C bağlantı çoklayıcısı (I²C multiplexer) kullanılması gerekir. Akıllı veri alım eldiveni prototipinde 6 adet BMI160

sensörü kullanılacağından dolayı I²C yerine SPI protokolü tercih edilmiştir.

SPI haberleşme birçok slave aygıtın bağımsız olarak kimlik numarası aynı bile olsa master aygıtlarla haberleşmesini sağlar. SPI 4 telli seri veri yolu olarak anılır. Dört adet lojik sinyal ile bir den çok cihazla bağlanılabilir. SPI çift yönlü (fulldublex) veri iletişimi destekler ve bağlantı için kullanılan pinler şunlardır (Jyothi et al., 2012);

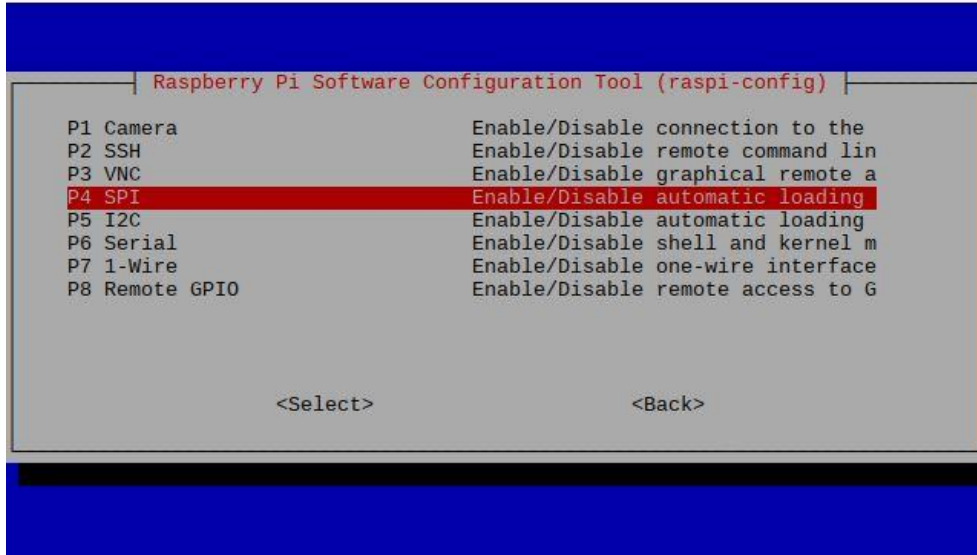
- SCLK (Serial Clock).
- MOSI /SIMO (Master out Slave In)
- MISO /SOMI (Master In Slave Out)
- SS / CS (Slave Select)

SPI haberleşme I²C'ye göre oldukça hızlıdır. 1 MHz 'den 250 MHz kadar çıkabilmektedir. Raspberyy Pi 3.8kHz'den 250 MHz aralığında SPI hızı ayarlanabilmektedir. Varsayılan olarak SPI haberleşme Raspberyy Pi'de aktif değildir. Aktif etmek için terminal ekranında *sudo raspi-config* komutu kullanılır. Komut sonrasında şekil 3.20'deki Raspberry pi konfigürasyon penceresi açılır.



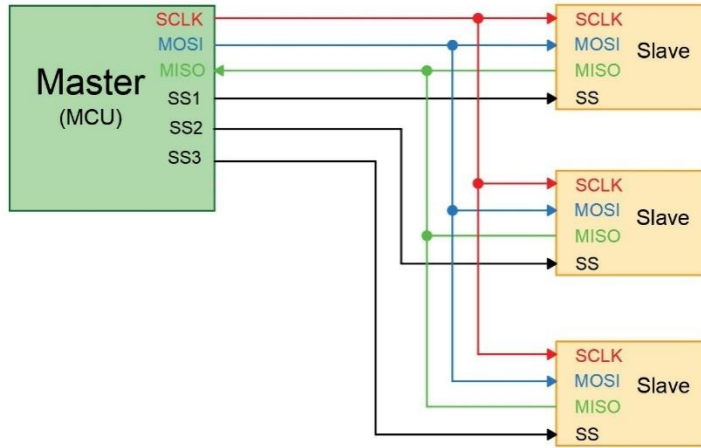
Şekil 3.20. Raspberry Pi konfigürasyon penceresi-1

Şekil 3.20 'de gelen pencereden interfacing options seçeneği seçilerek select butonuna tıklanır. Ardından şekil 3.21 'deki gösterilen pencere açılacaktır. SPI seçilerek select butonuna basılır işletim sistemi tekrar başlatıldığında SPI aktif olacaktır.



Şekil 3.21. Raspberry Pi konfigürasyon penceresi-2

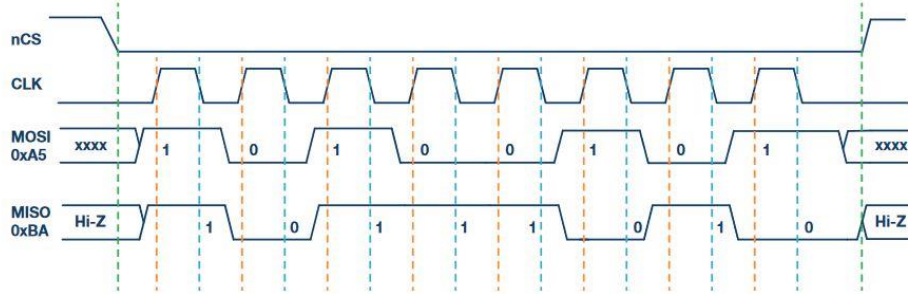
Raspberry Pi 4 iki tane SPI0 ve SPI1 olmak üzere iki SPI kanala sahiptir. SPI0 kanalı için GPIO 10 (MOSI), GPIO 9 (MISO), GPIO 11 (SCLK) ve GPIO8 ile GPIO7 pinleride aygıt seçmek kullanılır. Şekil 3.22 'de SPI master-slave iletişim şeması gösterilmiştir.



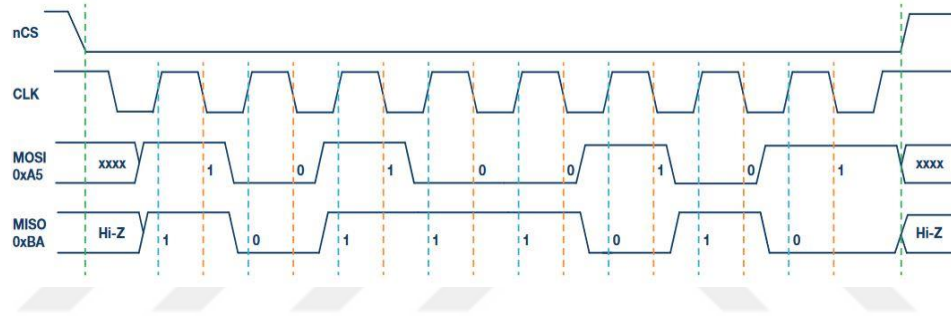
Şekil 3.22. SPI master-slave iletişim şeması

BMI160 ilk enerji verildiğinde I²C modundadır. Eğer SS pini bağlıysa otomatik SPI moduna geçer. SPI haberleşmede 4 mod kullanılır. Bu modlarda CPOL saat sinyalinin başlangıç durumunu, CPHA örneklemenin saat sinyalinin yükselen kenarında mı yoksa düşen kenarında mı olacağını ifade eder. BMI160 SPI modlarında iki tanesini destekler. Sensörün birinci modu '00' (CPOL=0 ve CPHA=0) şekil 3.23'de (Dhaker, 2018), ikinci mod '11' (CPOL=1 ve CPHA=1) şekil 3.24'de gösterilmiştir

(Dhaker, 2018). Bu tez kapsamında yapılan akıllı veri alım eldiven prototipi çalışmasında Raspberry Pi SPI0 kanalı ve SPI haberleşme modu olarak ise mod 0 kullanılmıştır.



Şekil 3.23. SPI mod 0 (CPOL=0, CPHA=0) (Dhaker, 2018)



Şekil 3.24. SPI mode 2 (CPOL=1, CPHA=1) (Dhaker, 2018)

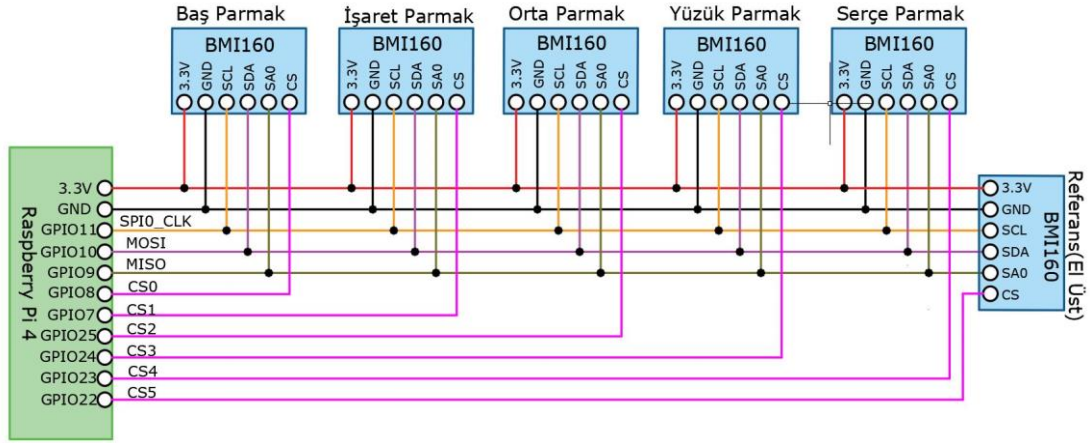
Raspberry Pi ile BMI160 sensörünün SPI haberleşme için kullanılması gereken pin bağlantısı tablo3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4.Raspberry Pi BMI160 SPI haberleşme pin bağlantıları

Raspberry Pi	BMI160
GPIO 10 (SPI0-MOSI)	SDA
GPIO 9 (SPI0-MISO)	SA0
GPIO 11 (SPI0- CLK)	SCL
GPIO 8 (SPI0 CE0_N)	CS

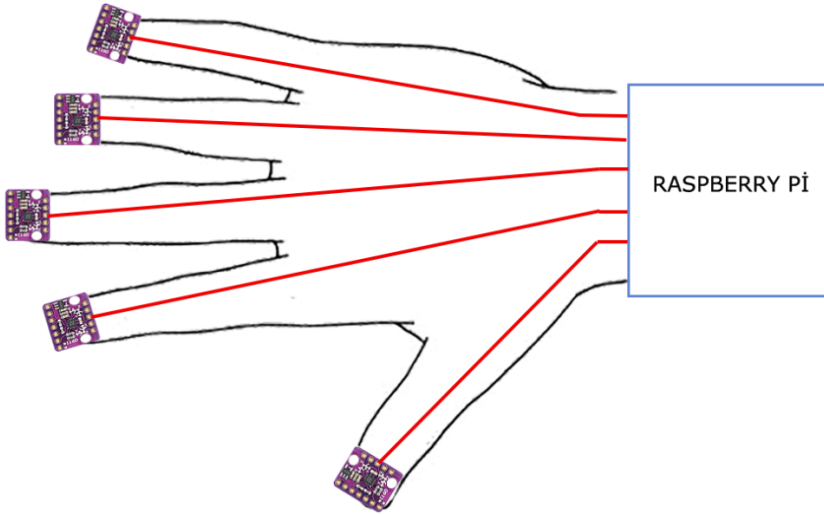
3.1.9. Devre Bağlantı Şeması

Veri alım eldiveninde 5 adet parmak uçlarında 1 tanede referans açısı için el üstünde olmak üzere 6 adet BMI160 sensörü kullanılmıştır. Şekil 3.25 ‘de bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 3.25. Devre bağlantı şeması

Raspberry Pi SPI0 kanalında varsayılan olarak 2 tane slave aygıt seçilebilir. Bu pinler GPIO8 ve GPIO7 pinleridir. Donanımsal olarak kontrol edilen bu pinleri ilaveten başka slave aygıt seçebilmek için yazılımsal olarak belirlenen pinler slave aygıt seçmek için atanabilir. Bağlantı şemasında ortaparmak (CS2), yüzük parmak (CS3), serçe parmak (CS4) ve referans sensör (CS5) pinleri yazılımsal olarak atanmış SS/CS (slave select-chip select) çip seçim pinleridir. Yazılımsal olarak çip seçim pinlerini belirlenmesi yazılım bölümünde ele alınacaktır.



Şekil 3.26. Sensör yerleşim blok diyagramı

3.1.10. Eldiven Üzerine Sensörlerin Yerleştirilmesi

Akıllı veri alım eldiveni prototipinde kullanılmak üzere parmakların kolay hareket edebildiği esnek kumaştan sahip bir eldiven tercih edilmiştir. Sensörleri yerleştirmek ve kablo bağlantıları yapmak için eldiven üzerinde bir takım dikim ve

yapıştırma işlemleri yapılmıştır. Şekil 3.27 ‘de eldivenin sensör yerleştirilmeden önceki hali, şekil 3.28 ‘de sensörler yerleştirildikten sonraki resimleri verilmiştir.



Şekil 3.27. Sensörler yerleştirilmemiş eldiven şekli



Şekil 3.28. Sensörler yerleştirildikten sonraki eldiven şekli

3.2. Yazılım

Akıllı veri alım eldiveni prototipinin yazılım kısmında sensörlerle haberleşme, verilerin işlenmesi ve görselleştirilmesinde Python programlama dili tercih edilmiştir. Python 1991’de Guide Van Rossum tarafından ortaya konulmuş genel amaçlı kullanılabilen bir programlama dilidir. Yorumlanan ve dinamik bir dil olan Python,

esas olarak prosedürel ve nesne tabanlı programlama ve belli oranlarda fonksiyonel programlamayı desteklemektedir (Malkoç, 2012). Python programla dili ücretsiz açık kaynak kod olup standart kütüphanelerinin yanı sıra geliştirilen birçok kütüphaneye kolay erişilebilir ve ücretsiz olarak indirilebilir. Aynı zamanda programlama dilinin sade ve kolay olması en önemli tercih sebepleri arasındadır.

Raspberry Pi'ye işletim sistemi Rasbian yüklendiğinde varsayılan olarak Python2 ve Python3 versiyonları ve kod yazmak için geliştirme ortamları yüklü gelmektedir. Bu tez kapsamında Python 3.7 versiyonu ve geliştirme ortamı için PyCharm kullanılmıştır.

Kullanıcı arayüzü Python'da grafiksel arayüz hazırlamak için kullanılan PyQt kütüphanesinin 5. versiyonu olan PyQt5 kullanılarak hazırlanmıştır.

3.2.1. SPI Kanalına Bağlanacak Sensör Sayısını Artırma

Veri alım eldiveninde bulunan 6 adet BMI160 sensörü ile haberleşebilmek için SPI haberleşme protokolü tercih edilmiştir. Raspberry Pi'nin varsayılan SPI0 ve SPI1 olmak üzere 2 adet SPI kanalı vardır ve bunlardan SPI0 kanalı kullanılmıştır. SPI0 kanalı için Raspberry Pi üzerinde GPIO8 ve GPIO7 pinleri slave aygıtları seçebilmek için tanımlanmıştır ve bunları kullanarak sadece 2 sensörle iletişim kurulabilir. Diğer sensörlerle haberleşebilmek için SPI0 kanalının slave aygıt seçimin genişletilmesi gerekir. Slave aygıt seçimi için belirlenen GPIO pinlerinin SPI0 kanalına atama yapmak için Raspberry Pi işletim sisteminde bütün donanım özelliklerinin tanımlandığı dts uzantılı dosyalarda gerekli değişiklikler yapılır. Daha sonra bu değişiklikler sonrası oluşturulan dtb uzantılı dosya işletim sistemi başlarken çalıştırılmak üzere ilgili klasörün altına kopyalanır. Aşağıda verilen kodlar ile SPI0 kanalı için ihtiyacımız olan diğer 4 slave aygıt seçim pinleri oluşturulmuştur.

```

/dts-v1/;
/plugin/;
/ {
    compatible = "brcm,bcm2835";
    fragment@0 {
        target = <&spi0_cs_pins>;
        frag0: __overlay__ {
            brcm,pins = <25 24 23 22>;
        };
    };
    fragment@1 {
        target = <&spi0>;
        frag1: __overlay__ {
            #address-cells = <1>;
            #size-cells = <0>;
            cs-gpios = <&gpio 25 1>, <&gpio 24 1>, <&gpio 23 1>, <&gpio 22 1>;
            status = "okay";
            spidev0_2: spidev@2 {
                compatible = "spidev";
                reg = <2>;
                #address-cells = <1>;
                #size-cells = <0>;
                spi-max-frequency = <125000000>;
            };
            spidev0_3: spidev@3 {
                compatible = "spidev";
                reg = <3>;
                #address-cells = <1>;
                #size-cells = <0>;
                spi-max-frequency = <125000000>;
            };
            spidev0_4: spidev@4 {
                compatible = "spidev";
                reg = <4>;
                #address-cells = <1>;
                #size-cells = <0>;
                spi-max-frequency = <125000000>;
            };
        };
    };
};

```

Yukarıda yer alan kodlarda GPIO (25,24,23,22) numaralı pinler SPI0 kanalı için slave aygıt seçim pini olarak belirlenmiştir. Bu kodlar *spi-cs-extend.dts* ismiyle kayıt edildikten sonra terminal ekranının *dtc-@ -I dts -O dtb -o spi-cs-extend.dtb* komutu çalıştırılır. Komut sonrası oluşan *spi-cs.extend.dtb* dosyası işletim sistemideki *boot/overlays* klasörüne kopyalanır ve */boot/config.txt* dosyası içine *dtoverlay=spi-cs-extend* komutu eklenir. İşletim sistemi başlatıldığı SPI0 kanalının varsayılan 2 ve yazılımsal olarak tanımlanmış 4 toplam 6 adet sensör seçilebilir ve iletişim sağlayabilir.

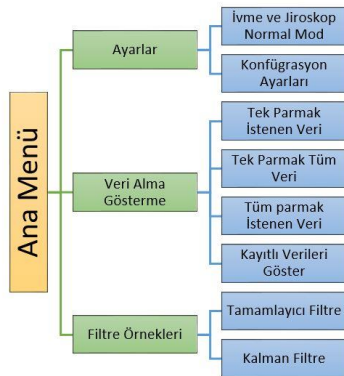
3.2.2. Yazılım İçin Gerekli Modüller

Programlama dillerinde gerekli sınıfların, fonksiyonların ve değişkenlerin bir bütün olarak bulunduğu kodlara kısaca kütüphane ya da modül denir. Python ile bazı fonksiyon ve modüller gömülü olarak gelmektedir. Bunun yanı sıra kendimizin ya da geliştiricilerin yazdığı fonksiyonlar ve modüller Python içerisinde kullanılmaktadır. Veri alım eldiveni yazılımında gömülü fonksiyon ve modüller aynı zamanda geliştiricilerin yazdığı fonksiyonlar ile modüller kullanılmıştır. Kullanılan başlıca modüller şunlardır;

- Spidev: Sensörlere SPI kanalı üzerinden iletişim sağlayarak veri okuma ve veri yazma amaçlı kullanılır.
- Math: Matematiksel işlemler yapmak için kullanılan bir modüldür.
- Time: Zaman ile ilgili yapılan işlemlerde kullanılır. Python'a gömülüdür.
- PyQt5: Görsel arayüz hazırlamak için kullanılır.
- Pyqtgraph: Görsel arayüz üzerinde grafik oluşturmak için kullanılır.
- Csv: Verilerin csv formatında kayıt edilmesi sağlar.
- Sys: Python'a gömülü olarak gelir Python sürümüne bağlı olarak metotlar içerir.
- Threading: Python gömülü olarak gelir ve paralel işlemler yapmak için kullanılır.

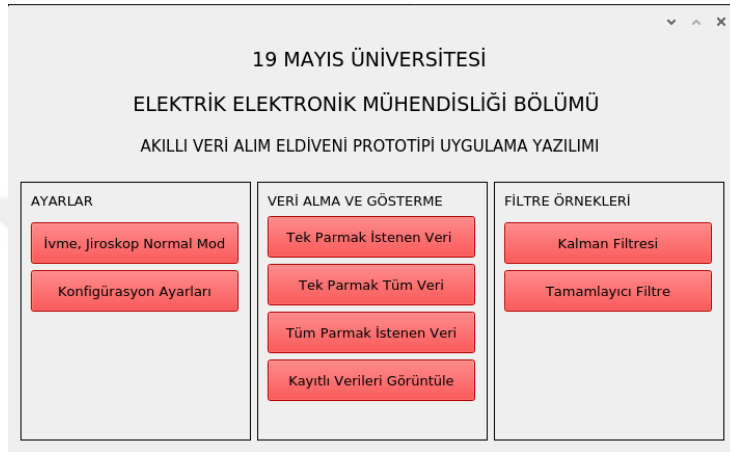
3.2.3. Kullanıcı Arayüzü

Kullanıcı arayüzünde sensörlerin ayarlanması, verilerin alınması, kayıtlı verilerin görüntülenmesi ve filtre örneklerinin yer aldığı birçok pencereden oluşmaktadır. Şekil 3.29'da arayüzlerin birbiri ile ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Arayüz pencerelerinin birbiri ile bağlantısı

Ayarlar bölümünde ivmeölçer ve jiroskop ölçüm moduna alma, ölçüm hassasiyeti, örneklem aralığı ve ofset işlemlerinden oluşmaktadır. Veri alma ve gösterme bölümünde seçilen parmağın istenen verileri, seçilen parmak ile ilgili tüm veriler, bütün parmakların istenen verilerini ölçme ve kayıtlı verileri gösterilmesinden oluşmaktadır. Filtre bölümünde ivme ve jiroskop verilerine uygulanan filtre örneklerinden oluşmaktadır. Şekil 3.30 'da yazılımın ilk ana menü arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Kullanıcı arayüzü ana menü

3.2.3.1. İvme ve Jiroskop Normal Mod

BMI160 sensörünün desteklediği güç modları vardır. Bunlar normal, düşük güç ve askıya alma modudur. İvmeölçer ve jiroskop sensörlerinin tam ölçüm yapabilmeleri için güç modunun normal mod olması gerekmektedir. Sensörün içindeki ivmeölçerin ölçüm moduna geçebilmesi için 0x7E kayıt adresine 0x11 değerinin yazılması ve 150 ms gecikmeden sonra jiroskop sensörünün ölçüm moduna geçebilmesi için yine 0x7E kayıt adresine 0x15 değerinin yazılması gerekir. Bu işlemler yapıldığı sensör artık ivme ve jiroskop değerleri üretmeye başlayacaktır. Ayarlar bölümünde yer alan İvme, jiroskop normal mod butonuna basıldığında veri eldiveni üzerindeki bütün sensörler ölçüm moduna geçmektedir.

3.2.3.2. Konfigürasyon Ayarları

Sensör ölçüm moduna geçtikten sonra ivme ve jiroskop ölçümünde kullanılacak bazı parametrelerin ayarlanması gerekir. Bu parametreleri ayarlamak için Konfigürasyon Ayarları butonuna tıklandığında şekil 3.31 'deki menü ekrana gelecektir.

Şekil 3.31. Sensör konfigürasyon ayarları

Ölçüm aralıklarının belirlendiği bölümde ivme ölçümü için istenen hassasiyet g kuvveti olarak açılır listeden seçilerek gönder butonuna tıklandığında bütün sensörlerin ivme ölçüm aralığı ayarlanır. Aynı şekilde jiroskop için istenen ölçüm hassasiyetinin kaç derece/sn olmasını isteniyorsa açılır listeden seçilerek gönder butonuna basıldığında tüm sensörlerin jiroskop hassasiyeti ayarlanır.

Örneklem oranı alanında sensörlerin saniyede üretecekleri veri miktarını ayarlanabilir. İvmeölçer için örneklem aralığı açılır listesinden ve jiroskop örneklem aralığı açılır listeden istenen değerler seçilerek gönder butonuna tıklayarak örneklem oranı sensörler için ayarlanmış olur.

Sensörlerin doğru ölçüm yapabilmeleri için gerekli olan ofsetleme işlemi için ofseti alınacak parmağa bağlı sensör listeden seçilir. Sensör yatayda düz olduğu bilenen bir yere konur ve hareket ettirilmez. Başlat butonuna basıldıktan yaklaşık 250 milisaniye süre sonunda sensörün ofset değeri hesaplanır. Bu hesaplanan değerler sensörün ölçüm sonuçlarından çıkartılarak daha doğru bir ölçüm yapılmış olur. Sensörlerin ofset değerleri her zaman sabit kalmadığından ölçüm öncesi ofset işlemi daha iyi sonuçlar üretecektir.

3.2.3.3. Tek Parmak İstenen Veri Grafiği

Ana menüden sensörler normal moda geçirildikten ve konfigürasyon bölümünden ilgili parametreler ayarlandıktan sonra artık veri alma işlemi başlayabilir. Veri alma ve gösterme bölümünde yer alan Tek Parmak İstenen Veri butonuna tıklandığında şekil 3.32 'deki pencere açılacaktır. Açılan pencerede sol taraftan önce veri alınacak parmak seçilir. Daha sonra seçilen parmak ile ilgili olarak aç, ivme ve açısal hız veri grafiklerinden hangisi isteniyorsa belirlenir. Parmak seçimi ve grafik tür seçimi yapıldıktan sonra veri al butonu tıklandığında seçilen parmak ile ilgili veriler grafiksel olarak gerçek zamanlı gösterilir. Grafiksel görüntünün altında bulunan

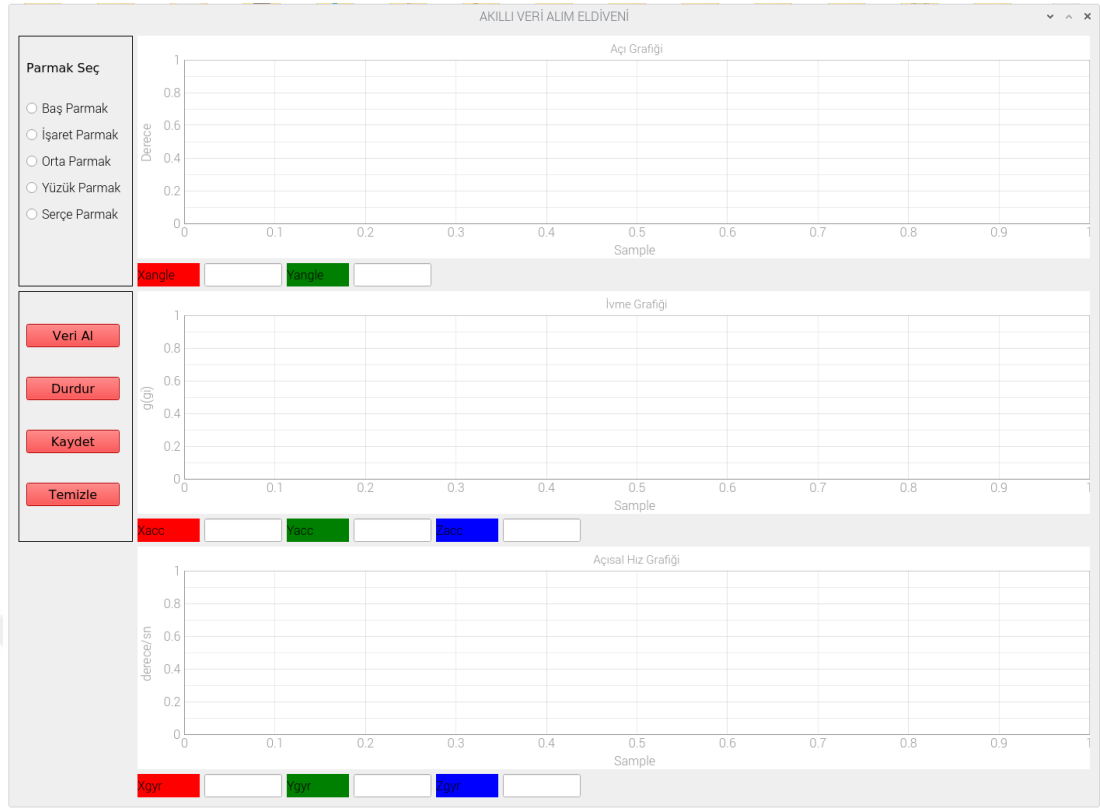
kutularda ölçülen değerleri sayısal olarak gösterilmektedir. Veri alma işlemi bitirmek için durdur butonuna basılır. Alınan veriler kayıt edilecekse kaydet düğmesine basılır ve grafiksel olarak gösterilen değerler csv uzantılı olarak kayıt edilir. Daha sonra bu kayıtlar tekrardan izlenebilir. Eğer seçilen parmakla ilgili farklı bir grafik isteniyorsa önceki grafik çizimlerinin silinmesi gerekmektedir. Bunun için kullanılan temizle butonu ile daha önce yapılan ölçüm grafikleri temizlenir ve yeni ölçüm alınabilir. Ekranda 5 adet grafik bulunmaktadır. Her bir grafik bir parmağa ait açı, ivme ve açısal hız verileri için kullanılır.



Şekil 3.32. Tek parmak istenen veri grafiği

3.2.3.4. Tek Parmak Tüm Veri Grafiği

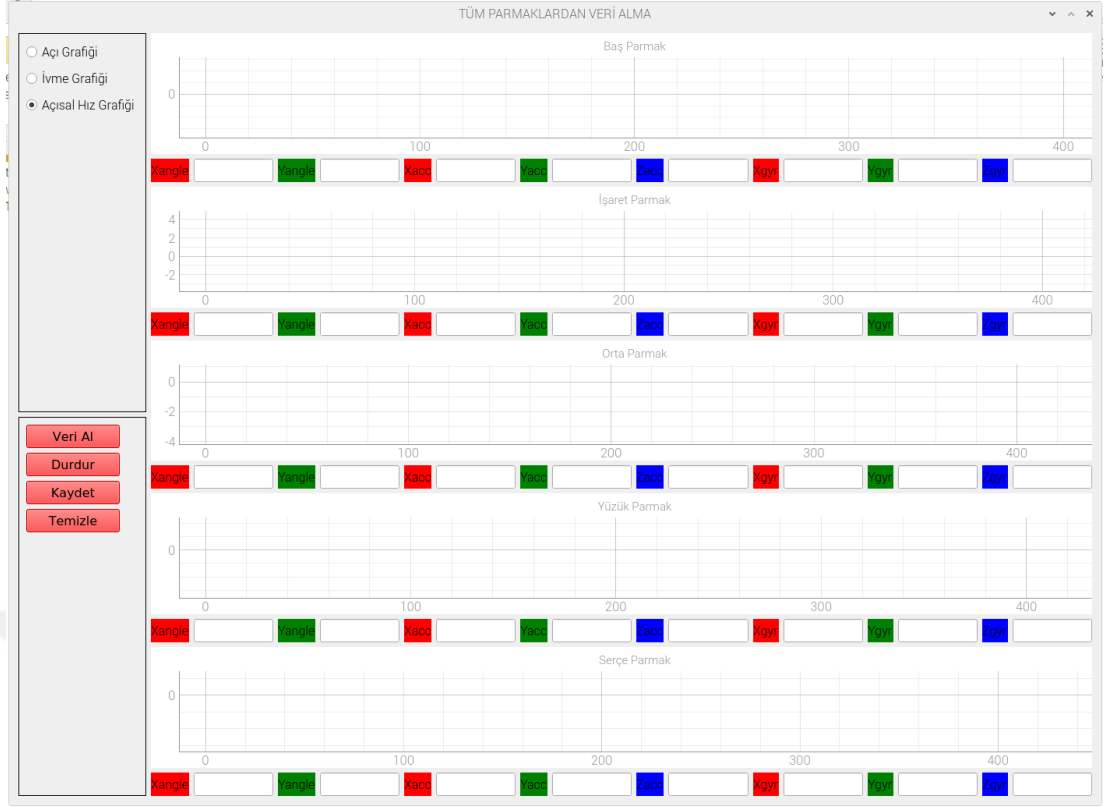
Ana menüde yer alan tek parmak tüm veri grafiği butonuna tıklandığında şekil 3.33 'deki ekran açılacaktır. Bu ekranda parmak seçimi yapıldıktan sonra veri al düğmesine tıklandığında seçilen parmağa ait açı, ivme ve açısal hız veri grafikleri gerçek zamanlı olarak gösterilecektir. Veri alım işlemini durdurmak için durdur butonuna, veriler kayıt edilecekse kaydet butonuna basılır. Eğer başka parmağa ait veri gösterilmek isteniyorsa temizle butonu ile tüm grafik verileri temizlenerek istenen parmak ile ilgili veriler alınabilir.



Şekil 3.33. Tek parmak tüm veri grafikleri

3.2.3.1. Tüm Parmaklar İstenen Veri Grafiği

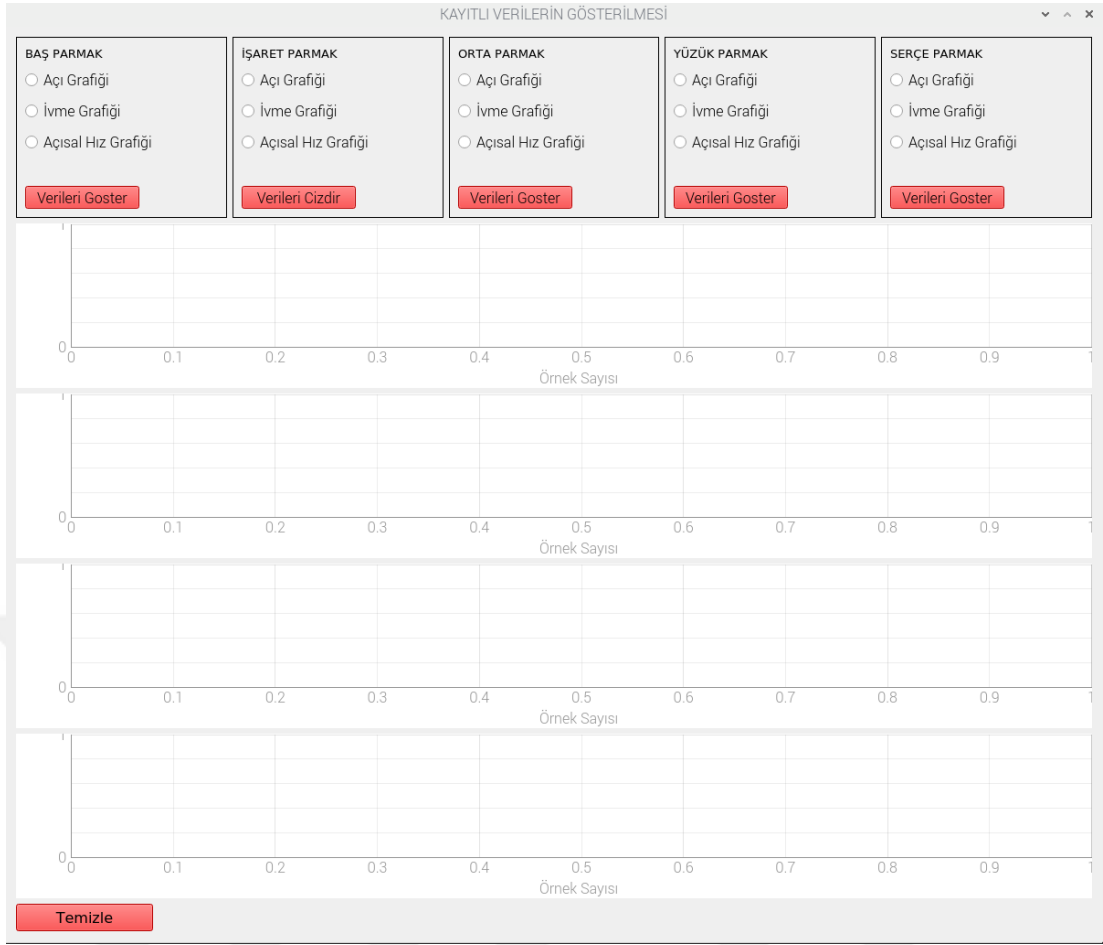
Ana menüde yer alan tüm parmaklar istenen veri butonuna tıklandığında şekil 3.34'deki ekran açılır. Bu ekranda istenen veri grafik türü seçilir. Grafik veri türü belirlendikten sonra veri al butonuna tıklandığı bütün sensörlerden seçilen veri türü ile ilgili verilerin grafikleri gerçek zamanlı olarak çizdirilir. Verileri çizdirilmesi durdurmak için durdur butonuna basılır. Elde edilen veriler kayıt edilecekse kaydet düğmesine basılır. Eğer başka bir veri grafiği çizdirilecekse temizle butonu ile tüm veriler silinir ve yeni veri alma süreci başlayabilir.



Şekil 3.34. Tüm parmaklar istenen veri grafiği

3.2.3.2. Kayıtlı Verilerin Görüntülenmesi

Parmaklardan veriler alınırken eğer bir kaydetme işlemi yapılmışsa daha sonradan bu verilere erişilebilir tekrar çizdirilebilir. Ana menüde kayıtlı verileri görüntüle butonuna tıklandığında şekil 3.35’de ekran açılacaktır. Gelen ekranda istenen parmağın istenen verisi seçilerek verileri göster butonuna tıklandığında veriler grafiksel olarak tekrar çizdirilecektir. Eğer başka parmak ya da farklı bir veri türü grafik çizdirilecekse grafiklerin silinmesi için temizle butonuna basılır. Kayıt edilen veriler aynı zamanda her eksen için ayrı ayrı dışarıya resim formatında aktarılabilir.



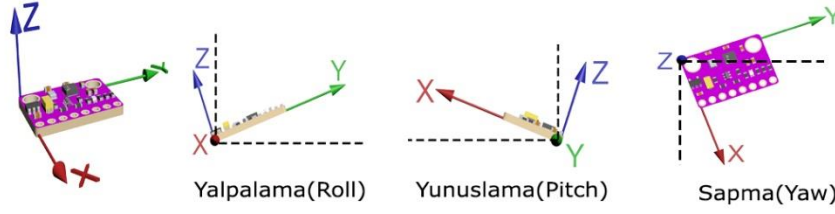
Şekil 3.35. Kayıtlı verilerin gösterilmesi

3.2.4. Açısal Değerlerin Hesaplanması

3.2.4.1. İvmeölçer Verileri İle Açının Hesaplanması

İvmeölçer hareketsiz durumda dünyanın yerçekiminden kaynaklanan ivmeyi aynı zamanda bir hareket sonucu oluşan ivmeyi ölçer. Doğrusal bir hareket yoksa sadece yer çekim ivmesini ölçer. İvmeölçer çıkış değeri g olarak ifade edildiğinden sensör tam yatay pozisyonda hareketsiz durumda x ekseninde $0g$, y ekseninde $0g$ ve z ekseninden $1g$ okunması gerekir. İvmeölçer üzerinde herhangi bir kuvvet etki etmiyorsa yer çekim ivmesini gösterecektir. Dolayısıyla ivmeölçerin eksenlerindeki çıkışlardan dönüş ya da eğim açısı hesaplanabilir. X eksen etrafındaki dönüş yalpalama(roll), Y eksen etrafındaki dönüş yunuslama(pitch) ve Z eksenindeki dönüş sapma(yaw) olarak ifade edilir. Eksenlerdeki dönüş hareketi şekil 3.36'de gösterilmiştir. Sensörün yalpalama hareketi Y eksen ile yatay düzlem arasındaki açının değişimine, yunuslama hareketi X eksen ile yatay düzlem arasındaki açının değişimine ve sapma ise X ekseninin manyetik kuzey arasındaki açının değişimine

neden olur. Eksenlerdeki bu dönüş açılarının hesaplanması için Euler açısı hesaplamaları kullanılır. Euler açısı hesaplamalarında yalpalama (roll) ϕ , yunuslama (pitch) θ ve sapma (yaw) ψ ile ifade edilir.



Şekil 3.36. Eksenlerdeki dönüş hareketi

Eksenler etrafındaki dönüş hareketleri sonucu oluşan açısal değişimi hesaplamak için denklem 3.2 ve 3.3 kullanılır (Asadzadeh, Samad-Soltani, Rezaei-Hachesu, & Salahzadeh, 2020). Eğer IMU sensörde manyometre yoksa sapma açısı Euler açısı denklemleri ile hesaplanamaz.

$$\text{Yunuslama} = \arctan\left(\frac{A_{cx}}{\sqrt{A_{cz}^2 + A_{cy}^2}}\right) \quad (3.2)$$

$$\text{Yalpalama} = \arctan\left(\frac{A_{cy}}{\sqrt{A_{cz}^2 + A_{cx}^2}}\right) \quad (3.3)$$

3.2.4.2. Jiroskop verileri ile açının hesaplanması

Eksenler etrafında meydana gelen dönüş açısı jiroskop verilerinden yola çıkarak hesaplamak mümkündür. Jiroskoplar anlık açısal değişimleri ölçerler dolayısıyla herhangi bir hareketin olmadığı durumda çıkışlarından sıfır değeri okunur. Anlık açısal değişimi sensörü okuma aralıkları yani örnekleme zamanı ile çarpılırsa anlık açısal konum değişim elde edilir. Her örneklem zamanı yapılan bu ölçümlerin toplamı bize açısal olarak konum değişimini verecektir. Bu konum değişimi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega(t) * dt \quad (3.4)$$

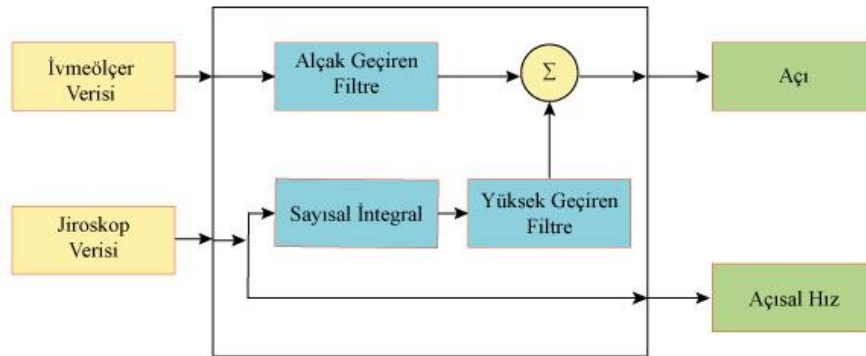
Denklem 3.4’de θ =açı, θ_0 =başlangıç açısı, $\omega(t)$ = açısal hız(derece/saniye) $d(t)$ =zaman temsil etmektedir. Jiroskop verilerinde sonsuz tane integral alınamayacağından bu denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\theta = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \omega t \quad (3.5)$$

İvmeölçer ile ölçülen açısal konum hesaplamalarında ivmeölçerin yapısı gereği titreşimlerden ve dışardan gelecek küçük kuvvetlerden etkileneceğinden hesaplamamızda yanlışlık olacaktır. Jiroskop ile yapılan ölçümlerde ise sürekli olarak integral alma işlemi yapılamayacağından ve sensörün yapısı gereği hareketsiz durumda bile jiroskop çıkışları sıfır olmadığı için zamanla kayma (drift) olarak bilinen sapmalara neden olacaktır. Bu nedenle doğru açı ölçümleri için ivmeölçer verileri ile jiroskop verileri birleştirme (füzyon) yapılır. Bu birleştirme işlemleri için geliştirilen birçok filtre vardır. Ancak burada en çok kullanılan tamamlayıcı (Complementary) ve Kalman filtresinden bahsedilecektir.

3.2.5. Tamamlayıcı (Complementary) Filtresi

İvmeölçer ile yapılan açısal konum belirlemede sensör üzerindeki titreşimler büyük açısal değişimlere neden olur. Jiroskop ile yapılan açısal konum hesaplamalarında ise integral işleminden kaynaklanan hata birikimleri sonucunda açısal hesaplamada kaymalar olur. Tamamlayıcı filtre, ivmeölçerin titreşimlerden kaynaklanan hatalı değerleri ve jiroskop ölçümlerindeki hata birikimlerini minimize etmek için tasarlanır. Filtreleme işleminde yapılan ivmeölçerden gelen yavaş değişimleri ve jiroskoptan gelen hızlı değişimleri alıp bunları birleştirmektir. İvmeölçerden gelen veriler alçak geçiren filtreden ve jiroskoptan gelen veriler yüksek geçiren filtreden geçirilir. Alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrenin frekans yanıtının toplamı 1'e eşittir. Şekil 3.37'da tamamlayıcı filtrenin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.37 Tamamlayıcı filtre blok diyagramı(Gui et al., 2015)

Tamamlayıcı filtre matematiksel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\theta = \alpha * (\theta + \omega * dt) + (1 - \alpha) * a_{cc} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6 'da yer alan ifadeler şöyledir;

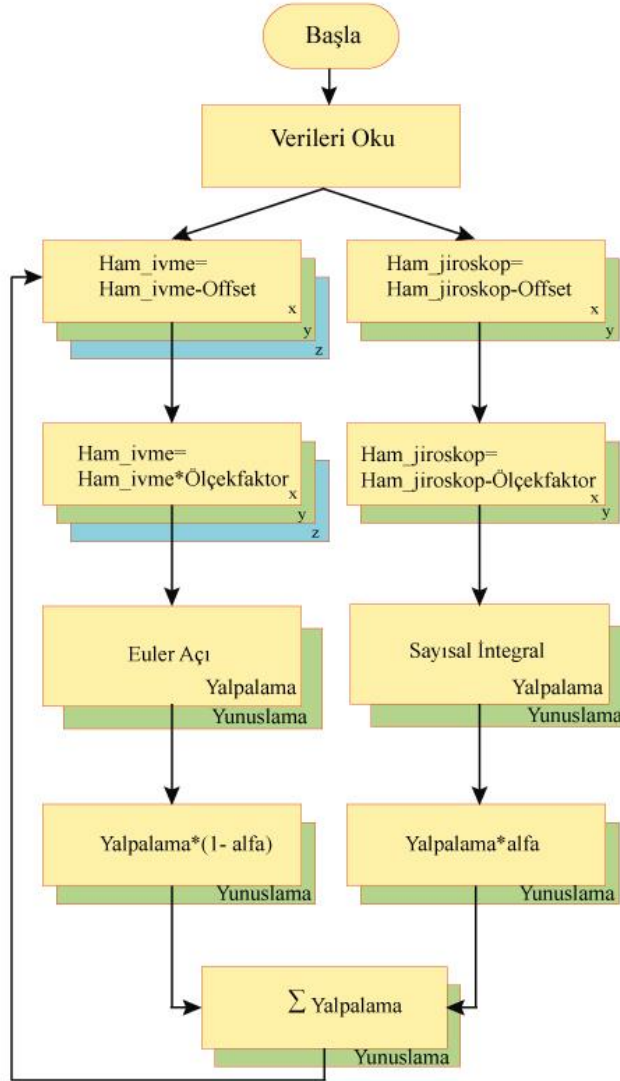
- θ (yalpalama veya yunuslama) açısı
- α Filtre katsayısı
- ω Jiroskopdan elde edilen açısal hız
- a_{cc} ivmeölçer verilerinden elde edilen açı
- dt örneklem periyodu

İvmeölçerler kısa sürelerde çıkışlarında gürültüye daha yatkın iken uzun sürelerde daha doğru sonuçlar üretirler. Jiroskoplar uzun sürelerde daha gürültülü sonuçlar verirken kısa sürelerde daha doğru sonuçlar üretirler. Dolayısıyla uzun sürelerde ivme ölçer verileri ve kısa sürelerde jiroskop verileri kullanılarak bir filtre uygulanır. Filtre katsayısı α değeri jiroskop için büyük seçildiğinde anlık değişimler filtreden geçerken ivme ölçer için anlık değişimler filtreden geçemeyecektir. Örneğin α değeri 0,98 belirlendiğinde $1-0,98=0,02$ katsayısı ivmeölçerin verisi için geçerli olacak ve ani değişimlerin açığa olan etkisi azaltılmış olacaktır.

$$\theta = 0,98 * (\theta + \omega * dt) + (0,02) * a_{cc} \quad (3.7)$$

Tamamlayıcı filtre katsayısı olan α belirlenirken denklem 3.8 kullanılır. Buradaki τ örneklem periyodu için zaman sabiti olup yüksek geçiren filtre ve alçak geçiren filtre için güvenilir kesme frekansı başka bir ifadeyle jiroskop ve ivmeölçer verilerine güven sınırını ifade eder. Alçak geçiren filtre için zaman sabitinden çok daha uzun süre veriler filtreden geçebilirken, zaman sabitinden kısa olanlar filtreden geçirilmez. Yüksek geçiren filtre için zaman sabitinden kısa süreli olanlar filtreden geçerken zaman sabitinden uzun süreli olan veriler filtreden geçemez. Tamamlayıcı filtrenin çalışması ile ilgili akış şeması şekil 3.38'de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau + dt} \quad (3.8)$$



Şekil 3.38 Tamamlayıcı filtre akış şeması (Hajdu, Brassai, & Szekely, 2017)

3.2.1. Kalman Filtresi

Kalman filtresi bir sistemin önceki durumu ile giriş çıkış verileri dayanarak bir sonraki durum tahmini yapan bir filtredir. Kalman filtresi öncelikli bir durum tahmini yapar sonra karşılaştırma yapar ve sonunda güncelleme ile daha iyi bir durum tahmini şeklinde çalışır. Bu tahmin algoritmasının kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir (Çayıroğlu, 2012).

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 'deki ifadelerin anlamı;

- k : durumları
- x_k : şu anki durum
- x_{k-1} : bir önceki durum
- u_k : kontrol sinyali (genelde dikkate alınmaz)
- w_{k-1} : bir önceki işlem gürültüsü
- AB : durum matrisleri (sabit sayıdır, genelde 1 alınır)

$$Z_k = Hx_k + v_k \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'daki ifadelerin anlamları;

- Z_k : şu anki ölçüm
- v_k : Ölçüm gürültüsü
- H : durum matrisi (sabit sayıdır, genelde 1 alınır)

Kalman filtresi için tahmin ve ölçüm güncelleme denklemleri

$$\text{Önceki durumu tahmin et} \quad \hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (3.11)$$

$$\text{Hata kovaryansını tahmin et} \quad P^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3.12)$$

$$\text{Kalman Kazancını hesapla} \quad K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\text{Tahmini Güncelle} \quad \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (3.14)$$

$$\text{Hata kovaryansını güncelle} \quad P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (3.15)$$

Yukarıda yer alan denklemlerde yer alan ifadeler;

- P : hata kovaryansı (hata ortak değişim miktarı)
- K_k : Kalman kazancı
- Q : İşlem gürültüsü
- R : Ölçüm gürültüsü

Kalman filtresinde başlangıç koşullar bilinmiyorsa bir önceki durum $x_{k-1}=0$, yine başlangıç durumunda hata kovaryansı bilinmiyorsa $P_{k-1}=1$ alınabilir. Bu veriler sisteme verildiğinde ilk döngü başlar. Burada bilinmeyen Q model ile ilgili hataları temsil ederken R ölçüm ile hataları temsil eder. Q değeri R değerinden büyük olarak

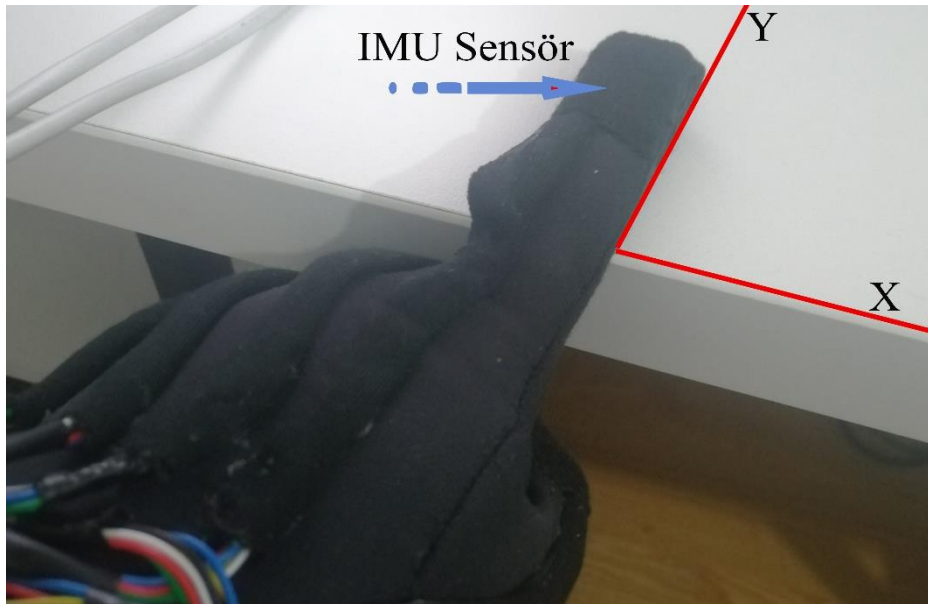
4. BULGULAR

Gerçeklenen akıllı veri alım eldiveni prototipin gerekli donanımsal bağlantılar ve yazılımsal altyapı tamamlanmış olup sensörlerden veriler alınarak hazırlanan kullanıcı arayüzünde gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Veriler alınırken ivmeölçer için hassasiyet $\pm 2g$, örnekleme hızı olarak 50 Hz seçilmiştir. Jiroskop sensörleri için hassasiyet 250 d/sn, örnekleme hızı 50 Hz seçilmiştir. Veriler alınmadan önce sensörlerin ofsetleme işlemleri yapılmış ve hesaplanan açısal verileri doğrulamak için parmak gonyometre kullanılmıştır. Aynı zamanda yatay pozisyonadaki ivme değerleri ile hareketsiz durumda jiroskop değerleri izlenmiştir. Gerçek zamanlı yapılan hareket ölçümlerinin sonuçları kaydedilerek tekrar izlenmiştir.

4.1. Ofsetleme İşlemi

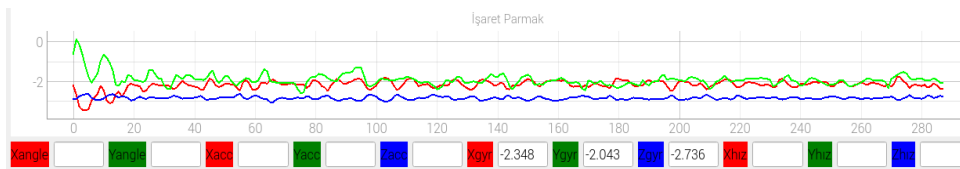
İdeal bir ivmeölçer sensörü yatay pozisyonda X ekseninde 0g, Y ekseninde 0g ve Z ekseninde 1g gösterir. Jiroskop sensörleri ise hareketsiz durumda her üç eksenindeki çıkışlarında sıfır olması beklenir. İvmeölçer ve jiroskop bu değerler haricinde bir değer gösteriyorsa bu hataya ofset hatası denir. Ölçümlerde hatasız bir değer elde etmek için sensörlerden elde edilen verilerden ofset hatasının çıkarılması gerekir. Ofset hatası sabit bir hata değildir. Bir sensörün ofseti çeşitli faktörlerden etkilenir sonuç zamanla değişir. Bu faktörlerden en önemlisi sıcaklıktır. Ayrıca birçok sensör fabrika çıkışında ofsetlenir ancak baskı devre üzerine lehimleme ve baskı devrenin bükülmesi gibi durumlarda ofseti değiştirir. Dolayısıyla sensörler montaj edildikten sonra ofsetlenmeye ihtiyaç duyar.

Akıllı veri alım eldiven prototipinde kullanılan BMI160 sensörleri ofset işlemi yapılırken FOC (Hızlı ofset kompanzasyonu) kullanılır. Hızlı ofset kompanzasyon özelliği aktif hale getirildikten sonra sensörü yatayda düz olduğu emin olunan bir yerde hareketsiz bir şekilde yaklaşık 250 ms bekletildiğinde her üç eksenindeki ivme ve jiroskop ölçüm hatalarını gösterecektir. Daha sonra bu ofset değerleri ölçüm değerlerinden çıkartılarak daha doğru sonuçlar elde edilir. Ofsetleme işlemi öncesi ivmeölçer ve jiroskop normal moda geçirilmelidir. Şekil 4.1 gösterildiği gibi işaret parmağı yatayda düz olan bir yere konumlandırılmış ve ofsetleme öncesi ve ofsetleme sonrası veriler kayıt edilmiştir. Ofsetleme öncesi ve sonrası üç eksen ivme değerleri ve üç eksen jiroskop değerleri gösterilmiştir.

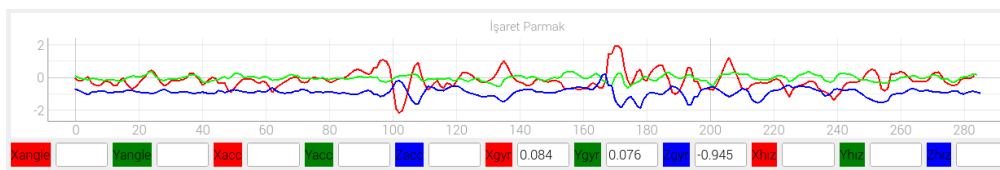


Şekil 4.1. İşaret parmak IMU sensörü ofset alma

Yatay pozisyonda hareketsiz durumda iken ivme değerlerinin X ve Y ekseninde 0 yakın olması Z ekseninde 1 olması beklenir. Hareketsiz pozisyonda her üç eksen de jiroskop değerlerinin de sıfıra yakın olması beklenir. Ofsetleme öncesi ve sonrası ivmeölçer ve jiroskop değerleri aşağıda gösterilmiştir.

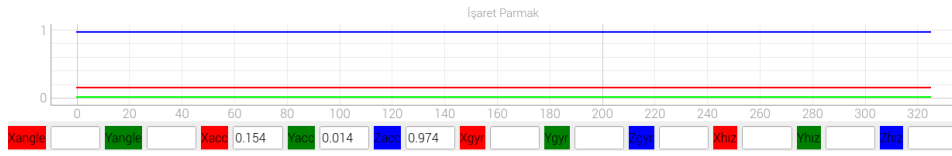


Şekil 4.2. Ofsetleme öncesi hareketsiz durumda jiroskop değerleri

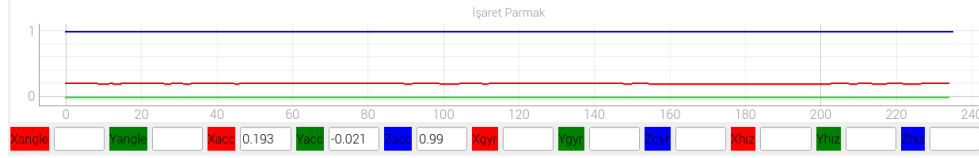


Şekil 4.3. Ofsetleme sonrası hareketsiz durumda jiroskop değerleri

Değerler incelendiğinde jiroskop değerlerinin ofsetleme öncesi üç eksen de ölçülen değerler sıfırdan uzak iken ofsetleme sonrası değerler sıfıra yaklaşmıştır.



Şekil 4.4. Ofsetleme öncesi yatay pozisyonda ivme değerleri

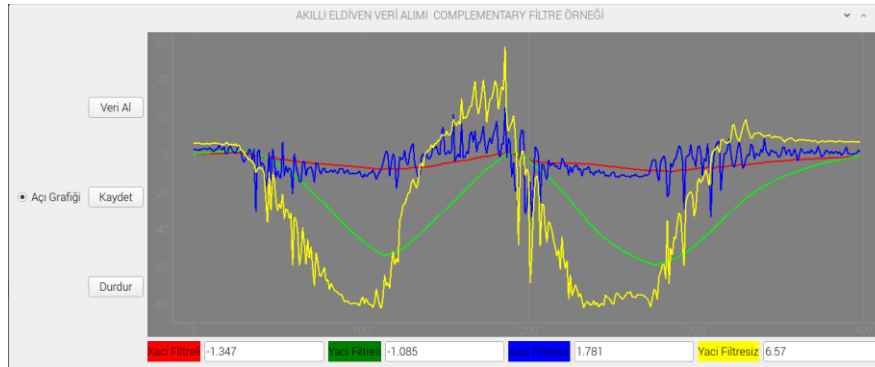


Şekil 4.5. Ofsetleme sonrası yatay pozisyonda ivme değerleri

Değerler incelediğinde yatay pozisyonda X ve Y ekseninde ivme değerlerin sıfıra yakın Z değerinin 1'e yakın olması gerekir. Ofsetleme sonrası Z eksenindeki değer yer çekim ivmesine yakınlaşmıştır.

4.2. Sensör Verilerine Tamamlayıcı Filtre Uygulanması

Açısal hareket sonucu oluşan açının hesaplanmasında ivmeölçer verileri ya da jiroskop verilerinden yararlanarak hesaplanabilir. Ancak ivmeölçerin titreşim ve harici kuvvetlerden kaynaklan yanlış değerler üretmesi, jiroskopta meydana gelen kayma nedeni ile bu veriler birleştirilir. Bu birleştirme algoritmalarından birisi olan tamamlayıcı filtre akıllı veri alım eldiven prototipinde denenmiştir. Filtre uygulanırken jiroskop katsayısı 0.98, ivmeölçer katsayısı 0.2 seçilmiştir. Jiroskop katsayısını 0.90 üzerinde olması daha kararlı bir filtre işlemine, ivmeölçer katsayısının küçük seçilmesi titreşimlerden daha az etkilenmesini sağlar(Cismas, Ioana, Vlad, & Casu, 2017). Örnek olarak orta parmağın X ve Y eksenindeki hareketlerinden hesaplanan açı değerlerinin filtreli ve filtresiz veriler şekil 4.6 'da gösterilmiştir.

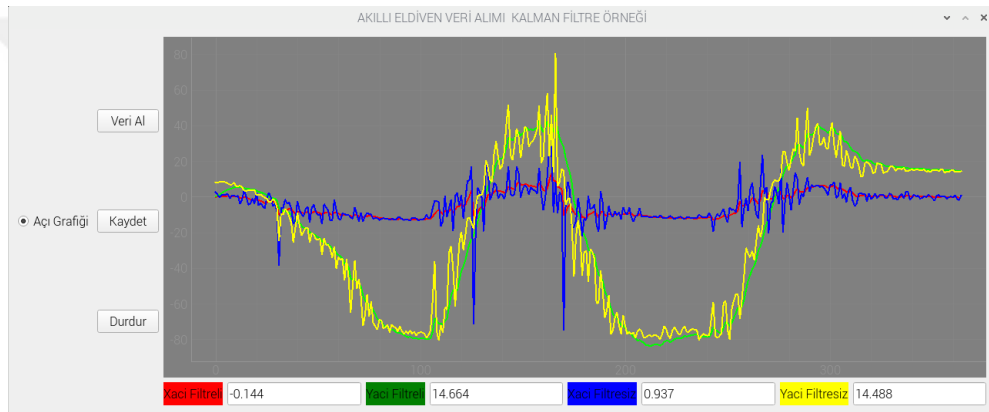


Şekil 4.6. X ve Y eksenindeki hareketlere uygulanan tamamlayıcı filtre

4.3. Sensör Verilerine Kalman Filtre Uygulaması

Tamamlayıcı filtre gibi farklı sensörlerden gelen verileri birleştirme algoritmalarından en güçlü olanı kalman filtresidir. Kalman filtresi bir tahmin algoritması olarak bilinir ve hesaplanması daha uzun süren bir algoritmadır. Filtre örneği için yine orta parmağın X ve Y eksenlerindeki hareketleri incelenmiştir. Sensörlerden gelen veriler sonucu hesaplanan açısal hareketin filtresiz ve Kalman filtresinden geçtikten sonra oluşan verilerin grafiği şekil 4.7 'de gösterilmiştir.

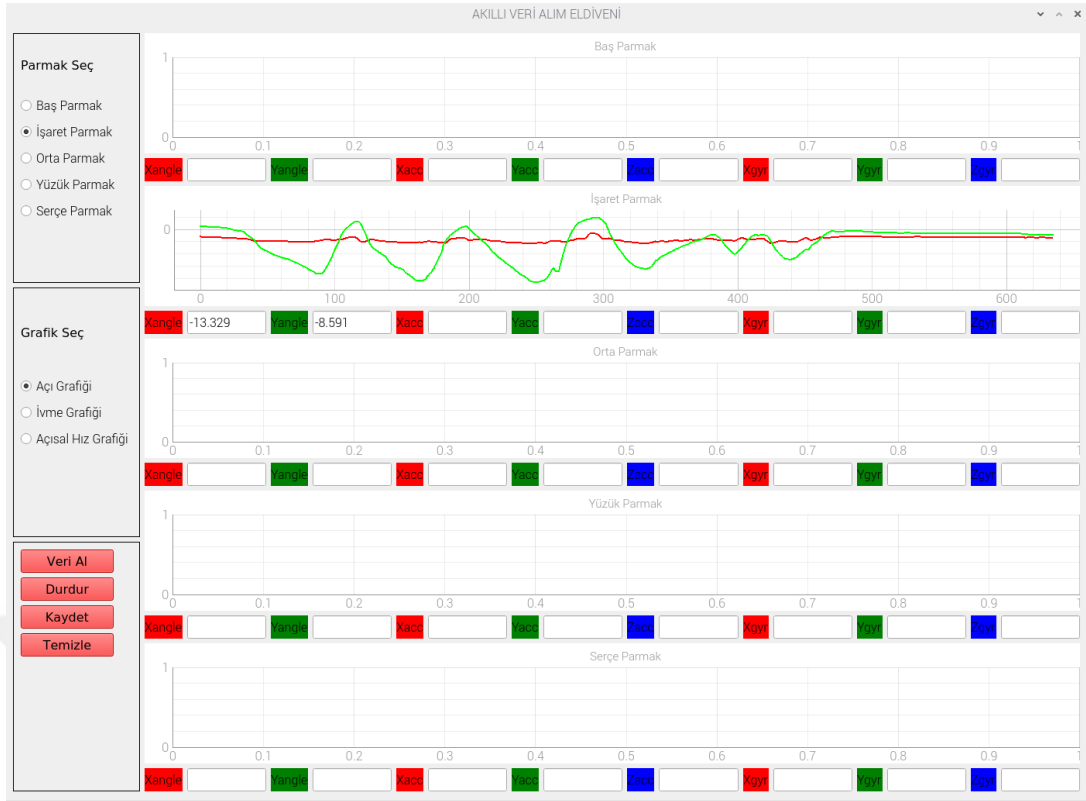
Sensör verilerine her iki filtre algoritması uygulanmış ve Kalman filtresi daha doğru sonuçlar üretmesinden dolayı akıllı veri alım eldiveni prototipinde açı değişimleri hesaplanırken Kalman filtresi kullanılmıştır.



Şekil 4.7. X ve Y eksenindeki hareketlere uygulanan Kalman filtre örneği

4.4. Tek Parmak İstenen Verinin Ölçülmesi

Akıllı veri alım eldiveni prototipinde kullanılan sensörler normal moda alındıktan ve ofsetleme işleminden sonra seçilen parmak ile istenen veri alınabilir. Şekil 4.8'de seçilen parmağın istenen verinin gerçek zamanlı olarak grafiği örnek olarak çizdirilmiştir. İşaret parmağı ile yapılan açı ölçüm sonucunda alınan değerler şekil 4.9'da gonyometre ile ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde parmak 10°,15°,20°,25°,30°,35°,40°,45°,50°,55° açılarında hareket ettirilmiş ve sensörden okunan değer gözlemlenmiştir. Sonuçlar tablo 4.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Tek parmak istenen veri grafiğinin çizdirilmesi



Şekil 4.9. Gonyometre ile ölçüm doğrulama

Tablo 4.1. Sensör Açı verileri ile gonyometre verilerinin karşılaştırılması

Sensörden Ölçülen	Gonyometre ile Ölçülen	Fark
10 ⁰	10,5 ⁰	0,5 ⁰
15 ⁰	16 ⁰	1 ⁰
20 ⁰	21 ⁰	1 ⁰
25 ⁰	26 ⁰	1 ⁰
30 ⁰	31 ⁰	1 ⁰

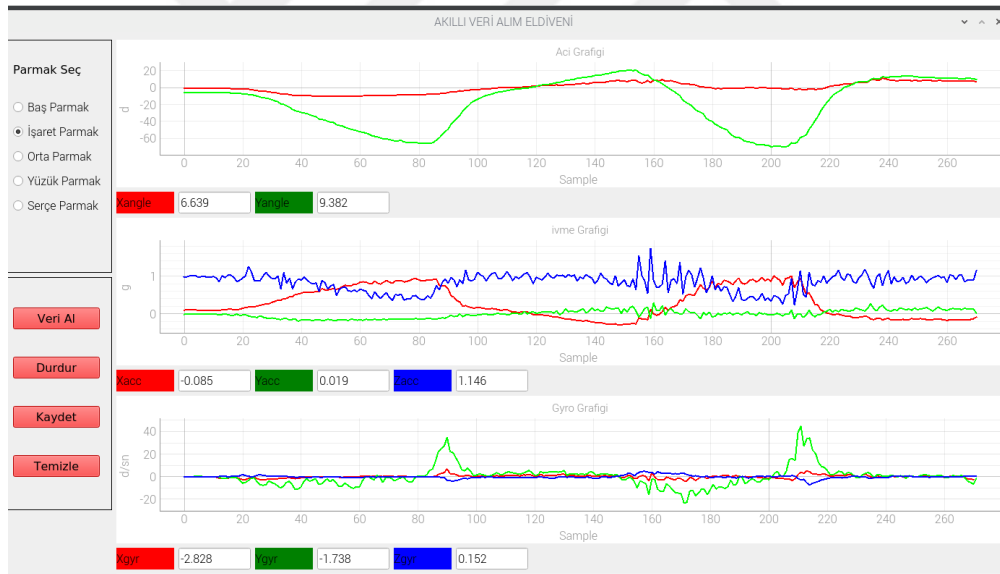
Tablo 4.1. Devamı

Sensörden Ölçülen	Gonyometre ile Ölçülen	Fark
35 ⁰	36,5 ⁰	1,5 ⁰
40 ⁰	41,5 ⁰	1,5 ⁰
45 ⁰	46,5 ⁰	1,5 ⁰
50 ⁰	52 ⁰	2 ⁰
55 ⁰	57 ⁰	2 ⁰

Karşılaştırma sonuçlarına göre açı büyüdükçe açı hata farkı büyümektedir. Ölçüm öncesi yapılan ofsetleme işlemi hatalı sonuçları azaltmaktadır.

4.5. Tek Parmak Tüm Verilerin Ölçülmesi

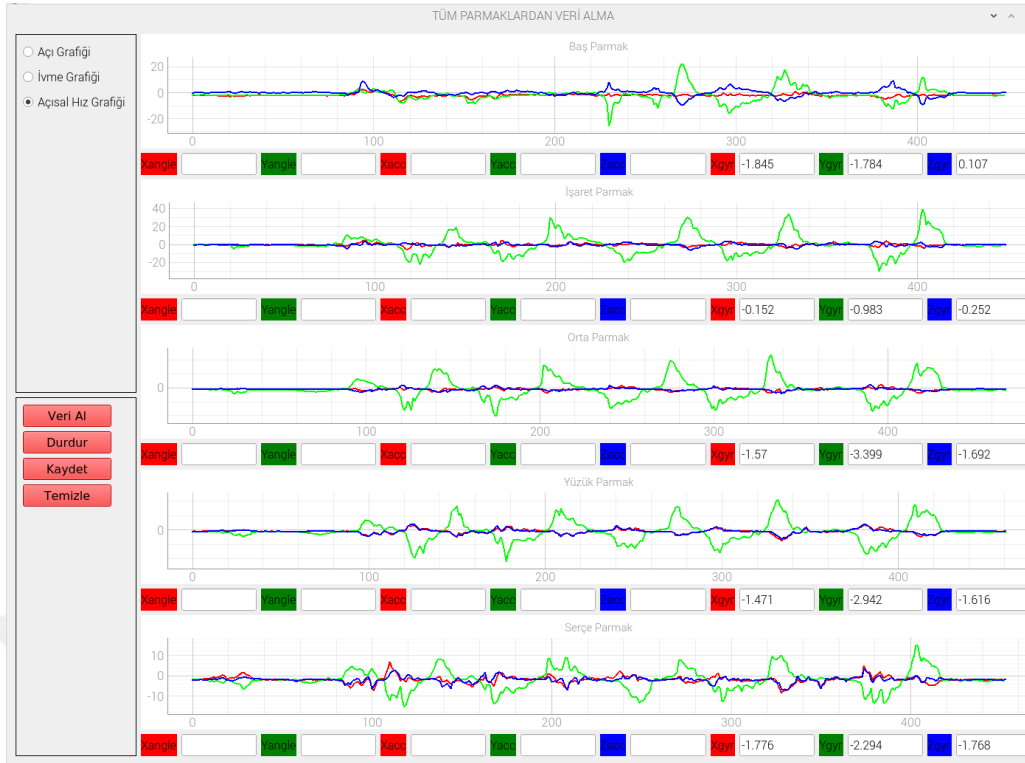
Seçilen parmağa ait hareketin açısal değişimi, ivme değerleri ve jiroskop değerleri gerçek zamanlı olarak istendiği takdirde gösterilebilir. Şekil 4.9 ‘da seçilen parmak ile ilgili verilerini gerçek zamanlı grafiksel olarak çizdirilmiş ayrıca sayısal değerler gösterilmiştir.



Şekil 4.10. İşaret parmakla ilgili tüm verilerin görselleştirilmesi

4.6. Tüm Parmak Verilerin Ölçülmesi

Tüm parmakların aynı anda hareketi ile oluşan açısal değişim, ivme ve açısal hız değişimini izlenebilir. Şekil 4.10 ‘da tüm parmak hareketlerinin açısal hız değişim grafiği gösterilmiştir.



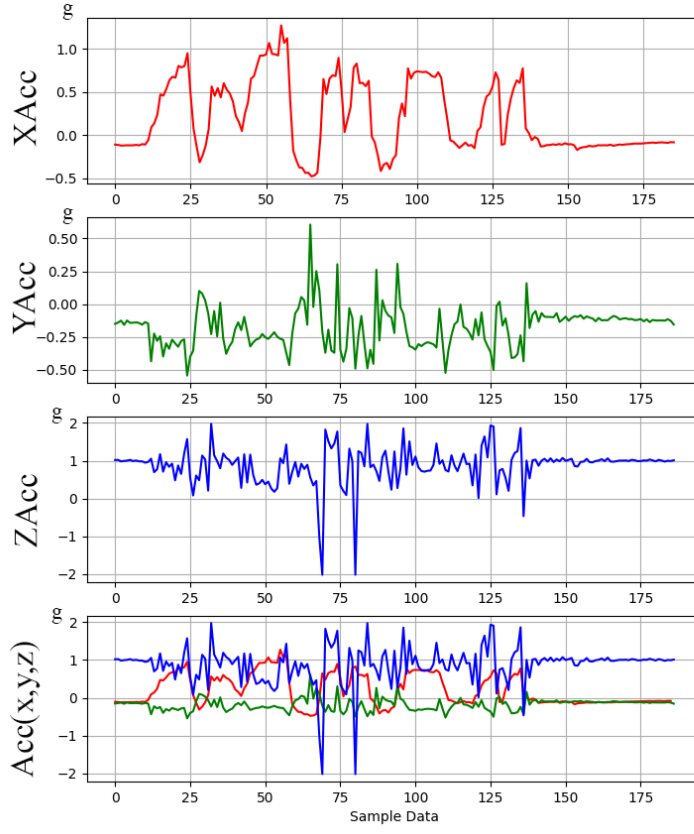
Şekil 4.11. Tüm parmak hareketlerinden elde edilen açısal hız grafiği

4.7. Kayıtlı Verilerin Görselleştirilmesi

Kullanıcı arayüzünde her parmak üzerinde bulunan sensörle ilgili olarak istenen veriler gerçek zamanlı olarak izlenebildiği gibi var olan veriler kaydet butonu sayesinde csv formatında kayıt edilmektedir. Daha sonra kayıt edilen bu veriler tekrar görsel olarak gösterilmektedir. Bu veriler ayrıca başka bir yerde kullanılabilmesi için resim formatında dışarıya aktarılmaktadır. Şekil 4.11 'da verileri kayıt edilmiş bir harekete ait ivme verisinin tekrar görselleştirilmesi, şekil 4.12 'de resim olarak kayıt edilebilecek formatta gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Kayıtlanmış bir ivme verisinin tekrar çizdirilmesi



Şekil 4.13. Kayıtlanmış ivme verisinin resim olarak dışarıya alınması

5. TARTIŞMA

5.1. Tasarlanan Akıllı Veri Alım Prototipini Literatür ile Karşılaştırılması

Tez kapsamında gerçekleştirilen akıllı eldiven tasarımına benzer araştırma amaçlı yapılmış çalışmalar taranmış ve mikrodenetleyici türü, sensör tipi, yapılan hesaplamalar, kullanılan filtre ve arayüz yazılımları ile ilgili özet tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1.Araştırma amaçlı yapılan akıllı eldiven özellikleri

Makale	MCU	Sensör	Açı	Hız	İvme	Arayüz	Filtre
(Rizwan et al., 2019)	Arduino Leonard	Flex IMU	+	-	-	+	-
(Lin et al., 2018)	MSP430	IMU	+	-	-	+	Madgwick
(Connolly et al., 2017)	AVR32 UC3C	IMU	+	+	-	-	Complementary
(Mumma et al., 2018)	Intel Edison	IMU	+	-	-	+	Complementary
(R. C. King et al., 2009)	x	3DOF İvme Flex	-	-	+	-	Median
(Hsiao et al., 2015)	MSP430	IMU	+	-	+	-	Kalman
(Park et al., 2014)	x	Lineer Pot.	+	-	-	+	-
(Lin et al., 2019)	MSP430	IMU	+	+	+	-	Complementary
(Ghate et al., 2020)	Atmega 328P	IMU	+	-	-	+	Kalman
(Gunawardane & Medagedara, 2017)	Arduino	IMU Flex	+	+	-	+	-
(Sarwat et al., 2021)	Arduino	IMU Flex FSR	+	-	-	+	Median
(Faisal et al., 2021)	x	IMU Flex	+	-	-	+	Complementary
(Weber et al., 2016)	Arduino	IMU	+	-	-	-	Average
(Chang & Chang, 2019)	x	IMU	+	-	-	+	-

(Fang et al., 2015)	STM32 F4	IMU	+	-	-	-	Kalman
(Jhang et al., 2017)	Arduino	IMU	+	-	-	+	-
Bu çalışma	Raspberry Pi	IMU	+	+	+	+	Kalman

Literatür taramasına bakıldığında el ve parmak hareketleri ile ilgili veriler elde etmek için çoğunlukla IMU sensörü olmak üzere flex ve liner potansiyometre kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada daha hassas sonuçlar vermesinden dolayı IMU sensör tercih edilmiştir. Literatür taramalarında eldiven tasarımı öncesi sensör seçimi ya da araştırılması yapılmamıştır. IMU sensörler genelde ticari olarak satılırken özel bir alana yönelik satılmaz bu nedenle seçilen sensörün uygunluğu konusunda bir seçim kriteri yoktur. Yapılan bu çalışmada eldiven tasarımı öncesi piyasada genel amaçlı en çok satışı olan sensörlerden 3 tanesi belirlenmiştir. Daha sonra seçilen sensörler hazırlanan deney düzeneği sayesinde veriler alınmıştır. Alınan verilerde en uygun sonucu veren sensör akıllı eldiven tasarımında kullanılmıştır.

Kullanılan mikrodenetleyici türleri incelendiğinde akıllı eldiven tasarımlarında mikrodenetleyici olarak Raspberry Pi kullanımına rastlanmamıştır. Raspberry pi üzerinde bir işletim sisteminin çalışıyor olması ve birçok programla dilini desteklemesi ayrıca fiziksel ölçüler itibarıyla taşınabilir olması en önemli avantajlarıdır. Üzerinde bulunan pinleri sayesinde 6 adet sensör ek bir donanım gerektirmeden bağlanabilmiş ve yine ek bir programa ihtiyaç duyulmadan işletim sistemi beraber gelen Python programla dili sayesinde yazılım alt yapısı hazırlanmıştır. Parmak hareketlerden elde edilen verilerden açı, ivme ve açısal hız hesaplamalarına bakıldığında çoğunlukla bir değer hesaplanırken yapılan bu çalışmada parmak hareketlerinin açı, ivme ve açısal hız değerlerin hepsi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken açık kaynak kod Python programla dilinde yapılmış ve PyQt5 kütüphanesi kullanılarak detaylı bir arayüz hazırlanmıştır. Hazırlan arayüzde tüm sensörlerin hassasiyeti, ölçüm aralığı ve ofset alma gibi birçok parametre arayüz üzerinde ayarlanabilmektedir. Aynı zamanda arayüzde parmak seçimi ve veri tür seçimi yapılarak hareketi gerçek zamanlı olarak hem grafiksel olarak hem de sayısal olarak izlenebilmektedir. Gerçek zamanlı olarak alınan veriler kayıt edilip daha sonra tekrar çizdirilmektedir. Kullanılan filtre türleri incelendiğinde ivme ve jiroskop verileri en çok tercih edilen iki filtre seçilmiştir. Seçilen tamamlayıcı ve Kalman filtresi açı

hesaplamasında denenmiş ve Kalman filtresi daha doğru sonuçlar verdiği için Kalman filtresi tercih edilmiştir. Ancak yazılım kodlamasında küçük bir değişiklik ile istenirse verilere tamamlayıcı filtrede uygulanabilir.

5.2. Tasarlanan Akıllı Veri Alım Prototipinin Ticari Ürünler ile Karşılaştırılması

Akıllı veri alım eldiveni olarak ticari amaçla üretilen ve açık kaynak olarak bulunabilen çeşitleri araştırılmış ve özellikleri özet halinde tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Ticari amaçlı ve açık kaynak akıllı eldiven tasarımları

Firma	MCU	Sensör	Açı	Arayüz	Açık Kaynak	Hata(°)	ODR(Hz)
(Cyber Glove, 2022)	x	Flex	+	+	-	x	100
(Ntention, 2022)	x	IMU	+	-	-	x	x
(5DT, 2022)	x	Flex	+	+	-	x	75
(Neofect, 2022)	x	Accelometer Bend	+	+	-	x	x
(StretchSense, 2022)	x	Flex	+	+	-	x	x
(Xsens, 2022)	x	IMU	+	+	-	±2,5	90
(Polhemus, 2022)	x	IMU	+	+	-	x	x
(Captoglove, 2022)	STM32L433RTC	IMU	+	+	-	x	x
(BeBop, 2022)	ARM CortexM4	IMU	+	+	-	±1,5	200
(Nansen, 2022)	ARM Quad Core	IMU	+	+	-	±2,5	240
(Keyglove, 2022)	AT90USB	Flex Touch	+	+	+	x	x
Bu çalışma	Raspberry Pi	IMU	+	+	+	±1,3	100

Ticari olarak satılan akıllı veri alım eldivenleri incelendiğinde sensör olarak daha çok IMU sensör tercih edildiği görülmektedir. Kullanılan mikrodnetleyici türü olarak bakıldığında bir çoğunda mikrodnetleyici türü belirtilmemiştir. Mikrodnetleyici türü belirtilenlerde Raspberry Pi kullanımına rastlanmamıştır. Veri türü bakımında bakıldığında hepsinde açı hesaplanmış ancak ayrı olarak bir ivme ya da açısal değeri kullanımına rastlanmamıştır. Genelde birçok ticari üründe arayüz programına rastlanmıştır. Açık kaynak olması açısından bakıldığında sadece bir tanesinin açık kaynak olduğu tespit edilmiştir. Bu anlamda bu tez çalışmasında yapılan akıllı veri alım eldivenin açık kaynak olması önem kazanmaktadır.



6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında tez önerisinde belirtilen hedefler gerçekleştirilmiştir. Donanımsal olarak parmak uçlarına IMU sensörler yerleştirilmiş ve Raspberry Pi ile bağlantıları olan bir eldiven tasarlanmıştır. Yazılım kısmında sensörlerle SPI haberleşme protokolü kullanılarak veriler okunmuştur. Sensörlerden elde edilen ivme ve jiroskop verileri Python programlama dilinde işlenmiş ve bu verilerden açısal konum, açısal hız ve ivme verileri hesaplanmıştır. Verilerden hesaplama yaparken uygun filtre algoritması uygulanmıştır. İşlenen verilerin görselleştirilmesi için PyQt5 kütüphanesi kullanılarak kullanıcı arayüzü yazılmış ve veriler gerçek zamanlı olarak gösterilmiştir. Veriler istendiğinde kayıt altına alınmıştır.

Tez çalışmasında verilerin alınması, işlenmesi ve görüntülenmesi noktasında hem ticari hem de akademik taramaların yapılması yazılımsal ve donanımsal olarak mühendislik alanında büyük kazanımlar elde edilmiştir.

Tez kapsamında yapılan akıllı veri alım eldiveni prototipi çalışması donanımsal ve yazılımsal olarak geliştirilmeye açıktır. Sensör verilerin kablosuz olarak iletilmesi, hazırlanan arayüz programının bir android uygulaması ile cep telefonuna aktarılması yazılımsal olarak geliştirilebilir yönleridir. Tasarlanan eldivenin parmak kısımlarının açık olarak tasarlanması ve sadece parmak uçlarına değil parmak eklem noktalarına da sensör yerleştirilerek parmak eklem açılarının da ölçülebilmesi donanımsal olarak geliştirilebilir yönleridir.

KAYNAKÇA

- 5DT. (2022). 5DT Data Glove. Retrieved May 24, 2022, from <https://5dt.com/5dt-data-glove-ultra/>
- Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262.
- Anthrotronix. (2022). Anthrotronix Nuglove. Retrieved May 27, 2022 from <https://www.anthrotronix.com/nuglove-projects/>
- Asadzadeh, A., Samad-Soltani, T., Rezaei-Hachesu, P., & Salahzadeh, Z. (2020). *Low-cost interactive device for virtual reality*. Paper presented at the 2020 6th international conference on Web research (ICWR).
- Autonics. (2021). Retrieved May 22, 2022 from https://www.autonicsonline.com/product/product&product_id=10531
- BeBop. (2022). BeBop Sensors Data Glove. Retrieved from <https://bebopsensors.com/arvr/>
- Caeiro-Rodríguez, M., Otero-González, I., Mikic-Fonte, F. A., & Llamas-Nistal, M. (2021). A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications. *Sensors*, 21(8), 2667. Retrieved May 22, 2022 from <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2667>
- CaptoGlove. (2022). CaptoGlove. Retrieved May 26, 2022 from <https://www.captoglove.com/>
- Chang, H.-T., & Chang, J.-Y. (2019). Sensor glove based on novel inertial sensor fusion control algorithm for 3-d real-time hand gestures measurements. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 658-666.
- Cismas, A., Ioana, M., Vlad, C., & Casu, G. (2017). *Crash detection using imu sensors*. Paper presented at the 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS).
- Connolly, J., Condell, J., O'Flynn, B., Sanchez, J. T., & Gardiner, P. (2017). IMU sensor-based electronic goniometric glove for clinical finger movement analysis. *IEEE Sensors Journal*, 18(3), 1273-1281.
- CyberGlove. (2022). CyberGlove System. Retrieved May 23, 2022 from <http://www.cyberglovesystems.com/cyberglove-iii/>
- Çayiroğlu, İ. (2012). Kalman filtresi ve programlama. *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*, 1.
- Dhaker, P. (2018). Introduction to SPI interface. *Analog Dialogue*, 52(3), 49-53.
- Faisal, M. A. A., Abir, F. F., & Ahmed, M. U. (2021). *Sensor Dataglove for Real-time Static and Dynamic Hand Gesture Recognition*. Paper presented at the 2021 Joint 10th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2021 5th International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR).
- Fang, B., Guo, D., Sun, F., Liu, H., & Wu, Y. (2015). *A robotic hand-arm teleoperation system using human arm/hand with a novel data glove*. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- Ghate, S., Yu, L., Du, K., Lim, C. T., & Yeo, J. C. (2020). *Sensorized fabric glove as game controller for rehabilitation*. Paper presented at the 2020 IEEE SENSORS.
- Gui, P., Tang, L., & Mukhopadhyay, S. (2015). *MEMS based IMU for tilting measurement: Comparison of complementary and kalman filter based data fusion*. Paper presented at the 2015 IEEE 10th conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).

- Gunawardane, P., & Medagedara, N. T. (2017). *Comparison of hand gesture inputs of leap motion controller & data glove in to a soft finger*. Paper presented at the 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS).
- Hajdu, S., Brassai, S. T., & Szekely, I. (2017). *Complementary filter based sensor fusion on FPGA platforms*. Paper presented at the 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP).
- Hsiao, P.-C., Yang, S.-Y., Lin, B.-S., Lee, I.-J., & Chou, W. (2015). *Data glove embedded with 9-axis IMU and force sensing sensors for evaluation of hand function*. Paper presented at the 2015 37th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).
- Jhang, L.-H., Santiago, C., & Chiu, C.-S. (2017). *Multi-sensor based glove control of an industrial mobile robot arm*. Paper presented at the 2017 International Automatic Control Conference (CACCS).
- Jyothi, M., Chandra, L. R., Sahithi, M., Rani, A. J., Poornima, J., & Sudha, N. N. (2012). Implementation of low complex and high secured SPI communication system for multipurpose applications. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(1), 3214-3219.
- Keyglove. (2022). Keyglove. Retrieved from <https://keyglove.net/>
- King, M. (2022). Motion King. Retrieved May 25, 2022 from <https://datasheetspdf.com/pdf/928656/MotionKing/17HS3401/1>
- King, R. C., Atallah, L., Lo, B. P., & Yang, G.-Z. (2009). Development of a wireless sensor glove for surgical skills assessment. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13(5), 673-679.
- Lin, B.-S., Lee, I.-J., Yang, S.-Y., Lo, Y.-C., Lee, J., & Chen, J.-L. (2018). Design of an inertial-sensor-based data glove for hand function evaluation. *Sensors*, 18(5), 1545.
- Lin, B.-S., Lee, I., Chiang, P.-Y., Huang, S.-Y., & Peng, C.-W. (2019). A modular data glove system for finger and hand motion capture based on inertial sensors. *Journal of medical and biological engineering*, 39(4), 532-540.
- Malkoç, B. (2012). Temel bilimler ve mühendislik eğitiminde programlama dili olarak python. *XIV. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, 201.
- Mankar, J., Darode, C., Trivedi, K., Kanoje, M., & Shahare, P. (2014). Review of I2C protocol. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(1).
- Mummadi, C. K., Leo, F. P. P., Verma, K. D., Kasireddy, S., Scholl, P. M., Kempfle, J., & Laerhoven, K. V. (2018). *Real-time and embedded detection of hand gestures with an IMU-based glove*. Paper presented at the Informatics.
- Nansense. (2022). Nansense Glove. Retrieved May 26, 2022 from <https://www.nansense.com/gloves/>
- Neofect. (2022). Neofect Stroke Rehabilitation. Retrieved May 24, 2022 from <https://www.neofect.com/us/blog/stroke-rehabilitation-is-now-fun-thanks-to-raphael-smart-glove>
- Ntention. (2022). An Astronaut Smart Glove to Explore The Moon, Mars and Beyond. Retrieved May 23, 2022, from <https://ntention.com/posts/astronaut-smart-glove/>
- Park, Y., Lee, J., & Bae, J. (2014). Development of a wearable sensing glove for measuring the motion of fingers using linear potentiometers and flexible wires. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(1), 198-206.

- Passaro, V. M. N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. (2017). Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective. *Sensors*, 17(10), 2284. Retrieved May 27, 2022, from <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2284>
- Polhemus. (2022). Hand and finger motion trackers. Retrieved May 26, 2022 from <https://polhemus.com/motion-tracking/hand-and-finger-trackers/>
- Rizwan, S. B., Khan, M. S. Z., & Imran, M. (2019). *American sign language translation via smart wearable glove technology*. Paper presented at the 2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE).
- Sarwat, H., Sarwat, H., Maged, S. A., Emara, T. H., Elbokl, A. M., & Awad, M. I. (2021). Design of a Data Glove for Assessment of Hand Performance Using Supervised Machine Learning. *Sensors*, 21(21), 6948.
- Sorotec. (2018). Retrieved May 28, 2022 from https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf
- StretchSense. (2022). StretchSense-MoCap. Retrieved May 25, 2022, from <https://stretchsense.com/>
- Weber, P., Rueckert, E., Calandra, R., Peters, J., & Beckerle, P. (2016). *A low-cost sensor glove with vibrotactile feedback and multiple finger joint and hand motion sensing for human-robot interaction*. Paper presented at the 2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN).
- Xsens. (2022). Manus Prime 2 Xsens. Retrieved May 25, 2022 from <https://www.xsens.com/products/xsens-gloves-by-manus>.

ÖZ GEÇMİŞ

Levent YAVAN, 1999 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. OMÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik- Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına 2019 yılında girdi.

ORCID ID : 0000-0003-3331-7728

Yayınlar:

Yavan, L. & Tepe, C. (2021). Test Experiment Design for IMU-Based Angle Measurement Systems. European Journal of Science and Technology, (26), 180-184.