

Nesnelerin İnterneti Entegreli Çevrimiçi Yürüyüş Analiz Sistemi Tasarımı ve Uygulaması

Internet of Things Integrated Online Gait Analysis System Design and Application

Bora Ayvaz¹, Hakan İlikçi², Onur Safa Gündoğdu¹, Fuat Bilgili², Ali Fuat Ergenç¹

¹Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

{ayvazb17}@itu.edu.tr

{gundogdu17}@itu.edu.tr

{aergenc}@itu.edu.tr

²Ortopedi ve Travmatoloji Anabilim Dalı
İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesi

{hakanilikci}@gmail.com

{fuat.bilgili}@istanbul.edu.tr

Özetçe

Yürüyüş analizi, çeşitli amaçlarla klinik uygulamalarda kullanılan sinir, kas-iskelet ve kalp-solunum sistemlerinin etkileşimlerine bağlı bir anatomik analiz yöntemleri bütünüdür. Biyomedikal ve elektrik-elektronik mühendisliği alanlarındaki gelişmeler yürüyüş analizini görsel yöntemlerinden uzaklaştırarak, sensör ve görüntü işleme tekniklerinin bir arada kullanıldığı çözümlere doğru yöneltmiştir. Bununla birlikte nesnelerin interneti teknolojilerinin bu alana entegre edilmesi yürüyüş analizinde sensör ve görüntü işleme tekniklerinin bir arada daha uyumlu kullanılabilmesine, analiz sürecinin klinik uzmanları tarafından daha verimli takip edilebilmesine ve sonuçların daha hızlı elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmada yürüyüş analizi için nesnelerin interneti altyapısı kullanılarak geliştirilen, çevrimiçi sensör verileri ve çevrimiçi görüntü işleme verilerinin birlikteliği ile veri takibi - analiz sonuçları sağlayabilen bir sistem geliştirilmiştir. Bu bildiride geliştirilen sistemin nesnelerin interneti altyapısında kullanılan teknolojiler, sensör füzyonu ile sensör-kamera kalibrasyonunda kullanılan teknikler ve klinik uzmanların veri takibi için geliştirilen arayüz açıklanmış, bir hasta için yapılan gerçek uygulama sonuçları aynı hastanın medikal altın standart sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca sensör-kamera entegrasyonunun çeşitli oranlarda ürettiği sonuçlar gösterilmiştir.

Abstract

Gait analysis is a comprehensive anatomical methodology, involves neural, musculoskeletal, and cardiorespiratory systems, utilized for diverse clinical objectives. The analysis techniques in gait analysis has evolved due to biomedical and

electrical-electronic engineering progress, transitioning away from conventional visual techniques toward integrated solutions merging sensor and image processing methods. Integration of the Internet of Things technologies into this field has allowed the use of sensor and image processing techniques together in gait analysis which helped clinicians to follow the process more efficiently and to obtain the results faster. This study presents an IoT-infrastructure system for gait analysis and explains the used IoT technologies, sensor fusion methods, sensor-camera calibration techniques, and an interface for clinical data monitoring. In addition, the actual application results for a patient are compared with the medical gold standard results of the same patient and the results produced by the sensor-camera integration at various rates are shown in this paper.

1. Giriş

Yürüyüş analizi, belirli hastalıkları teşhis etmek ve izlemek, atletik performansı değerlendirmek, yaralanmaları önlemek, rehabilitasyon sürecini izlemek ve tedavilerin etkinliğini değerlendirmek için çeşitli klinik uygulamalarda kullanılan bir tekniktir. Yürüyüş analizi, yürümenin evresini belirlememizi, insan yürüyüş olaylarının kinematik ve kinetik parametrelerini tespit etmemizi ve kas-iskelet fonksiyonlarını nicel olarak değerlendirmemizi sağlar. Sonuç olarak, yürüyüş analizi spor, rehabilitasyon ve sağlık teşhislerinde uygulama alanı bulmuştur. [1].

Yürüyüş analizi geleneksel olarak tıp uzmanları tarafından hareket yakalama sistemleri veya görsel gözlemler kullanılarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, biyomedikal mühendisliğindeki son gelişmeler, yürüyüş analizi için daha uygun ve kullanımını kolay bir yöntem olarak atalet ölçüm birimlerine (IMU'lar) sahip giyilebilir sensör sistemlerini kullanıma sunmuştur. Tipik olarak ayak bileklerinin hemen üzerindeki bacaklara yerleştirilen bu giyilebilir sensörler, uzun süreli yürüyüş izlemeye olanak

tanır ve analiz sırasında ayakkabılı veya ayakkabısız kullanılabilir. [2].

Yürüyüş analizi verisi elde edilmesinde sensörlerin yanında görüntü işleme teknolojileri de sık olarak kullanılmaktadır. Bu görüntü analiz yöntemleri çeşitli noktalara aktif veya pasif işaretçi yerleştirilerek gerçekleştirilmektedir. [3]. Sensör de ve görüntü teknolojilerini birlikte bulunduran ölçüm yöntemleri geliştirilse de medikal olarak altın standart kabul edilen sistemler yalnızca görüntü verisi kullanmaktadır. [4].

Görüntü işleme tabanlı yürüyüş analizi sistemleri genel olarak yürüyüş analizi yapılacak kişinin işaretçiler ile yürüdüğü görüntü kayıtları üzerinden çevrimiçi olarak gerçekleştirilmektedir. Bu durum da analiz sonuçlarının uzun süreler sonunda elde edilmesine neden olmaktadır. Buradaki çalışmanın amacı nesnelerin interneti altyapısı sayesinde hem çevrimiçi sensör verileri hem de çevrimiçi görüntü işleme verileri kullanarak hem anlık görüntüleme hem de kısa süreli analiz sonuçları üretebilen bir yürüyüş analiz sistemi geliştirebilmektir.

Bu bildiri girişin bölümünün ardından yürüyüş analizini ve metodu anlatan ikinci bölüm, sisteminde kullanılan altyapıyı anlatan üçüncü bölüm, uygulamanın anlatıldığı dördüncü bölüm ve son olarak sonuçların gösterildiği beşinci bölüm olarak organize edilmiştir.

1.1. Literatür Taraması

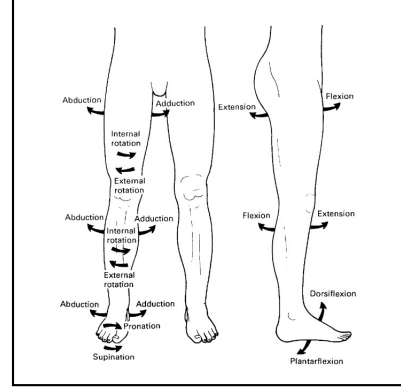
Yürüyüş analizi sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarda sensör ve görüntü işleme teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanılmaktadır. Stefanović ve Caltenco 2009 yılında yaptıkları çalışmada, yürüyüş esnasında verileri toplayabilmek için 4 adet ivmeölçer ve 4 adet yük hücresinden oluşan bir ölçüm birimi ve bu birimden gelen verileri kaydedebilmek için bir dijital cihaz ve cep bilgisayarı kullanmışlardır. Bu veriler proje özelinde tanımlanmış ve bulanık kurallarla yönetilen akıllı bir bulanık çıkarım sistemine aktarılmıştır. [5].

2018 yılında Qui ve Lui tarafından yapılan çalışmada yürüyüş analizi sistemlerine yönelik olarak ivmeölçer ve manyetometrede meydana gelen konumsal ve manyetik hatalara karşılık bir kalibrasyon metodu tanımlanmıştır. Ayrıca bu sensörlerin füzyonuna yönelik PI kontrolör tabanlı bir filtre tasarımı anlatılmıştır. [6].

2019 yılında Bersamira vd. tarafından yapılan çalışmada, derinlik algılayabilen kamera ve IMU sensörlerinden veriler toplandıktan sonra bu verileri Bayes Düzenleyici Yapay Sinir Ağı (Bayesian Regularization Artificial Neural Network - BRANN) adlı derin öğrenme algoritması ile sentezleyerek yürüyüş analizi konusunda çok iyi olan fakat yüksek maliyetli ve erişim zorluğu olan Vicon Motion Capture (Vicon MoCap) sistemine alternatif bir sistem geliştirmişlerdir. [4].

2. Yürüyüş Analizi Sistemi Tasarımı

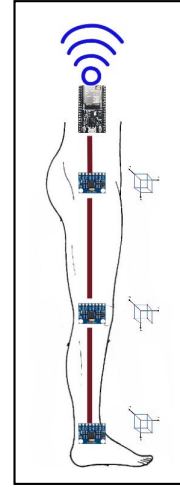
Whittle'a göre gövde altı ana eklem hareketleri Şekil 1'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. [7]. Kurulan yürüyüş analiz sisteminde bu hareketlerin tamamının çevrimiçi şekilde hem IMU sensörler hem de canlı kamera görüntüsü kullanılarak algılanabilmesi gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için kurulan sistemler sensör altyapısı, görüntü işleme sistemi, haberleşme altyapısı ve sonucu altyapısı başlıkları altında incelenebilir.



Şekil 1: Gövde altı ana eklem hareketleri. [7]

2.1. Sensör Altyapısı

Şekil 1'de gösterilen eklem hareketlerinin tam olarak algılanabilmesi için tek bacakta 3 adet, toplamda 6 adet olacak şekilde eklem noktalarına IMU sensörler yerleştirilmiş ve hem doğrusal ivme hem de açısal hız ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 2: Yerleştirilen IMU sensörleri ve mikrokontrolör.

Şekil 2'de bir bacağına yerleştirilen IMU sensörler ve bu sensörlerin haberleşmesinde kullanılan mikrokontrolör görülmektedir. Mikrokontrolör kablosuz ağ bağlantısı özelliğine sahip olacak şekilde seçilmiştir. Bu özelliği sayesinde kablosuz ağ üzerinden sensör veri haberleşmesini sağlayacaktır.

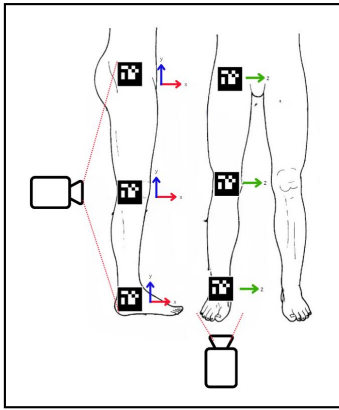
2.2. Görüntü İşleme Sistemi

Sistemde görüntü işleme kullanılmasının amacı IMU sensörlerine destek olacak şekilde her eklem noktasında 3 boyutlu ivme ölçümü yapılmasıdır. Bunun için işaretçi takibi yapabilecek bir görüntü işleme yapısı geliştirilmiştir. Görüntü işleme sistemi, görüntü işaretçisi ve görüntü işleme yazılımı alt başlıklarında incelenebilir.

2.2.1. Görüntü İşaretçisi

İşaretçi takibi ile bacak üzerinde bulunan her bir işaretçi için doğrusal ivme ölçümü yapacak olan bu sistem için ilk olarak uygun bir işaretçi seçilmesi gerekmektedir. İşaretçinin sahip olması gereken temel özellikler arasında özel bir kimliğe (ID) sahip olması, sabit ve bilinen gerçek dünya ölçüleri bulunması ve kolay algılanabilir olması yer almaktadır.

Bu özellikler dikkate alındığında kamera destekli - IMU tabanlı yürüyüş analizi uygulaması için en uygun işaretçinin "AruCo Marker" olduğuna karar verilmiştir. AruCo işaretçilerinin oluşturulma ve algılanma yöntemleri 2014 yılında Garrido-Jurado ve Muñoz-Salinas'ın yaptığı çalışmada açıklanmaktadır. [8]. AruCo işaretçilerinin her birinin ID'si farklıdır ve her işaretçilerin kenar uzunluklarının eşit ve sabit olduğu kabul edilmektedir. [9].



Şekil 3: AruCo işaretçisi yerleşimleri.

AruCo işaretçileri eklem noktalarına Şekil 3'te görüldüğü gibi yerleştirilmektedir. 3 boyutlu ölçüm yapılabilmesi adına her eklem noktasında 2 adet Aruco işaretçisi bulunmaktadır. Bu sayede 2 kamera ile her eklem için 3 boyutlu doğrusal ivme ölçümü yapılabilir. 2 bacakta bulunan 6 eklem noktasında toplam 12 adet AruCo işaretçisi kullanılmaktadır.

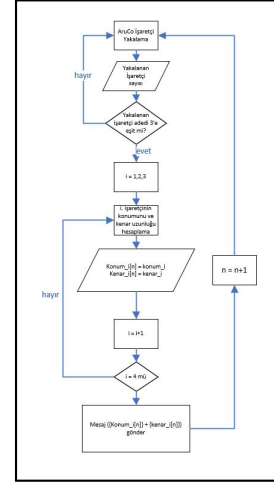
2.2.2. Görüntü İşleme Yazılımı

Görüntü işleme yazılımı OpenCV kütüphanesi kullanılarak 2 kamera ile çalışabilecek şekilde oluşturulmuştur. Temelde bulunan algoritma işaretçi konumlarını ve işaretçi kenar uzunluklarını hesaplayarak bunları doğrusal hız ve doğrusal ivme hesabında kullanmaktadır. Görüntü işleme algoritmasının akış diyagramı Şekil 4'te görüldüğü gibidir.

Konum ve kenar uzunluğu piksel cinsinden bulunduktan sonra dikey (Y) ve yatay (X) eksenleri için doğrusal hız ve doğrusal ivme hesabı Denklem 1 ve Denklem 2'de görüldüğü gibi olmaktadır.

$$\dot{X}[n] = \frac{x[n] - x[n-1]}{\tau} \times l \times \frac{1}{\rho[n]} \quad (1)$$

$$\ddot{X}[n] = \frac{\dot{x}[n] - \dot{x}[n-1]}{\tau} \quad (2)$$



Şekil 4: İşaretçi konumu ve kenar uzunluğu ölçümü algoritması.

Denklem 1'de görülen $x[n]$ piksel cinsinden anlık işaretçi merkezine konumuna, τ saniye cinsinden örnekleme zamanına, $\rho[n]$ piksel cinsinden anlık işaretçi kenar uzunluğuna ve l metre cinsinden gerçek işaretçi kenar uzunluğuna denk gelmektedir. Bu sayede m/s cinsinden hız hesabı yapılabilir. Benzer yöntem ile Denklem 2'de görüldüğü gibi ivme hesabı da yapılmaktadır.

2.3. Haberleşme ve Sunucu Altyapısı

Yürüyüş analiz sisteminde sensör ve görüntü işleme sistemlerinden verilerin toplanabilmesi, saklanabilmesi, işlenebilmesi ve izlenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kurulan haberleşme ve sunucu altyapısının aşağıdaki özellikleri sağlayabilmesi gerekmektedir.

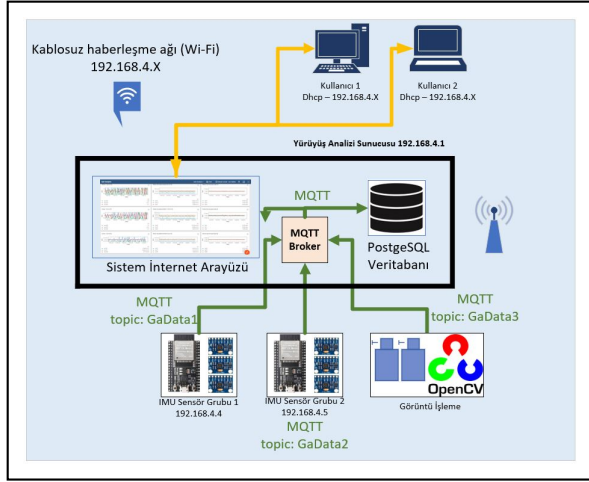
- Haberleşmeler sırasında veri kaybı ve haberleşme gecikmesi minimum seviyede olmalıdır.
- Toplanan veriler veri kaybı olmadan uzun süre saklanabilmelidir.
- Kullanıcıların verilere rahatça erişebilmeleri ve kullanıcılara kullanıcı dostu bir arayüz sunulması gerekmektedir.
- Sunucu düşük güç harcamalı, taşınabilir ve erişilebilir olmalıdır.

Sistemdeki sensörler ve görüntü işleme yazılımı birbirlerinden bağımsız, farklı konulara abone olarak sunucuya veri gönderebilmektedir. Veri kaybını minimuma indirmek için kablosuz haberleşme özelliğine sahip mikrokontrolörler ve görüntü işleme yazılımı MQTT haberleşme protokolünü kullanmaktadır. MQTT protokolündeki el sıkışma özelliği, veri kaybını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sebeplerle cihaz haberleşmelerinde en uygun protokol olarak MQTT belirlenmiştir.

MQTT haberleşmesinde hem kameradan hem de sensörlerden alınan veriler sunuculara JSON mesaj formatında gönderilmektedir. Kameradan elde edilen bir JSON mesajı için varlık değeri ayrıştırması yapılmış ve Tablo 1'de görülen değerler elde edilmiştir. Tablodan görüleceği üzere kameradan gönderilen veriler içerisinde işaretçi merkez noktası koordinatları ve ivme değerlerinin yanı sıra mesajın gönderildiği anın zaman damgası da bulunmaktadır.

Varlık	Değer
AccX13	7.44
AccX23	3.72
AccX33	1.86
AccY13	-9.81
AccY23	-9.81
AccY33	-4.23
Timestamp3	2023-07-19 14:45:57.699257
CenterX13	336
CenterY13	173
CenterX23	339
CenterY23	314
CenterX33	336
CenterY33	392

Tablo 1: Görüntü işlemeden elde edilen JSON mesajı



Şekil 5: Sistem haberleşme diyagramı.

Şekil 5'te sisteme ait haberleşme diyagramı görülmektedir. Diyagramdan görüleceği üzere MQTT haberleşmesi yürüyüş analizi sunucusu ile sensör grupları ve görüntü işleme yazılımı arasında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra sunucu içerisinde de MQTT haberleşmesi hem veritabanı için hem de arayüz için kullanılmaktadır. Yürüyüş analizi sunucusu kendi kablosuz haberleşme ağını oluşturmaktadır. Bu ağa erişen cihazların tamamı sunucunun IP adresi üzerinden hem arayüze hem de veritabanına erişim sağlayabilmektedir.

Sunucu mimarisinde, Yapakçı tarafından 2022 yılında yapılan endüstriyel nesnelere interneti sunucusu tasarımı örnek alınmıştır. [10]. Bu mimaride bulunan ThingsBoard, Node-Red ve Mosquitto yazılımlarından benzer şekilde faydalanılmakta olup, bu mimari üzerine sunucunun kendi kablosuz ağını oluşturması özelliği eklenmiştir. Bu kablosuz ağda yürüyüş analizi sunucusu bir bağlantı noktası olarak görev almakta, Dhcp ile kendisine bağlı cihazlara IP adresi ataması yapmakta ve kendi bulunduğu yerel ağ internetini de paylaşmaktadır. Bu sayede yürüyüş analizi sistemini sunucusuna erişen kullanıcılar sistem arayüzüne ve veritabanına erişebilmenin yanında internetten de kopmamaktadır.



Şekil 6: Sistem internet arayüzü.

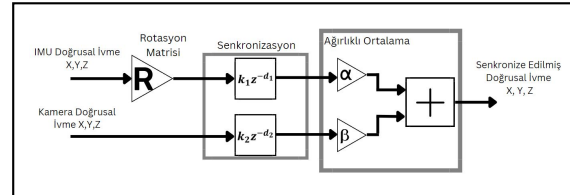
Şekil 6'da sunucu tarafından sağlanan kullanıcı arayüzü görülmektedir. Arayüz kullanıcılara kolay ve erişilebilir veri takibi yapma imkanı sunmaktadır. Kullanıcılar geçmiş verilere de aynı arayüz üzerinden erişebilmektedir. Bunun yanında kurulan haberleşme ve sunucu yapısı sayesinde veritabanında depolanan IMU ve görüntü işleme verilerinin bir araya getirilmesi amacıyla veri senkronizasyonu ve pozisyon kestirimi algoritması geliştirilmiştir.

3. Veri Senkronizasyonu ve Pozisyon Kestirimi

Sistemde kullanılan IMU üzerinde bulunan ivmeölçerden 3 boyutlu doğrusal ivme, jiroskoptan 3 boyutlu açılmal hız verileri ölçülebilmekte ve kamera üzerinden görüntü işleme ile 3 boyutlu doğrusal ivme verileri elde edilmektedir. Elde edilen tüm bu verilerin birlikte senkronize edilmesi ve uygun filtre yapılarından geçirilerek her eklem noktası için açılmal pozisyon kestirimi yapılması gerekmektedir. Yürüyüş analizi kestirilmiş açılmal pozisyon bilgisi üzerinden yapılacaktır.

Kamera üzerinden elde edilen doğrusal ivme verileri ile ivmeölçerden elde edilen doğrusal ivme verilerinin birlikte filtrelenmesi ve bu şekilde tek bir doğrusal ivme değeri elde edilmesi planlanmaktadır. Bu şekilde aşağıda belirtilen problemlerin giderilmesi hedeflenmektedir.

- Kablosuz haberleşme ve MQTT'den kaynaklanan gecikmelerin ve veri kayıplarının etkisinin azaltılması,
- IMU sensörün poz duruşundan ve yerçekimi ivmesinden kaynaklanan ortalama değer eğilimlerinin sıfırlanması.

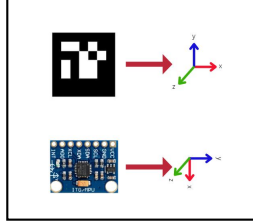


Şekil 7: Kamera ve IMU ortak doğrusal ivme hesaplama süreci.

Şekil 7'de kamera ve IMU doğrusal ivme ölçümlerinden ortak doğrusal ivme hesaplama süreci görülmektedir. Buna göre ilk olarak IMU verileri IMU sensörün poz duruşundan ve yerçekimi ivmesinden kaynaklanan ortalama değer eğilimlerinin sıfırlanması için bir rotasyon matrisi ile çarpılmaktadır. $Z - Y - X$ Euler açıları için rotasyon matrisi Denklem 3'te görüldüğü

gibi olmaktadır. Burada görülen α (sapma), β (eğim) ve γ (yuvanlanma) sırasıyla Z , Y ve X eksenleri etrafındaki dönüş açılarıdır. [11].

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$



Şekil 8: Kamera ve IMU yerleşim eksenleri.

IMU sensörleri ve Aruco işaretçileri vücutta sisteme uygun şekilde konumlandırıldığında eksenleri Şekil 8'de görüldüğü gibi olmaktadır. Bu durumda rotasyon matrisi sadece z eksenini etrafında saat yönünün tersinde 90 derece döndürecek şekilde hesaplanmaktadır.

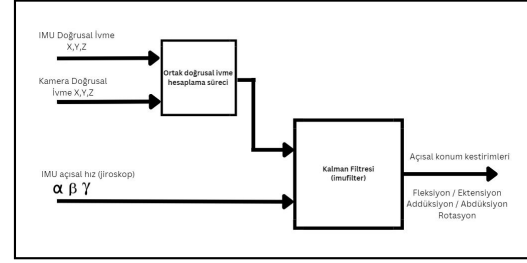
IMU verisine rotasyon matrisinin uygulanmasının ardından farklı örnekleme zamanlarında çalışan kamera ve sensör verilerinin senkronize edilmesi gerekmektedir. Kamera ve IMU doğrusal ivme ölçümlerinin senkronizasyonu 2009 yılında Bleser ve Stricker tarafından yapılan çalışmada, farklı örnekleme aralıklarında çalışan cihaz verilerinin mesaj buffer'ında tutulması ile çözülmüştür. [12]. Geliştirilen sistemde sensör grupları ve görüntü işleme yazılımı suncuya birbirlerinden bağımsız şekilde abone olduğundan buffer'da tutma seçeneği uygulanmamaktadır.

Sistemde kablosuz haberleşme ve MQTT protokolündeki el sıkışma özelliğinden kaynaklı belirsiz haberleşme gecikmeleri de bulunmaktadır. Lee'ye göre MQTT protokolü kullanılarak yapılan kablosuz haberleşmelerde sıfıncı servis kalitesi seviyesinde haberleşme gecikmeleri 0.4 saniye ile 0.7 saniye arasında değişebilmektedir. Bu gecikme miktarları birinci seviyede 0.5 ile 0.8 saniye arasında değişmekteyken ikinci seviyede ise 0.6 saniye ile 1 saniye arasında değişebilmektedir. [13]. Kurulan yürüyüş analizi sisteminde bu gecikme miktarları hem kamera hem de sensör gruplarının örnekleme periyotlarını kapsayabilmektedir. Ayrıca bu sistemlerdeki yüksek mesaj gönderim frekansı da haberleşmeyi yavaşlatabilmektedir.

Kurulan sistemdeki bu veri senkronizasyonu problemi gönderilen veriye zaman damgası eklenerek çözülmüştür. Tablo 1'den görülebileceği şekilde her mesajda bulunan zaman damgaları sayesinde kamera ve sensör verileri örnek ekseninde kaydırılarak senkronize edilebilmektedir. Bu senkronizasyon Şekil 7'de görülen senkronizasyon bloğuna karşılık gelmektedir. Her veri grubu için d_1 ve d_2 gecikme parametreleri kullanıcı tarafından ayarlanarak senkronizasyon gerçekleştirilmektedir.

Şekil 7'de kamera ve IMU ortak doğrusal ivme hesaplama sürecinde son olarak kamera ve IMU doğrusal ivme değerleri ağırlıklı ortalama yöntemi ile birleştirilmektedir. Burada bulunan α ve β parametreleri ayarlanarak kamera ve IMU yapıları-

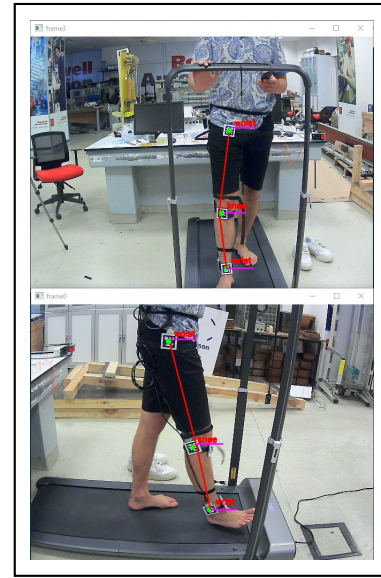
nın ortak doğrusal ivme değerlerine dahil olma miktarları ayarlanabilmektedir.



Şekil 9: Kalman filtresi ile kestirim süreci.

Şekil 9'da senkronizasyonun ardından ortak doğrusal ivme hesaplama süreci sonuçlarının, jiroskoptan elde edilen açısal hız sonuçları ile birlikte Kalman filtresine sokulması ve bunun sonucunda derece cinsinden fleksiyon, ekstansiyon, addüksiyon, addüksiyon ve rotasyon hareketlerinin kestirim değerlerinin elde edilmesi görülmektedir.

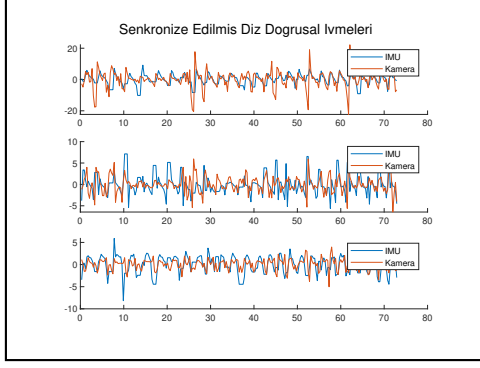
4. Uygulama



Şekil 10: Yürüyüş analizi sistemi uygulaması.

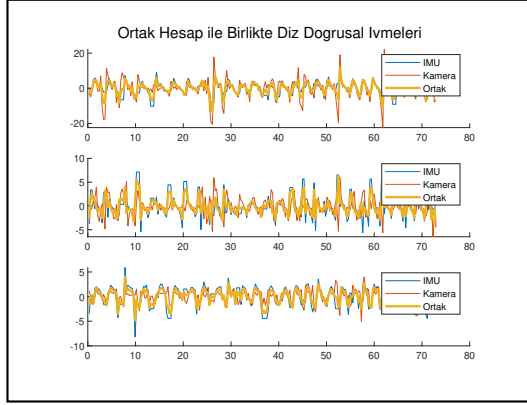
Şekil 10'da $1m/s$ hızında yürüyüş bandı üzerinde, tasarımı yapılan yürüyüş analizi sistemi ile yapılan ölçüm gözükmektedir. Bu ölçüm sürecinde yaklaşık 2 dakika boyunca sağ bacak sensör grubu ve sağ bacak kameralarından veri toplanmıştır. Eklem noktalarında algılanan Aruco işaretçileri görülmektedir. $d_1 = 2$ ve $d_2 = 0$ seçildiğinde IMU ve kameralardan toplanan veriler ile dizde bulunan eklem noktası için senkronize edilmiş doğrusal ivme değerleri Şekil 11'deki gibidir.

Senkronizasyon ile birlikte kamera ve IMU'dan elde edilen doğrusal ivme değerleri arasında fazların uyuştugu gözlemlenmektedir. Ancak elde edilen doğrusal ivmelerin genliklerinin bazı noktalarda farklı olduğu da ortadadır. Bu şekilde senkronize edilmiş doğrusal ivme değerleri üzerinden, $\alpha = 0.6$ ve



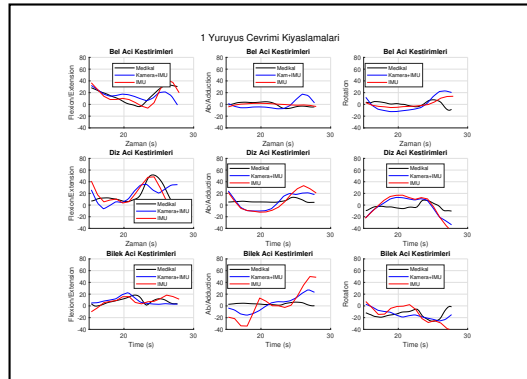
Şekil 11: $d_1 = 2$ ve $d_2 = 0$ için senkronize edilmiş doğrusal ivme değerleri.

$\beta = 0.4$ olarak seçildiğinde dizde bulunan eklem noktası için ağırlıklı ortalama ile edilen ivme değeri kıyaslaması Şekil 12'de görüldüğü gibidir.



Şekil 12: $\alpha = 0.6$ ve $\beta = 0.4$ için ivme değeri kıyaslaması.

Açısal hız verileri elde edilen ortak doğrusal ivme verileri ve kamera etkisi olmayan, ivmeölçer çıkışlı doğrusal ivme verileri ile Şekil 9'da görüldüğü gibi Kalman filtresine uygulanarak 1 yürüyüş çevrimi için sonuçlar elde edilmiştir. Aynı hasta için elde edilen kamera tabanlı medikal altın standart verisi ile birlikte bu sonuçlar Şekil 13'te görüldüğü gibidir.



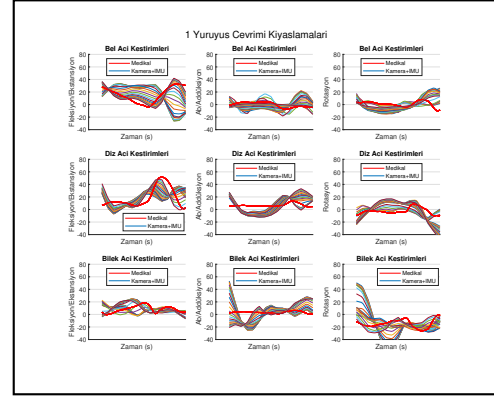
Şekil 13: 1 yürüyüş çevrimi için sonuçların kıyaslaması.

Şekil 13'te görülen yürüyüş çevrimi sonuçlarında "Kamera+IMU" olarak tanımlanan yürüyüş verisi $\alpha = 0.6$ ve $\beta = 0.4$ için elde edilmiştir. Bu şekilde incelendiğinde kamera etkisi olmadan elde edilen yürüyüş verisi her eklem noktasında kamera senkronizasyonu yapılan veriye göre medikal standarta daha yakın çıkmıştır. Kamera etkisinin daha iyi yorumlanabilmesi için farklı α ve β değerleri için de sonuçların incelenmesi gerekmektedir.

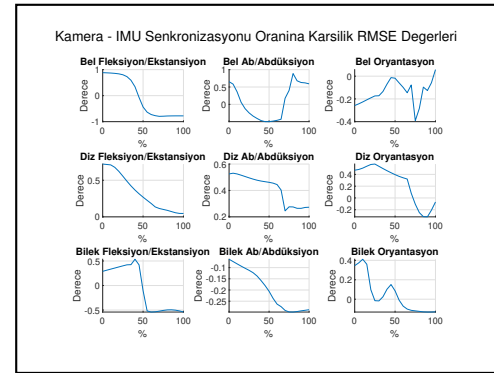
4.1. Kamera etkisinin incelenmesi

Kamera etkisinin incelenmesi amacıyla α ve β değerlerinin 0 ve 1 arasında farklı değerleri alması sağlanmıştır. α 0'dan 1'e götürülmüş ve $\beta = 1 - \alpha$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda 0 ile 1 arasındaki tüm değerler için 1 yürüyüş çevrimi sonuçları Şekil 14'te görüldüğü gibidir.

Bu değerlerin tamamı için medikal standart verisi ile farklı α ve β değerlerine göre elde edilmiş sonuçlar arasında korelasyon analizi yapılmıştır. Her bir eklem noktası için korelasyon analizi sonuçları Şekil 15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 14: 1 yürüyüş çevrimi için sonuçların kıyaslaması.



Şekil 15: Farklı α ve β değerleri için korelasyon analizi sonuçları.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada nesnelerin interneti haberleşmeleri ve sunucuları kullanılarak canlı görüntü işleme ve sensör anlamlandırma yazılımları ile gerçekleştirilen yürüyüş analizi sistemi

çalışması açıklanmıştır. Canlı görüntü işleme ve ivme hesaplama algoritmaları, veri haberleşmeleri diyagramları detaylı şekilde açıklanmış, sunucu yapısı ve kullanıcı arayüzü anlatılmıştır. Senkronizasyon ve kestirim yöntemleri de açıklanarak sonuçları paylaşılmıştır.

Çalışmada kurulan yürüyüş analizi sistemi aşağıdaki özellikleri sağladığı söylenebilir.

- görüntü işleme ile canlı doğrusal ivme ölçümü,
- kamera ölçümü sonuçlarının ivmeölçer verileri ile faz ve genlik olarak örtüşebilmesi,
- eklem noktalarında bulunan yürüyüş hareketlerinin hem sadece IMU verileri hem kamera-IMU senkronize verileri ile yakalanabilmesi,
- kamera senkronizasyonu sayesinde çeşitli eklem noktalarında bulunan hareket kestirimlerinin iyileştirilebilmesi.

Buna rağmen sistemde geliştirilmesi gereken noktalar ve çözülmesi gereken problemler bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- görüntü işleme hızının artırılmalı ve örnekleme periyotları kısaltılabilmelidir.
- kamera üzerinden rotasyonel hareketler de elde edilebilmelidir.
- senkronizasyon ve filtreleme algoritmaları geliştirilmelidir.
- sistem donanımı klinik standartlara uygun olacak şekilde geliştirilmelidir.

Geliştirilen yürüyüş analizi sisteminin eksik noktalarının geliştirilmesine ve klinik standartlara uygunluğunun artırılmasına devam edilecektir.

6. Kaynakça

- [1] Tao, W., Liu, T., Zheng, R., Feng, H. (2012). Gait analysis using wearable sensors. *Sensors*, 12(2), 2255-2283.
- [2] Hori, K., Mao, Y., Ono, Y., Ora, H., Hirobe, Y., Sawada, H., ... Miyake, Y. (2020). Inertial measurement unit-based estimation of foot trajectory for clinical gait analysis. *Frontiers in physiology*, 10, 1530.
- [3] Yeasin, M., Chaudhuri, S. (2000). Development of an automated image processing system for kinematic analysis of human gait. *Real-Time Imaging*, 6(1), 55-67.
- [4] Bersamira, J. N., De Chavez, R. J. A., Salgado, D. D. S., Sumilang, M. M. C., Valles, E. R., Roxas, E. A., dela Cruz, A. R. (2019, November). Human gait kinematic estimation based on joint data acquisition and analysis from imu and depth-sensing camera. In 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM) (pp. 1-6). IEEE.
- [5] Stefanović, F., Caltenco, H. (2009). A portable measurement system for the evaluation of human gait. *Journal of Automatic Control*, 19(1), 1-6.
- [6] Qiu, S., Liu, L., Zhao, H., Wang, Z., Jiang, Y. (2018). MEMS inertial sensors based gait analysis for rehabilitation assessment via multi-sensor fusion. *Micromachines*, 9(9), 442.
- [7] Whittle, M. W. (2014). *Gait analysis: an introduction*. Butterworth-Heinemann.
- [8] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280-2292.
- [9] Sarmadi, H., Muñoz-Salinas, R., Berbís, M. A., Medina-Carnicer, R. J. I. A. (2019). Simultaneous multi-view camera pose estimation and object tracking with squared planar markers. *IEEE Access*, 7, 22927-22940.
- [10] Yapakçı, B., Ayvaz, B., Ergenç, A. F. (2022). Endüstriyel Nesnelerin İnterneti Sunucusu Tasarımı, Geliştirilmesi ve Uygulanması Design, Development and Implementation of a New Industrial Internet of Things Server.
- [11] Lee, J. K., Park, E. J., Robinovitch, S. N. (2012). Estimation of attitude and external acceleration using inertial sensor measurement during various dynamic conditions. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 61(8), 2262-2273.
- [12] Bleser, G., Stricker, D. (2009). Advanced tracking through efficient image processing and visual-inertial sensor fusion. *Computers Graphics*, 33(1), 59-72.
- [13] Lee, S., Kim, H., Hong, D. K., Ju, H. (2013, January). Correlation analysis of MQTT loss and delay according to QoS level. In *The International Conference on Information Networking 2013 (ICOIN)* (pp. 714-717). IEEE.