



Sensör Füzyonu Algoritmaları ile Açısal Konum Referans Sistemi Tasarımı

Oben ÖZKAN*, Aydın YEŞİLDİREK

Yıldız Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Açısal Referans Sistemi
Ataletsel Seyrüsefer
Ataletsel Sensörler
Sensör Füzyonu
Konum Tahmini

Özet

Bu makalede, açısal konum referans sistemi tasarımı verilmiştir. Düşük maliyetli MEMS tabanlı atalet sensörlerinin verileri, doğru bir AHRS sistemi elde etmek için sıfır hız algılama, sezgisel sapma giderme ve bütünlüycü filtreleme ile kaynaştırılır. Harici kaynaklara ihtiyaç duymayan böyle bir navigasyon sisteminin, iç mekan navigasyon sistemleri dahil olmak üzere bazı uygulamalarda önemli avantajları vardır. Bu uygulamalardan biri yaya izleme sistemleridir. Bu sistemlerde, yürüyüşün doğasından elde edilen ivme değerleri, hız ve konum tahminlerini almak için entegre edilmiştir. Düşük maliyetli MEMS tabanlı IMU'lar gürültüye karşı çok hassastır, bir yardım mekanizması olmazsa büyük ölçüde sürüklenirler. Makalede tasarlanan açısal konum referans sistemi yürüyen bir kişinin ayağına monte edildi, iç mekan navigasyon sistemi incelendi ve önerilen filtre algoritmalarıyla sensörlerin neden olduğu hatalar en aza indirilen umut verici sonuçlar verdi. Çalışmanın sonunda, filtre doğrulandı ve sensörlerin neden olduğu uzaysal kaymanın ortadan kaldırıldığı gözlemlendi.

Attitude and Heading Reference System Design with Sensor Fusion Algorithms

Keywords:

AHRS
Inertial Navigation
Inertial Sensors
Sensor Fusion
Dead Reckoning

Abstract

In this article, an angular position reference system design is given. Low-cost MEMS based inertial sensors data is fused by zero velocity sensing, heuristic drift elimination and complementary filtering to obtain an accurate AHRS system. Such a navigation system not needing external sources has significant advantages in some application including indoor navigation systems. One of such applications is the pedestrian tracking systems. In these systems, the acceleration values derived from the nature of the walk are integrated to get the speed and position estimates. Low-cost MEMS based IMU's are very sensitive to noise and they drift drastically without an aiding mechanism. The angular position reference system designed in the article was mounted on the foot of a walking person, the indoor navigation system was studied and the errors caused by the sensors were minimized by the proposed filter algorithms showed promising results. In the end of the study, the filter was verified and it was observed that the spatial shift caused by the sensors has been eliminated.

1. GİRİŞ

Açısal konum referans sistemleri havacılık ve uzay uygulamalarında sıkça kullanılan AHRS olarak bilinen sistemlerdir, terim attitude and heading reference system'in baş harflerinin kısaltmasından gelir ve bu makalede açısal konum referans sistemi kısaltması olarak AHRS kullanılacaktır. AHRS üç eksenli yönelim ve açısal konum bilgisi veren sistemlerdir. AHRS uygulaması herhangi bir dış kaynağa ihtiyaç kalmadan ataletsel kuvvetleri ölçen ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinin kalman filtresi, bütünlüycü (complementary) filtre veya herhangi bir sensör füzyonu algoritması ile birleştirilerek sensör ekseninin dünya eksenine göre açısal konumunun tahmin edilmesi uygulamasına dayanır. Ataletsel sensörler IMU olarak bilinen sensör paketleri halinde piyasada bulunurlar.

Bir iç ortam veya konumlandırma sistemi, kapalı bir ortamda veya konum bilgilerine gerçek zamanlı erişim için bir sistemdir [1]. Yaygın olarak kullanılan Global Konumlandırma Sistemi (GPS) dış mekanda çok hassas konumlandırma bilgileri elde edebilir. Bununla birlikte, kapalı ortamlarda, uydu sinyali bina tarafından kolayca bozulduğundan GPS doğru veya konumlandırma bilgisi sağlayamaz [2]. Günümüzde, iç ortam konumlandırma teknolojisi, kablosuz ve ataletsel konumlandırma teknolojisi içinde sınıflandırılmaktadır. Kablosuz konumlandırma teknikleri kızılötesi [3], ultrasonik [4], Bluetooth [5], Wi-Fi [6], ZigBee [7], Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) [8], Ultra Geniş Bant (UWB) [9], görsel [10] ve kablosuz ağ konumlandırma teknolojisi [11] gibi teknolojilerle gerçekleştirilir. Bu konumlandırma teknolojileri, görüş hattı dışında kalma (Non-Line Of Sight) faktörleri ve çok yönlü faktörler gibi dış faktörlerden etkilenir [12]. Bu nedenle, kablosuz konumlandırmada doğruluk yeterince yüksek değildir ve kararlılık zayıftır. Ataletsel konumlandırma teknolojisi [13], bir ivmeölçer ve jiroskopa dayalı olarak veya hızı, konumu ve açısal tutumu elde eder. Ataletsel navigasyon hataları dış ortamdan etkilenmez, fakat ataletsel navigasyon sistemi uzun bir süre boyunca kümülatif hatalara eğilimlidir. Fiyat, yapı, hacim ve ağırlık bakımından avantajları olan Mikroelektromekanik-Ataletsel Ölçüm Birimlerine (MEMS-IMU) dayalı ataletsel seyir sistemleri son yıllarda büyük ilgi görmüştür [14].

İç ortam navigasyon sistemlerinde dış kaynak düzeltmesi kullanılmadığı için başka doğal etkiler kullanılır. Bu makalenin konusu olan veya takip sistemlerinde genellikle sıfır hız algılama (zero velocity update) yöntemi kullanılmaktadır. Sıfır hız algılama yönteminde IMU sensörlerinden kaynaklanan hataları gidermek için yürümenin doğasından gelen bir takım doğal etkileri kullanan algoritma adım atma sırasında oluşan belirli ivme modellerini takip ederek yürüyen kişinin ayağına bağlı sensörlerin durağan ve hareketli anlarını takip etmektedir. Algoritma durağan dönemlerde yani ayak yerde sabitken hız verisini sıfıra çekmekte, kişi adım atmaya başladığında yani ayak hareketliken hız verisini sensörlerden gelen bilgi ile hesaplamaktadır böylece sadece hareketli anlarda ölçüm yapan algoritma sensör hatalarından en az şekilde etkilenmeyi amaçlar. Literatürde genelde çeşitli sıfır hız algılama yöntemlerini tek başına kullanmak yeterli görülse de bu yöntemin yetersiz kaldığı uygulamalarda Borenstein ve Lauro Ojeda'nın çalışmasında [20] olduğu gibi ilave filtreler kullanılmaktadır.

AHRS tasarımı için çeşitli füzyon teknikleri üzerinde çalışılmıştır. Leccadito yüksek lisans tezinde bir ataletsel ölçüm sisteminin gereksinimi olan AHRS sistemi için ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre sensörlerinin hata modellerini çıkarmış ve bu gürültülerin etkisini en aza indirmek için kalman filtresi üzerinde çalışmıştır [15]. Lai çalışmasında AHRS için bir bütünlüleyici filtre kullanmıştır IMU sensörlerinin hata modellerinin parametrelerini bulmak için 3 eksende 360 derece dönebilen bir platform oluşturmuş ve bir sensör kalibrasyon sistemi inşa etmiştir. Oluşturduğu bu sistemde doğru açı değerleri ile filtre değerlerini karşılaştırarak sensörlerin hata modelini bulma çalışmasında bulunmuştur [16]. Mahony R. Makalesinde AHRS sensör füzyonu algoritmasında tahmin kısmı için fikri kinematik denklemin girişini düzeltmektedir. Jiroskop kaymasından kaynaklanan hatayı düzeltmek için bir PI kontrolcüden faydalanmıştır. Mahony ivmeölçer verilerinden faydalanmış manyetometreyi sistemine dahil etmiştir jiroskop ve ivmeölçer verilerini yeryüzü ile karşılaştırmış ve dünya çerçevesine göre sistemin açısal konumunu bulmaya çalışmıştır [17]. Navigasyon sistemlerindeki ataletsel ve GPS/INS destekli referans çerçevelerin hesabı, ECEF koordinat sistemleri, rotasyon matrislerinin hesapları AHRS ve ataletsel navigasyon sistemlerinin kinematik eşitlikleri Farrel'in kitabında işlenmiştir [18]. Madgwick açısal konum bilgisi için quaternion yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımda açısal konum tahminini iyileştiren füzyon algoritmasını minimizasyon problemi olarak formülize ederek bu problemi gradyan iniş algoritması ile çözmüştür bu yaklaşım Extended Kalman Filtresinin (EKF) tahmin doğruluğuna yakın sonuçlar üretmesinin yanında düşük işlem gücü ile bile çalışabilmekte böylece 8 bitlik mikrodenetleyicilerde bile çalışabilecek algoritma ortaya çıkmaktadır [19]. İç ortam navigasyon sistemi için Borenstein ve Lauro Ojeda tarafından Heuristic Drift Elimination (HDE) adı verilen bir yöntem ile sürüklenme eliminasyonu için sezgisel bir yöntem önermişlerdir [20]. S.K. Park ve Y.S Suh çalışmasında Hidden Markov Model ile sadece tek bir jiroskop verisi kullanarak yeni bir sıfır hız algılama algoritması üzerinde çalışmış ve durağan dönemleri daha güvenilir şekilde tespit etmişlerdir [22]. Foxlin, E ayakkabıya monteli takip sistemi çalışmasında sıfır hız algılama algoritmasının hız hatalarını EKF ile düzelterek daha doğru pozisyon tahmin verileri elde etmiştir [23].

Bu makaledeki çalışma sıfır hız algılama yöntemine ilave yeni bir filtre geliştirerek daha doğru konum bilgisi sunan veya navigasyon sisteminin geliştirilmesi üzerinedir. Sistemimizi literatürden ayıran çalışma, algoritmamızın yürüyen kişinin baskın yönünü bulmaya ve sürüklenmeleri baskın yöne göre elimine etmeye yönelik olmasıdır. Sistemimizde IMU sensörleri yürüyen kişinin ayakkabısına bağlanmıştır, ivmeölçer verilerinden önce sıfır hız algılama yöntemi ile pozisyon bilgisi alınmakta daha sonra makalenin çalışma konusu olan Sezgisel Kayma Eliminasyonu filtresi ile pozisyon bilgisi bir kez daha düzeltilmekte ve nihai pozisyon bilgisi kaydedilmektedir. Çalışmanın sonunda Sezgisel Kayma Eliminasyonu filtresi gerçekleştirilmiş ve yalnızca sıfır hız algılama filtresi kullanan navigasyon sistemlerine göre daha doğru pozisyon bilgisi tahmin ettiği doğrulanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

Açısal konum referans tahmin uygulamaları bağlamında genellikle Euler açıları (sapma(yaw), yunuslama(pitch) ve yuvarlanma(roll)) gösterimleri kullanılır. Ancak, gimbal kilidi adı verilen bir fenomen nedeniyle pitch 90° 'ye ulaştığında açısal hesaplamalarda sorunlar ortaya çıkar. Bu problemten kaçınmak için kuaterniyon bazlı bir çözüm tercih edilir. Kuaterniyon ve euler gösterimi arasında kolayca dönüşüm yapılabilir. Uygulamada referans eksenini bir diğer önemli konudur. Sıklıkla kullanılan dört referans sistemi aşağıda açıklanmıştır.

Ataletsel Eksen Takımı: Dönmediği ve ivmelenmediği varsayılan eksen takımıdır z eksenini dünya dönüş eksenini üzerindedir x ve y eksenleri ekvator düzleminindedir.

Dünya Eksen Takımı: Merkezi dünya eksenini ile çakışık z eksenini dünya dönüş eksenini üzerinde olan ve dünya ile birlikte dönen x eksenini ekvator çizgisi ile greenwich meridyeninin çakıştığı yerde olan eksen takımıdır.

Seyrüsefer Eksen Takımı: Merkezi seyir sistemi üzerinde olan ve eksenelini dünya merkezine doğru seçilen eksen takımıdır.

Gövde Eksen Takımı: Merkezi seyir sistemi ile çakışık olan eksen takımıdır örneğin uçağın gövde kısmı z eksenini ile çakışık y eksenini kanatlara doğru x eksenini ise yukarıya doğru düşünülebilir.

2.1. Sensör Hata Modellemesi

Genel olarak, sensörler belirli bir fiziksel miktarını ölçer ve etkinin kuvvetine ve yönüne bağlı bir değer üretir. Çıktı değeri genellikle ilgilenilen miktar ile aynı alanda bulunan bir değer elde etmek için işlenmesi gereken bir elektrik voltajıdır. Hata modellemede ön işleme genellikle önyargı çıkarma ve ölçeklendirme işlemleri ile yapılır. Önyargı sensörün doğrudan çıkış vermesini engelleyen eşik değeridir.

2.1.1. İvmeölçer

İdeal olarak, ivmeölçer yalnızca ivmeyi ölçer. Ancak, pratik olarak, bu kadar basit değildir. İdeal bir ivmeölçer, anlık doğrusal ivmelenmenin ve yerçekimsel ivmelenme alanının yanı sıra temsil edilebilecek bazı ilave önyargı ve gürültüyü de ölçer. İvmeölçer (1)'deki gibi modellenebilir.

$$a = \dot{v} - g + b_a + n_a \quad (1)$$

Burada, \dot{v} , g , b_a ve n_a sırasıyla bir anlık doğrusal hızlanma, yerçekimi hızlanması, ivmeölçer önyargısı ve gürültüyü temsil eder.

2.1.2. Jiroskop

Bir jiroskop açısal hızı ölçer; dikey olarak yerleştirilmiş üç jiroskop, x, y, z yönlerinde açısal hızı ölçer. Bununla birlikte, tüm ölçümler gibi, jiroskop ölçümü de gürültü ve önyargı içerir. Dolayısıyla bir jiroskop model olarak (2)'deki gibi modellenebilir.

$$w^b = w + b + n \quad (2)$$

Burada w radyan cinsinden açısal hız değeri b , jiroskop önyargısıdır ve n , ise sensör gürültüsüdür.

2.2. Bütünleyici (Complementary) Filtre

Bütünleyici filtre, oryantasyon tahmini için ivmeölçer ve jiroskop verilerini birleştirir. İvmeölçer sensörleri ani darbeler ve ivmelenme değerlerine karşı hassastır ancak önyargı değerleri düşüktür bu sebepten dolayı kısa ölçüm aralıklarında fazlaca hata yaparken uzun süreli ölçümlerde stabildir. Jiroskop sensörleri ise önyargı değerleri yüksektir jiroskop çıkışından açı değeri almak için sensör çıkışının zamana göre integrali alınır bu da uzun süreli ölçümlerde büyük kaymalara neden olur. Bütünleyici filtre birleştirme uygulaması basitçe ivmeölçer çıkışına alçak geçiren filtre jiroskop çıkışına ise yüksek geçiren filtre uygulayıp verileri toplama şeklinde tarif edilebilir.

Kuaterniyon tabanlı bir bütünleyici filtre için bir çok çalışma yapılmıştır en son çalışmalardan birinde Madgwick gradyan iniş yöntemini kullanmıştır [19] Mahony ise Explicit Complementary Filter (ECF) yöntemini kullanmıştır iki uygulamanın algoritması da Kalman filtresi tabanlı uygulamalara göre hesaplama yükü daha azdır bu sebeple uygun maliyetli bir seyir sistemi için AHRs kısmında tercih sebebi olabilir bu makalede ECF yöntemi kullanılmıştır. ECF için ilk adım atalet yönü olan \bar{v} ve açısal hız olan \bar{w}^b değerlerini ölçmektir.

ECF algoritması için aşağıdaki adımlar takip edilmektedir.

1. Algoritma, kuaterniyona başlangıç değeri, birim kuaterniyon olan $[1, 0, 0, 0]$ atanmasıyla başlar, yani ilk anda hiç dönme yoktur. Örneklem frekansı, oransal kazanç K_p ve integral kazanç K_i de tanımlanır.
2. Algoritmaya ivmeölçer ve jiroskop verisi seti beslenir ve ivmeölçer verisi normalleştirilir.
3. Mevcut kuaterniyon kullanılarak yerçekimi yönü \hat{v} tahmin edilir

$$\hat{v} = \begin{bmatrix} 2(\hat{q}_2\hat{q}_4 + \hat{q}_1\hat{q}_3) \\ 2(\hat{q}_3\hat{q}_4 + \hat{q}_1\hat{q}_2) \\ \hat{q}_1^2 - \hat{q}_2^2 - \hat{q}_3^2 + \hat{q}_4^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. Normalize edilmiş ivmeölçer verisi ve tahmini yerçekimi yönü çarpılarak hata e ile hesaplanır

$$e = \bar{v} x \hat{v} \quad (4)$$

5. Sonraki döngüde PI kontrolcü kullanılarak jiroskop verilerindeki önyargı hatasını azaltmak amaçlanır.

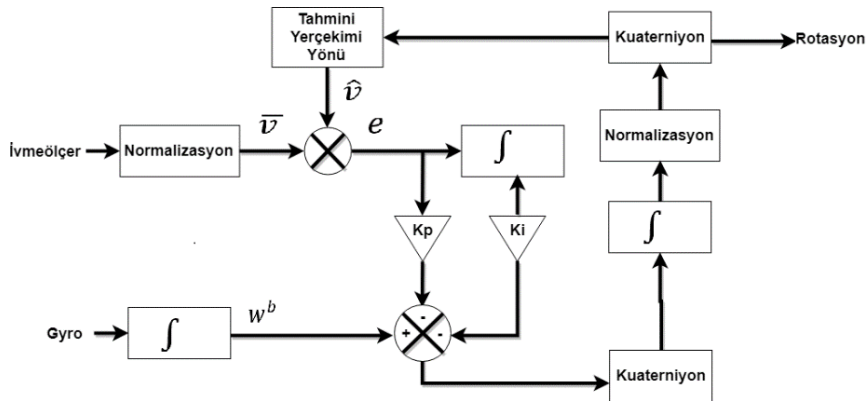
$$\bar{w}^b = w^b + K_p e + K_i \int e \quad (5)$$

6. (6) daki işlem ile kuaterniyon değişim hızı hesaplanır burada \hat{q} t-1 zamanında tahmini normalize kuaterniyondur, ve $p(\bar{w}^b) = (0, \bar{w}^b) = (0, w_x^{-b}, w_y^{-b}, w_z^{-b})$ dir.

$$\dot{\hat{q}} = \frac{1}{2} \hat{q} \otimes p(\bar{w}^b) \quad (6)$$

7. Son adımda kuaterniyonun son yinelemedeki türevi hesaplanır, değişim hızı bütünleştirilir ve tahmin edilen kuaterniyon, yani rotasyon bulunur ve bu yinelemenin kuaterniyonu normalize edilir. Ardından 2. işlem adımına dönerek işlemler tekrarlanır.

Burada \bar{w}^b gövde eksen takımında jiroskop çıkışından alınan açısal hız değeridir. K_p ve K_i ayarlanabilir türev ve integral kazançları, \bar{v} ivmeölçer verilerine göre ölçülen atalet yönü, \hat{v} tahmini atalet yönü e ikisi arasındaki hata değeri \hat{q} , kuaterniyon ile ifade edilen tahmini yönelimdir ve \otimes , bir kuaterniyon çarpım operatörüdür. Kuaterniyon işlemleri ile ilgili detaylı bilgi [21] kaynağından alınabilir. Şekil 1'de ECF blok diyagramı gösterilmiştir.



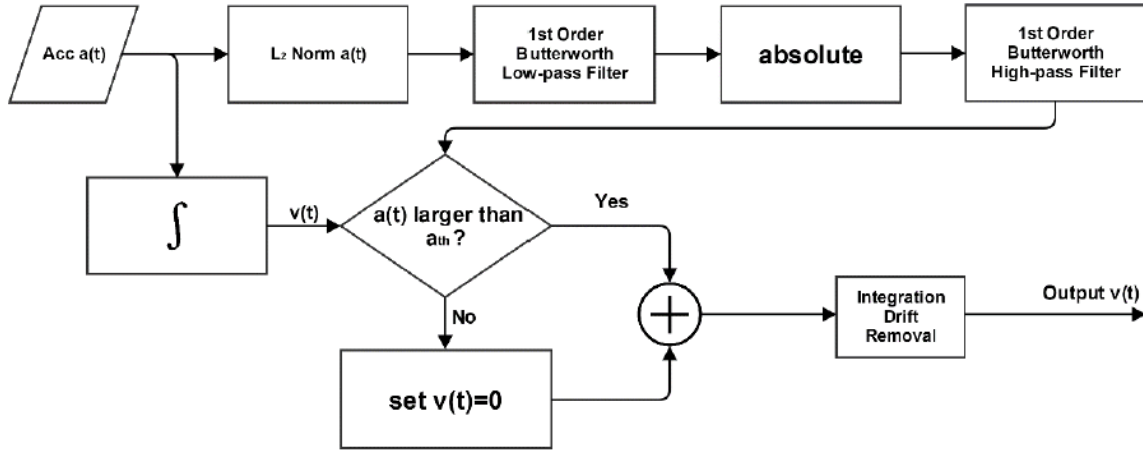
Şekil 1. ECF Blok Diyagramı

2.3. İç Ortam Seyrüsefer Uygulaması

Navigasyon uygulamalarında, Pedestrian Dead Reckoning (PDR), önceden belirlenmiş veya sabit bir pozisyon kullanarak yayaların yörüngesini ve pozisyonunu tahmin etme ve zaman içinde bilinen veya tahmin edilen hızlara veya ivmelere dayanarak bu pozisyonu ilerletme sürecidir. Önceki bölümde, ECF kullanarak bir rotasyon tahmini elde etmenin mümkün olduğunu gösterilmiştir. Bu makalenin ilgili hedefi, konum tahminini elde etmektir.

2.3.1. Sıfır Hız Algılama (SHA)

Sıfır hız algılama, PDR sisteminin hayati bir parçadır. Atalet sensörleri sürüklenmeye maruz kaldıklarından, uzun süreli konum bilgisi tespit etmede büyük hatalar meydana getirmektedirler bu sebeple yürüyüşün doğasından kaynaklanan durma, yere basma ve ayak kaldırma gibi anları tespit ederek yalnızca ataletsel sensör çıkışları bağlı olan ayak hareket halindeyken entegrasyona uğramalıdır, durağanlık periyotları tespit edilmezse, ivmelenme hataları sert sürüklenmeye yol açar bu durum da hıza ve konuma entegre edilmiş olur ve konum hataları meydana gelir. Sıfır hız, hızı sıfırlamak için gereken bilgileri sağlar. Tipik bir sıfır hız algılama algoritmasının işlem adımları şekil 2'deki gibidir.

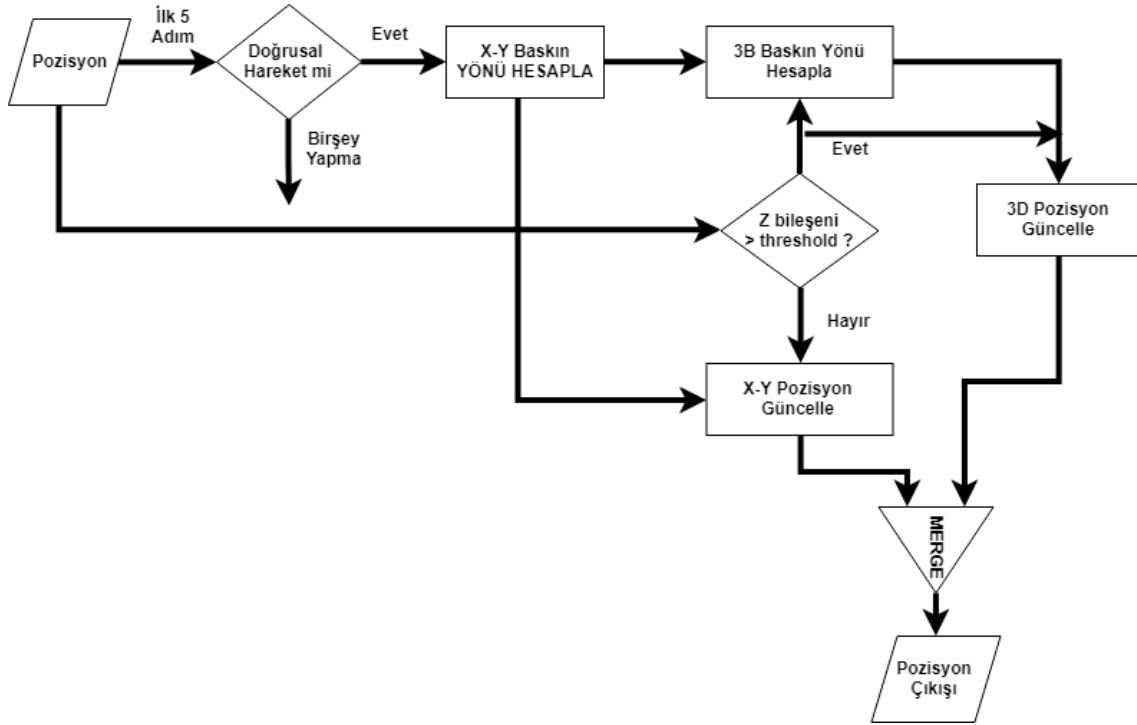


Şekil 2. Sıfır Hız Algılama Blok Diyagramı

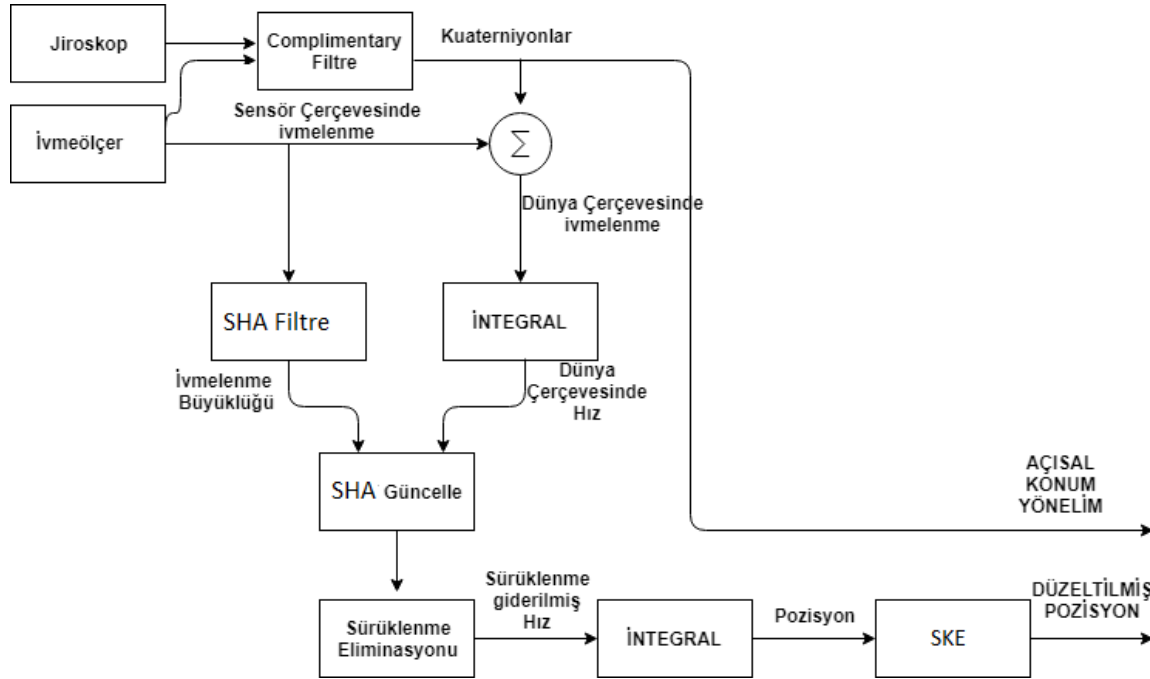
Sıfır Hız Algılama algoritması tek başına doğrusal bir rotada başarılı işler çıkarabilir ancak şekil 7'de görüldüğü üzere merdiven gibi görece daha karmaşık bir rotadan sonra Y ekseninde gözle görülür bir sürüklenmeye maruz kalmıştır. İşte bu noktada tezin çalışma konusu olan sezgisel kayma eliminasyonu algoritması devreye girecektir.

2.3.2. Sezgisel Kayma Eliminasyonu (SKE)

Sürüklenmenin ortadan kaldırılmasının başlangıcında, SKE verinin ilk beş adımını sayar ve beş adımın düz bir çizgi halinde olup olmadığına karar verir. Düşük maliyetli bir MEMS IMU kullandığımız için jiroskop gerçekten hızlı sürüklenmektedir. Bu yüzden daha fazla adım saymak jiroskop hatalarını yanında getirecektir. Yayanın düz yürümeye karar vermek için, önce adım vektörlerini konum verilerinden hesaplarız. Sonra ilk beş adım sayılır ve bitişik iki adım arasındaki açı hesaplanır. Tüm açıların mutlaklığı bir eşikten azsa, yaya düz yürüyor demektir değilse, yaya düz bir çizgide yürümüyordur. Yaya düz yürümüyorsa, SKE hiçbir şey yapmaz. Yaya düz bir çizgide yürüyorsa, SKE baskın yön hesaplaması olan bir sonraki adıma geçer. Baskın yön hesaplaması iki adımdan oluşur: ilk adım, hakim yönlerin X-Y düzlemindeki çıkıntılarını hesaplamaktır. İkinci adım, 3B alanda baskın yönler oluşturmaktır. Baskın yön projeksiyonu yukarıda belirtilen beş adımdan hesaplanır. Beş kademeli vektörler 6 konumdan hesaplanır.



Şekil 3. SKE Blok Diyagramı

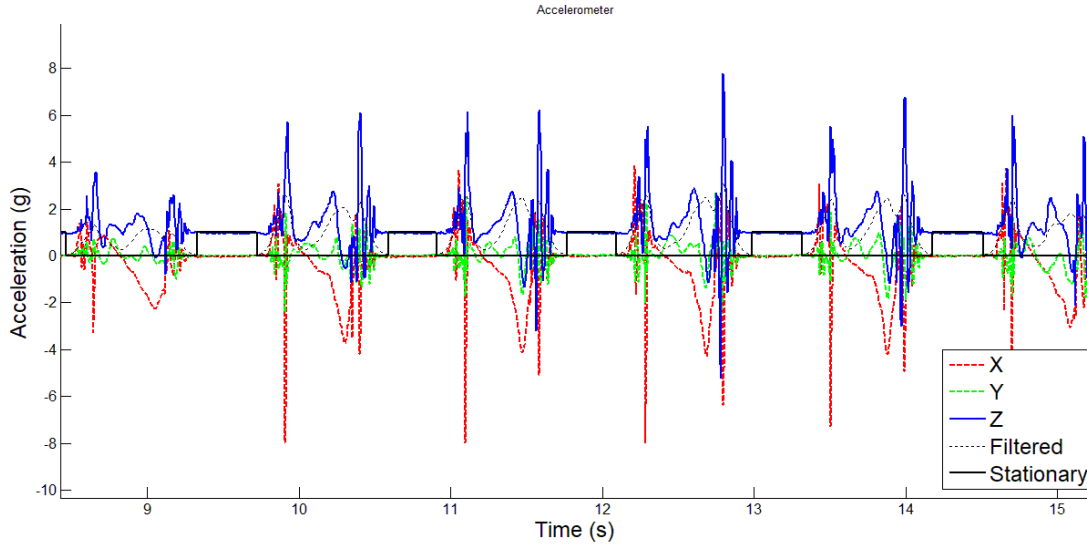


Şekil 4. SHA ve SKE Kullanılmış Pozisyon Takip Blok Diyagramı

3. BULGULAR

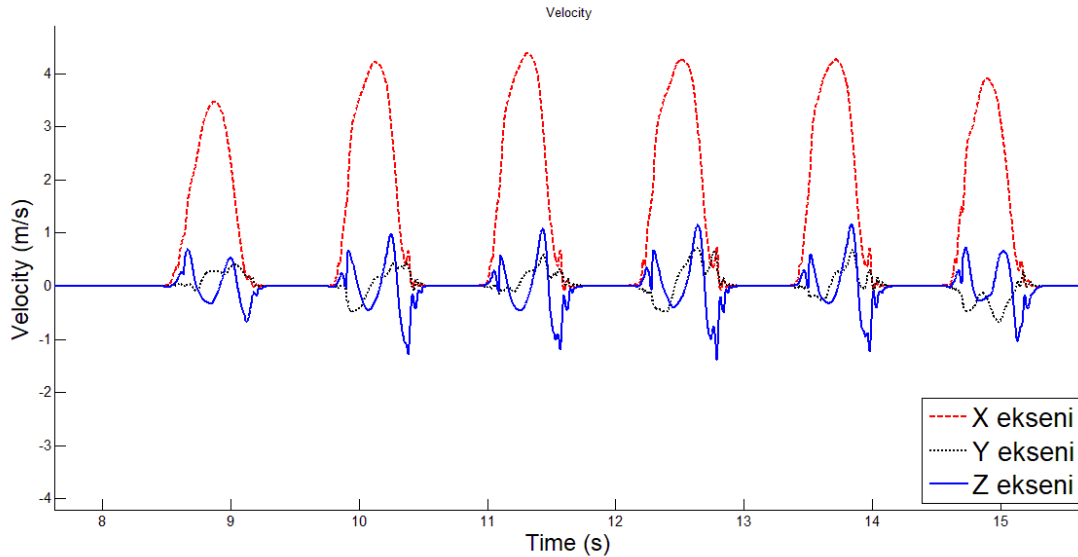
Uygulamada AHRS sensör birimi yürüyen kişinin ayağına sabitlenmiş ve bir koridorda yürürken sensörlerin ham verileri kaydedilmiştir. Hesaplama adımları MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir. Yürüyen kişi bir koridor ile merdivene ulaşmış üst kata çıktıktan sonra alt kattaki koridora paralel bir şekilde 26 metre daha yürümüştür. Şekil 5'deki grafikte AHRS biriminin ivmeölçer verileri alçak geçiren filtreden geçirilmiştir ve X,Y,Z eksenlerine ait ivme değerleri kaydedilmiştir. Z ve X eksenlerinde adım atma sırasında meydana gelen ani ivmelenme dönemleri ve yürürken ayağın yerde kaldığı süre boyunca gözlemlenen ivmesiz dönemler görülmektedir. Sıfır hız algılama algoritmasının görevi ivme değerlerinden bu dönemleri ayırt etmektir böylece durağan dönemlerde hız sıfıra eşitlenecek ve hareketli dönemlerde ise ivme değerleri iki kez integrasyon işlemine tabi tutularak konum

bilgisi sağlanacaktır kısa aralıklarla konum bilgisi elde etmenin avantajı integrasyon işleminin sensör hatalarını minimum seviyede işleme dahil etmesidir.



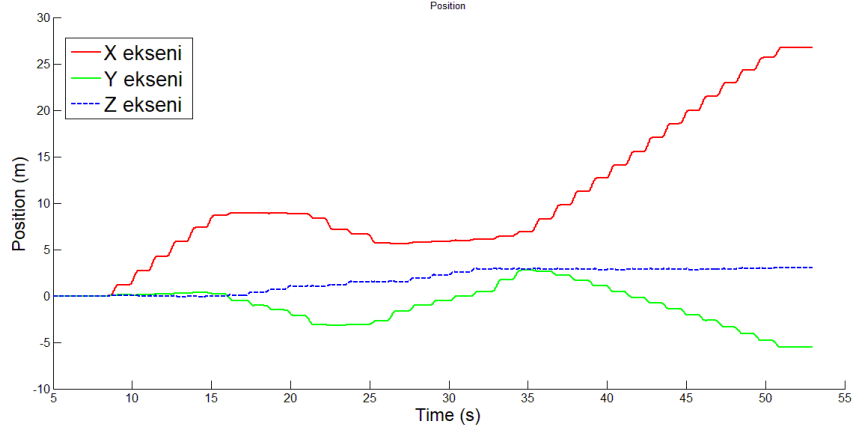
Şekil 5. Filtrelenmiş ivme büyüklüğü ve durağan dönemler.

Sıfır hız algılama ile hız tahmini şekil 6'da gösterilmektedir. Grafik alçak geçiren filtreden geçirilmiş ivmeölçer verilerinin integrasyonundan hız sürüklenmesinin çıkarılması ile oluşturulmuştur. Grafığın [13]'de kullanılan sıfır hız algılama algoritmasına göre durağan dönemleri daha iyi ayırt ettiğini görebiliriz. 3 ekseninde hız, sensörün bağlı bulunduğu ayak yere sabitken sıfıra eşitlenir, ivmelenme eşik değeri aşınca ayağın adım attığı algılanır ve ivme değerleri ayırık zamanda integral alıcısı ile toplanarak 3 ekseninde hız değerleri elde edilir. Hız değerlerinin X ekseninde daha fazla görülmesinin nedeni hareket doğrultusunun X ekseninde olmasıdır. Z eksenindeki hız değeri adım atarken ayağın yerden kalkma anı ve ayağın yere basma anı arasında oluşan hız değeridir Y eksenindeki hız değeri adım sırasında ayağın yalpalaması ve yana kayması gibi etkilerden oluşan hızlanma değeridir.

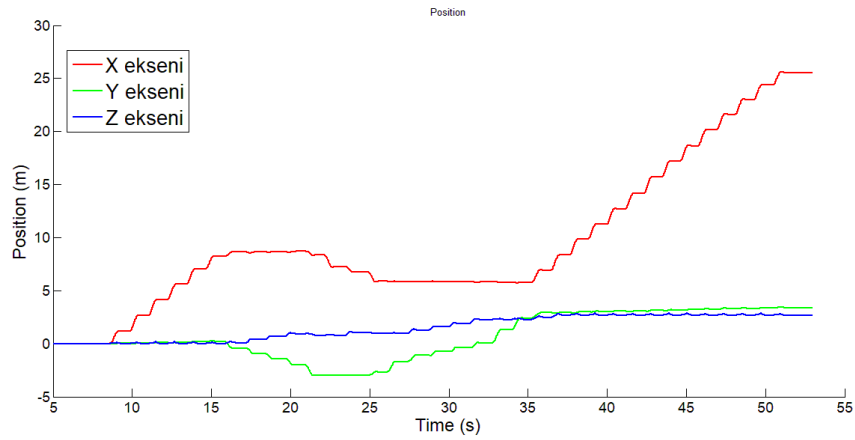


Şekil 6. SHA ile hız tahmini

Şekil 7, X ekseninde doğrultusunda 26 metrelik mesafenin sıfır hız algılama algoritması kullanarak elde edilen pozisyon tahminini göstermektedir. Sensör integrasyonu sırasında oluşan sürüklenmenin etkilerini Y ekseninde boyunca görebiliriz bu ekseninde meydana gelen sürüklenme X eksenindeki hareketin Y eksenine olan etkisi ile açıklanabilir. Merdivenden çıktıktan sonra Y ekseninde sürüklenme yaklaşık 8 metredir. İdealde Y ekseninde 3 metre civarında hareket olmuştur. X ekseninde boyunca sapma yaklaşık 1.5 metredir bu hareket doğrultusudur ve sapma %5.7 civarındadır. Ayrıca eğrilerdeki dalgalanmaları görebiliriz ki bunların her biri yaya tarafından atılan adımı temsil eder. Z ekseninde 3 metre yükselmiştir bu da kat yüksekliği ile uyumaktadır.

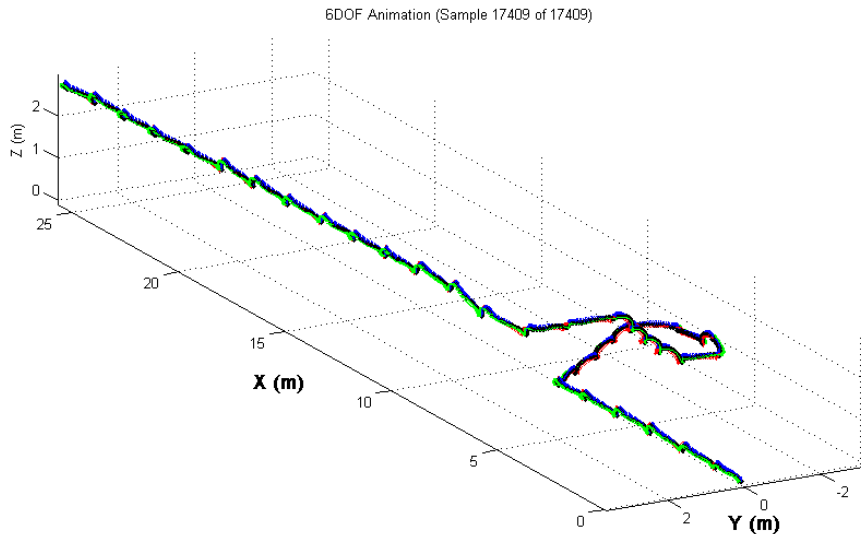


Şekil 7. SHA ile pozisyon tahmini



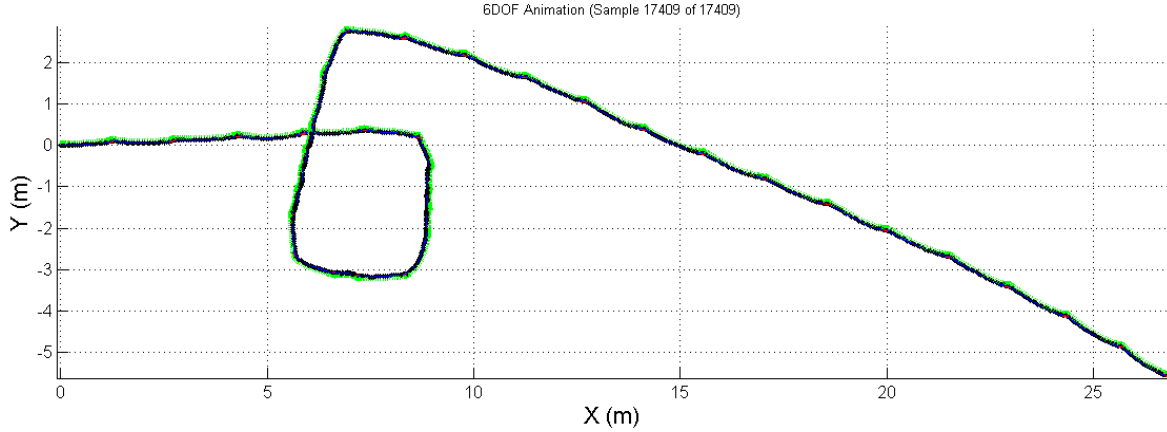
Şekil 8. SHA+ SKE ile pozisyon tahmini

Sezgisel kayma eliminasyonu algoritması devreye girdiğinde ise ilk olarak şekil 8'de pozisyon grafiğini inceleyecek olursak Y eksenindeki sürüklenmenin şekil 7'ye göre ortadan kalktığını görüyoruz. Algoritma baskın yönü doğru hesaplamış ve Y eksenindeki kaymayı gidermiştir. Uyguladığımız yöntem [13]'de uygulanan merdiven çıkma testine benzerlik göstermekte söz konusu makalede uygulanan yöntemde pozisyon hatası %1.61 olarak verilmektedir. Pozisyon hataları kullandığımız algoritma ile düzeltildiğinde X ekseninde 25.7 metre ilerlendiği ölçülmüş böylece X eksenindeki kayma 0.3 metre civarına inmiştir bu da X ekseninde %1.15 hataya inildiğini göstermektedir.



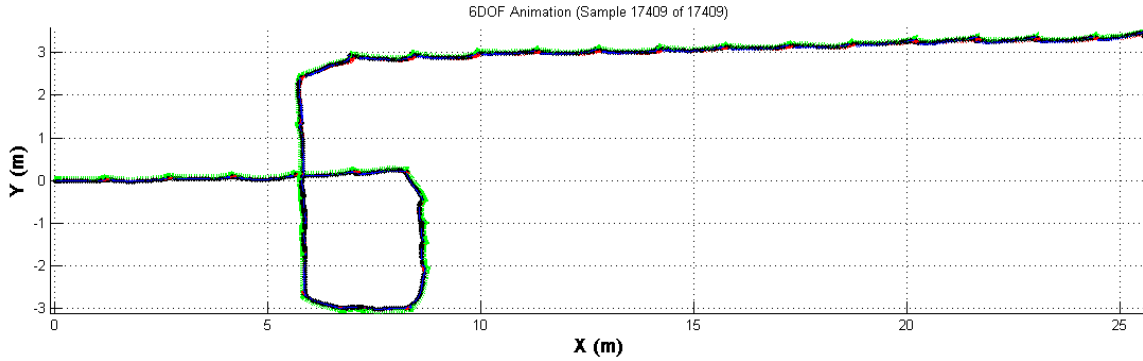
Şekil 9. SKE+SHA Kullanılmış Pozisyon Tahmininin 3B gösterimi

Şekil 9'daki grafik MATLAB ortamında çizilmiş olup önerilen algoritmanın kullanımından sonra toplanan verilerle oluşturulmuş 3 boyutlu bir gösterimdir. Yayanın bina içinde aldığı yol kullanılan merdiven ve koridor açık şekilde belli olmaktadır. Kullandığımız algoritmanın nasıl bir düzeltme yaptığını daha iyi anlamak için şekil 10 ve şekil 11 incelendiğinde Y ekseninin baskın yönde düzeltildiği görülmektedir. [13] ve [24]'de kullanılan test güzergahı bizim verileri elde ettiğimiz güzergaha göre daha düzlemseldir. Bu bakımdan sensörlerimizin sürüklenmeye uğraması daha muhtemel olmasına rağmen iyi bir performans sergilemiştir. [23]'de yapılan testlerde daha uzun yolda ancak düz zeminde yürüme testi yapılmıştır bu sebeple sistemimizle tam performans karşılaştırması yapılamamıştır. [20]'de yapılan navigasyon sisteminde 2,065 metre boyunca test edilmiş ve %0.26 hata ile test tamamlanmıştır bu sebeple performans bakımından bizim sistemimizden ileridedir.



Şekil 10. Sadece SHA Kullanılmış Pozisyon Tahmininin X-Y Düzleminde Gösterimi

Şekil 11'de dikkat edilirse kullandığımız algoritma merdivenlerden dönerken baskın yönü şaşırması ve keskin dönüşlerde bile bozulmaya uğramamıştır şekil 10'daki özellikle merdivenleri döndükten sonra oluşan Y eksenini sürüklemesi baskın yönü bulmaya yarayan bir algoritmanın eksikliğinden dolayıdır. Bu bakımdan [25]'de keskin dönüşlerden sonra oluşan yönelim hatasına karşı avantajlı olmaktadır.



Şekil 11. SKE+SHA Kullanılmış Pozisyon Tahmininin X-Y Düzleminde Gösterimi

4. SONUÇLAR

Mevcut sıfır algılama yöntemleri [22,25] normal yürüyüş döngüleri için genellikle iyi çalışır, ancak iç ortam koşullarında merdiven, basamak kıvrılan koridorlar gibi sensörleri etkileyecek etmenler olduğunda pozisyon tahmini iyi değildir. Bu sebeple sıfır hız algılama algoritmasına ek olarak ilave kalman tabanlı [23,24], veya sezgisel [20] düzeltici filtreler kullanılmaktadır.

Önerdiğimiz algoritma yapılan deneylerde [13] ve [25]'e göre daha iyi çalışsa da [20]'deki sistemin gerisinde kalmaktadır ve algoritmanın bazı sınırlamaları vardır. İlk olarak, algoritmanın baskın yönleri hesaplayabilmesi için yaya baskın yön boyunca düz bir koridordan başlamalıdır. İkincisi, algoritmanın karmaşık bir binada veya zikzaklı karmaşık yürüyüş yollarında başarısız olması muhtemeldir. Sezgisel kayma eliminasyonu, baskın yönü uzun süre bulamazsa, bu süre boyunca sürüklenmeye doğru yörüngeden tamamen sapabilir.

Bu çalışma ile birlikte yürümenin doğasından kaynaklanan etkiler kullanılarak bir iç ortam navigasyon sisteminde IMU sensörlerinden kaynaklanan kaymanın eliminasyon yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Performansı düşüren ölçüm yöntemi, sensör kalitesi, algoritma performansı gibi konular ileri bir çalışmada araştırılacaktır.

Kaynakça

- [1] V.Pasku, A.D.Angelis, A.Moschitta, P.Carbone, J.O. Nilsson, “A magnetic ranging aided dead-reckoning indoor positioning system for pedestrian applications” In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Taipei, Taiwan, 2016.
- [2] V.Pasku, A.D.Angelis, A.Moschitta, P.Carbone, J.O. Nilsson, “A Reliable Fusion Positioning Strategy for Land Vehicles in GPS-Denied Environments Based on Low-Cost Sensors” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.64, p. 3205–3215, 2017
- [3] X. Wang, X. Wang, D. Feng, J. Fu, Z. Kang. “Research on matching and localization of characteristic unanimous infrared dim and small targets”. J. Electron. Meas. Instrum. vol. 30, p. 1405-1410, 2016
- [4] Y. Sinelnikov, A. Sutin, H. Salloum, N. Sedunov, A. Sedunov. “Mice ultrasonic detection and localization in laboratory environment”. The Journal of the Acoustical Society of America. 138, 1791, 2015
- [5] R. Faragher, R. Harle. “Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.33 , p. 2418 – 2428, 2015
- [6] X. Chen, S. Zou. “Improved Wi-Fi indoor positioning based on particle swarm optimization”. IEEE Sensors Journal, vol.17 , p. 7143 - 7148, 2017
- [7] Y. Alvarez, F. Las Heras. “ZigBee-based Sensor Network for Indoor Location and Tracking Applications”. IEEE Latin America Transactions, vol.14 , p. 3208 - 3214, 2016
- [8] P. Yang, W. Wu. “Efficient particle filter localization algorithm in dense passive RFID tag environment”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.61 , p. 5641 - 5651, 2014
- [9] A. Muqaibel, A. Alahmari, M. Kousa, A. Mesbah, A. Landlosi. “NOLS mitigation for UWB positioning”. International Journal of Remote Sensing, vol.35 , p. 7959-7977, 2014
- [10] P. Liu, P. Yang, C. Wang, K Huang, T. Tieniu, “A semi-supervised method for surveillance-based visual location recognition”. IEEE Transactions on Cybernetics, vol.47 , p. 3719 - 3732, 2017
- [11] N. Lasla, MF. Younis, A. Ouadjaout, B. Nadjib, “ An effective area-based localization algorithm for wireless networks”. IEEE Transactions on Computers, vol.64 , p. 2103 - 2118, 2015
- [12] G. Wang, AMC. So, Y. Li, “ Robust convex approximation methods for TDOA-based localization under NLOS conditions”. IEEE Transactions on Signal Processing, vol.64 , p. 3281 - 3296, 2016
- [13] M. Ren, K. Pan, Y. Liu, H. Guo, X. Zhang, P. Wang, “ A novel pedestrian navigation algorithm for a foot-mounted inertial-sensor-based system”. Sensors, vol.16, 139, 2016
- [14] L. Ma, W. Chen, B. Li, Z. You, Z. Chen, “ Fast field calibration of MIMU based on the powell algorithm”. Sensors, vol.14 , p. 16062-16081, 2014
- [15] M. Leccadito, “A Kalman Filter Based Attitude Heading Reference System Using a Low Cost Inertial Measurement,” Virginia Commonwealth University, Virginia, 2013.
- [16] Y.C. Lai, S.S Jan , “Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform,” *Sensors*, vol.10, p.2472-2491, 2010.
- [17] R. Mahony, T. Hamel, J.-M. Pflimlin., “Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3)” Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain ,2005
- [18] J. A. Farrel, AIDED NAVIGATION GPS with High Rate Sensors, Mc Graw-Hill Book Co, 2008. New York.
- [19] S.O. H. Madgwick , A.J. L. Harrison, R.Vaidyanathan, “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm” 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011
- [20] J. Borenstein, L. Ojed , “Heuristic Drift Elimination for Personnel Tracking Systems” THE JOURNAL OF NAVIGATION, vol.63, p.591–606; 2010.
- [21] EuclideanSpace, “Math-Quaternions,” 2019. [Online]. Available: <http://www.euclideanspace.com/math/>

- algebra/realNormedAlgebra/quaternions/ [Accessed: 28-Apr-2019].
- [22] S.K. Park, Y.S Suh , “A Zero Velocity Detection Algorithm Using Inertial Sensors for Pedestrian Navigation Systems” *Sensors*, vol.10, p.9163-9178, 2010.
- [23] E. Foxlin, (2005). "Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors". *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.25, p. 38-46, 2005
- [24] Q. Fan, H Zhang, Y Sun, Y Zhu, X Zhuang, J Jia, “An Optimal Enhanced Kalman Filter for a ZUPT-Aided Pedestrian Positioning Coupling Model”. *Sensors*, vol.18(5), 2018
- [25] Y Wang, X Li, J Zou, “A Foot-Mounted Inertial Measurement Unit (IMU) Positioning Algorithm Based on Magnetic Constraint”. *Sensors*, vol.18(3), 2018