

Research Article / Araştırma Makalesi

Assessing agreement between angular data obtained by inertial measurement sensors and video recordings in two-dimensional gait analysis

İki boyutlu yürüme analizinde eylemsizlik ölçüm sensörleri ve video görüntülerinden elde edilen açısal değerlerin uyumunun incelenmesi

Uğur Ödek 

Physical Education and Sports Department, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, Turkey

ABSTRACT

Objective: Inertial measurement sensors have recently been used to support video-based motion analysis and, have become a standalone measurement tool in time. These devices, which are not affected by the disadvantages of the camera such as the angle of view and lens-induced image distortions, can easily present the data that video-based motion analysis can hardly present when correct analysis techniques are used. The purpose of this study is to examine the agreement of angular values calculated from the data obtained from camera images and inertial measurement sensors for use in gait analysis.

Materials and Method: In the study, 3 male (age: 21 ± 1.57 years, height: 178 ± 3.86 cm), and 3 female (age: 20 ± 0.46 years, height: 161 ± 2.26 cm) participants were asked to walk straight through on an 8-meter predetermined walking way 3 times. Six passive markers were placed on the left lower extremity to calculate angular values from video recordings and 3 inertial measurement units were placed on the same extremity to calculate angular values using units. Thigh, calf and foot angles were calculated using the data obtained from two different measurement methods. Complementary filtering method was used to calculate angular values from the sensor data. To assess the agreement between data, Bland-Altman graphs and One Sample Tests were used.

Results: Following examination of the Bland-Altman graphics, it was determined that 54 data set pairs were in agreement with 95% confidence interval. The results of the One Sample T-Tests revealed that the differences of the angular values of the body parts obtained using two different measurement methods did not differ statistically from 0 ($p > .05$).

Conclusion: These results show that inertial measurement sensors can be used as an alternative to image capture systems in kinematic analysis, where angular values are examined.

Keywords: Kinematics, gait analysis, video-based analysis, inertial measurement sensors

ÖZ

Amaç: Yakın zamanda eylemsizlik ölçüm sensörleri görüntü tabanlı hareket analizine destek amacıyla kullanılmaya başlanmış, süreç içerisinde başlı başına bir ölçüm aracı haline gelmiştir. Görüş açısı ve lens kaynaklı görüntü bozulmaları gibi kameraya ait dezavantajlardan etkilenmeyen bu cihazlar, doğru analiz teknikleri kullanıldığı durumlarda görüntü tabanlı hareket analizinin güçlükle sunabildiği verileri kolaylıkla sağlayabilmektedir. Bu çalışmanın amacı yürüme analizinde kullanılmak üzere kamera görüntülerinden ve eylemsizlik ölçüm sensörlerinden elde edilen verilerden hesaplanan açısal değerlerin uyumunun incelenmesidir.

Gereçler ve Yöntem: Çalışmaya 3 erkek (yaş: 21 ± 1.57 yıl, boy: 178 ± 3.86 cm), 3 kadın (yaş: 20 ± 0.46 yıl, boy: 161 ± 2.26 cm) katılımcı alınmıştır. Görüntülerden açısal hesaplamaların yapılabilmesi için 6 adet pasif işaretleyici, eylemsizlik ölçüm sensörlerinden açısal hesaplamaların yapılabilmesi için 3 adet sensör katılımcıların sol alt ekstremitesi üzerine yerleştirilmiştir. Önceden belirlenen 8 metrelik bir yürüyüş yolunda düz bir şekilde 3 kez yürüme istenmiştir. İki farklı veri toplama yönteminden elde edilen veriler kullanılarak uyluk, baldır ve ayağa ait açısal değerler hesaplanmıştır. Sensörlerden elde edilen verilerden açısal değerlerin hesaplanmasında tamamlayıcı filtreleme (eylemsizlik ölçüm verileri) kullanılmıştır. Değerlerin uyumunun incelenmesinde ise Bland-Altman grafikleri ve Tek Örneklem T-testleri kullanılmıştır.

Bulgular: Bland-Altman grafiklerinin incelenmesi sonucunda 54 veri seti çiftinin %95 güven aralığında birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tek Örneklem T-testlerinin sonuçları ise iki farklı ölçüm yöntemi kullanılarak elde edilen vücut bölümlerine ait açısal değerlerin 0 değerine göre istatistiksel anlamlı bir farklılığı olmadığını ortaya koymuştur ($p > 0.05$).

Sonuç: Elde edilen sonuçlar eylemsizlik ölçüm sensörlerinin açısal değerlerin incelendiği kinematik analizlerde görüntü yakalama sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Kinematik, yürüme analizi, görüntü tabanlı analiz, eylemsizlik ölçüm sensörü

Received / Geliş: 20.02.2020 · Accepted / Kabul: 04.06.2020 · Published / Yayın Tarihi: 10.11.2020

Correspondence / Yazışma: Uğur Ödek · Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Beden Eğitimi ve Spor Bölümü, Nevşehir, Turkey · ugurodek@gmail.com

Cite this article as: Ödek U. Assessing agreement between angular data obtained by inertial measurement sensors and video recordings in two-dimensional gait analysis. Turk J Sports Med. 2021;56(1):13-19.; <http://dx.doi.org/10.47447/tjism.0434>

GİRİŞ

Kinematik analizler araştırmacılara gözlem yoluyla elde edebilecekleri izlenimlerden daha fazlasını sunarak, hareketi biyomekaniğin şemsiyesi altında yer alan fizik, matematik ve kinesiyoloji gibi bilim dalları çerçevesinde analiz edebilmeyi mümkün kılar. Hareketi oluşturan öğelerin sayısallaştırıldığı bu analiz yönteminde gerekli veriyi toplamak için çeşitli yöntem ve veri toplama araçları kullanılmaktadır (1-3). Hareketin görüntülenmesi ve kayıt altına alınması bu yöntemlerden birisidir. Görüntü tabanlı hareket analizinin (GTHA) veri toplama aşamasını oluşturan bu yöntem (4) insan ve hayvanlara ait lokomotor becerileri açıklamaya yönelik sıralı fotoğraflardan oluşan çalışmalardan sonra popülerlik kazanmış ve günümüzde en çok kullanılan yöntemler arasında yerini almıştır.

GTHA'de çeşitli görüntü toplama araçları (standart video kamera, kızılötesi/morötesi video kamera, X ışını kamerası vb.) ile elde edilen görüntüler üzerinde belirlenen noktaların zaman içerisindeki yer değiştirmeleri takip edilir ve yer değiştirme miktarı göz önünde bulundurularak iki ya da üç boyutlu kinematik analizler gerçekleştirilir. Bu analizlerin yapılabilmesi için farklı donanım (örneğin; aktif/pasif işaretleyiciler) ve yazılımlar (örneğin; Vicon NEXUS®, Qualysis Track Manager®) geliştirilmiş ve bu araçlarla elde edilen verilerin güvenilirliğine çeşitli çalışmalarda (5) yer verilmiştir. Ölçüm sonuçlarının güvenilirliği dışında GTHA'nın sıklıkla kullanılmasının nedenleri arasında, yöntemin eskieye uzanan tarihine bağlı kazanılan deneyimler ve günümüz teknolojisinin bu yönetime olan katkıları (yüksek hızlı kameralar, aktif işaretleyiciler, otomatik sayısallaştırma vb.) yer almaktadır.

Özellikle son dönemde hız kazanan teknolojik gelişimin olumlu etkileri diğer veri toplama araçları üzerinde de kendini hissettirerek, bu araçların hareket analizinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. İvmeölçer, jiroskop ve manyetometre gibi farklı tip verileri ölçebilen sensörlerin bir ya da daha fazlasının bir arada bulunduğu cihazlar olan eylemsizlik ölçüm sensörleri bahsedilen veri toplama araçlarından biridir. Son dönem çalışmalarında eylemsizlik ölçüm sensörlerinin tek başlarına ya da diğer veri toplama araçlarıyla birlikte, robotik, klinik ya da sportif performans geliştirilmeye yönelik amaçlar doğrultusunda kullanıldığını görmek mümkündür (6-8).

GTHA detaylı ve hassas sonuçlar vermekle birlikte görüntü işleme ve analiz sırasında hareketin görünür olmasını da sağlayarak (kızılötesi sistemler hariç) araştırmacılara sayısal veriler ile hareketi bağdaştırma şansı vermektedir. Tüm bu avantajlarına rağmen, görüntü yakalama araçları ile elde edilen görüntülerin kullanılabilirliği çözünürlük, netlik, görüntü açısı, ışık, görüntü yakalama hızı gibi değişkenlerden etkilenmektedir (9, 10). Ölçüm kalitesini etkile-

yen değişkenlerin kontrol altında tutulabilmesi için iyi bir donanım ve yazılımla birlikte genellikle kapalı alan laboratuvar ortamına da ihtiyaç duyulur (11-13). Donanım ve yazılım maliyetleri ile birlikte laboratuvar gereksinimi bu analiz yönteminin her araştırmacı tarafından kullanılabilir olmasını sınırlamaktadır. Eylemsizlik ölçüm sensörleri tek başlarına kullanıldığında kişinin hareketi görüntülenmemesine karşın, görüntü yakalama araçları ile kıyaslandığında çok daha düşük maliyet gerektirmekle birlikte, günümüzde üretilen birçok sensör kendi güç ünitesini kullandığı için kablo bağlantısı yoktur ve bu nedenle ölçümü yapılacak hareket mekân sınırlaması olmaksızın gerçekleştirilebilir (14, 15). Aynı zamanda kablosuz veri iletimi protokolleri kullanan sensörler aracılığı ile verinin bilgisayara eşzamanlı aktarımı da olanaklı hale gelmiştir. Eylemsizlik ölçüm sensörlerinden elde edilen verilerin doğru yorumlanabilmesi için kullanılacak veri filtreleme yönteminin seçimi halen güncelliğini korumakta olan bir konudur. Özellikle sensörlerden elde edilen ham veride görülen ve jiroskop sapması adı verilen durumunun etkisini minimize edebilmek amacıyla elde edilen verinin niteliğine göre en doğru filtreleme yöntemi seçilmelidir. Kalman (16), Mahony ve Madgwick (17) filtreleme yöntemlerinin insan hareketlerinin incelendiği kinematik analizlerde kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu filtreleme yöntemleri oldukça karmaşıktır ve çoklu hesaplamalarda oldukça fazla işlemci gücüne ihtiyaç duyar. Daha çok hava araçlarının oryantasyon bilgisini elde etmede (18, 19) kullanılan ve tamamlayıcı filtreleme (complementary filtering) olarak adlandırılan filtreleme yöntemi son yıllarda insan çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, göreceli olarak daha basit olan bu filtreleme yöntemiyle insan hareketlerine ait verilerin yüksek doğrulukla işlenebildiği görülmektedir (20, 21).

Hareketin doğru bir şekilde sayısallaştırılması analizlerde yer alan matematiksel hesaplamalar açısından büyük önem taşır (22). Bu nedenle analizlerde kullanılacak yeni yöntemle elde edilen sonuçların daha önceden güvenilirliği kabul edilmiş bir yöntemle elde edilen sonuçlarla uyumunun incelenmesi yöntemin güvenilirliği konusunda araştırmacılara bilgi verir. Bununla birlikte verilerin uyumu incelenirken doğru istatistiksel yöntemin seçilmesi de oldukça önemlidir (23). Sant'Anna, Wickström (24) ve Henkel'in (25) çalışmalarında görüldüğü gibi, iki veri serisi arasındaki ilişki incelenirken korelasyon hesaplamaları kullanılmakla beraber, bu yöntem elde edilen değerlerin birlikte nasıl hareket ettikleri (azalma-artma) hakkında bilgi verir; değerler arasındaki farklar hakkındaki bilgiye ulaşmak bu yöntemle oldukça zordur. İki farklı veri toplama yöntemi ile elde edilen verilerin birbirine yakınlığı, bir başka deyişle uyumunun test edilmesinde Bland-Altman yöntemi özellikle klinik çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Eylemsizlik ölçüm sensörlerinin hareket analizinde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte aynı yöntemin farklı hareket profillerinde hata oranını değiştirebildiğini gösteren çalışmalar (10, 26) bulunmaktadır. Bu nedenle, çeşitli hareketlerde sensörlerden güvenilir verinin hangi yöntemler kullanıldığında elde edilebileceğinin belirlenmesi büyük önem taşır. Bu doğrultuda çalışmanın amacı; kamera görüntülerinden elde edilen verilerle hesaplanan vücut bölümlerine (uyluk, baldır ve ayak) ait açısal değerler ile sensörlerden elde edilen verilerden hesaplanan vücut bölümlerine ait açısal değerlerin uyumunun incelenmesi olarak belirlenmiş ve araştırmanın istatistiksel hipotezi "iki farklı ölçüm yöntemiyle elde edilen açısal değerler arasında fark yoktur" olarak belirlenmiştir.

GEREÇ ve YÖNTEMLER

Araştırma Grubu

Araştırmanın katılımcı grubunu 3 erkek (yaş: 21.3±1.57, boy: 178.6±3.86) ve 3 kadın (yaş: 20.4± 0.46, boy: 161±2.26) toplam 6 kişi oluşturmaktadır. Katılımcılar son 1 yıl içerisinde yürüyüşlerini etkileyebilecek bir alt ekstremitte yaralanması ile karşılaşmamışlardır. Araştırmaya katılım gönüllülük esasına dayalı olup, tüm katılımcıların araştırma öncesinde onam formları ile araştırma hakkında bilgilendirilmeleri sağlanmıştır. Çalışmaya Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Etik Kurulu Başkanlığınca 13.05.2019 tarih ve 2019.07.69. sayılı karar ile onay verilmiş ve çalışma Helsinki Bildirgesine uygun şekilde sürdürülmüştür.

Kinematik Analizler

Verilerin toplanması

Katılımcılardan 8 m uzunluğunda ve 40 cm genişliğinde bir yürüyüş alanında alışmış oldukları günlük adım frekansı ve adım uzunluğunu kullanarak kamera bakış açısına göre sağdan sola doğru 3'er defa yürüyüş yapmaları istenmiştir. Bununla birlikte, sol bacağın üst kısmında bulunan işaretleyicinin görünümünün engellenmemesi için katılımcılardan kollarını göğüs hizasında birleştirmeleri istenmiştir.

İki boyutlu görüntü analizinde kullanılmak üzere katılımcıların sol bacaklarına 6 adet siyah renkli, 2 cm çapında dairesel pasif işaretleyici yerleştirilmiştir. Uyluk bölgesini tanımlamak için 2 adet işaretleyici büyük trokanterin 5 cm inferioruna ve lateral kondilin 3 cm superioruna; baldır bölgesini tanımlamak için 2 adet işaretleyici fibulanın proksimal başınının 3 cm inferioruna ve lateral malleolün 2 cm superioruna yerleştirilmiştir. Ayağı tanımlamak üzere ise 2 adet işaretleyici ayağın lateral yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu bölgedeki işaretleyicilerin ilki kalkaneusun posterior çıkıntısının 2 cm anterioruna, ikincisi ise 5. metatarsofalangeal eklemin hizasına yerleştirilmiştir (Şekil 1). Tüm yürüyüşler

1/100 saniye hızında ve 1080 piksel çözünürlükte yüksek hızlı görüntü kaydı yapabildiği kamera kullanılarak (Sony, FDR-X1000V, Japonya) kayıt altına alınmıştır.

Uyluk, baldır ve ayağa ait 2 eksen (x, y) ivmelenme ve açısal hız verisi 3 adet eylemsizlik sensörü (ActiGraph, GT9X-Link, USA) ile 100Hz frekansında toplanmıştır. Sensörler işaretlenen noktalar arasındaki uzunlukların yarısına denk gelen mesafeye, vücut bölümlerinin statik durumdaki anatomik eksenleri göz önünde bulundurularak yerleştirilmiştir.

Verilerin analizi

Yerleştirilen işaretleyicilerin pozisyonlarının sayısallaştırılması başlangıcın ardından gelen 3. adım sonundaki topuk temasını takip eden 3 topuk temasını kapsayan süre (3 adım) için görüntü analizi programı (Tracker, V.4.11.1) yardımıyla yapılmıştır. Yatay düzlemde yürüyüş yolunun merkezine yerleştirilen 5 m uzunluğundaki şerit görüntülerin 2 boyutlu kalibrasyonu için kullanılmıştır. Kamerada kullanılan balıkgözü lens nedeniyle görüntünün merkezden uzak noktalarında oluşan bozulmalar görüntü analizi yazılımının içerisinde bulunan filtreleme eklentisi ile ortadan kaldırılmıştır. Görüntü analizi yazılımı kullanılarak işaretlenen noktalar tanımlandıktan sonra bu noktaların hareket süresi boyunca koordinat sistemindeki yerleri programın otomatik takip özelliği kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Sonrasında uyluk, baldır ve ayak bölümleri iki nokta arasına bir doğru parçası yerleştirilerek oluşturulmuştur. Bölümlere ait açısal değerler bu doğru parçalarının yatay eksenle yaptığı açılardır ve radyan cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplanan açısal değerlerin yumuşatılmasında Sigmaplot (Ver.13) istatistiksel analiz yazılımı kullanılmıştır. Yumuşatma verinin her 1/100'lük dilimi için negatif üstsel yöntem kullanılarak 4. dereceden polinom fonksiyon analizi ile yapılmıştır.

Sensörleri üreten firmaya (ActiGraph, USA) ait ActiLife (Ver. 6.13.3) veri transferi ve analizi yazılımı ile bilgisayar ortamına aktarılan ivmelenme verisi KST2 (Ver. 2.0.x) görüntüleme ve grafik oluşturma yazılımı ile incelenmiştir. İvmelenme verisinde yere temas anında meydana gelen pikler tespit edilmiş ve bu pikler kullanılarak 3. ve 6. topuk temasını kapsayan süredeki ivmelenme ve açısal hız verileri analiz edilmek üzere ham veriden kesilerek ayıklanmıştır. Elde edilen verilerden sensörlerin oryantasyon bilgisine ulaşabilmek için tamamlayıcı filtreleme yöntemi (Complementary Filtering) yöntemi kullanılmıştır (Eşitlik 1). Görüntülerden elde edilen oryantasyon bilgilerinin tabii tutulduğu yumuşatma yöntemi aynı şekilde sensörden elde edilenlere de uygulanmıştır. Bu yolla yumuşatma yönteminin içerinde yer alan polinomiyal eşitlik kullanılarak farklı yöntemlerle elde edilen verilerin gözlem sayısı eşitlenmiştir. Böylece is-

tatistiksel analiz için kullanılacak Bland-Altman yöntemi- nin gözlem sayısı eşitliği önkoşulu yerine getirilmiştir.

$$\theta = 0.98 \cdot (\theta k - 1 + x \cdot \Delta t) + (0.02 \cdot y)$$

Eşitlik 1. Tamamlayıcı Filtre

θ = bölge açısı, x = jiroskop verisi, y = ivme ölçer verisi

İstatistiksel Analizler

İstatistiksel yaklaşımlar yardımıyla iki farklı ölçüm yönteminden elde edilen bölümlere ait açısal değerlerin uyumu ve bu değerlerin farkları incelenmiştir. İki yöntemden elde edilen toplam 54 veri çiftinin uyumunun incelenmesi için Bland-Altman grafikleri kullanılmıştır. Alt ve üst uyum sınırları belirlenirken ölçüm sonuçlarına ait farkların standart sapması kullanılmış ve ± 1.96 standart sapma uzaklıkları limit değerler olarak belirlenmiştir. İstatistiksel kararın objektif bir şekilde verilebilmesi için Tek Örneklem T-Testi kullanılmış ve iki ölçüm arasındaki farkların o değerine göre anlamlı ölçüde farklı olup olmadığı test edilmiştir. Farkların oluşturduğu veri setlerindeki dağılımın normalliği Kolmogorov-Smirnov Testi ile test edilmiştir. Tüm testler

için istatistiksel anlamlılık düzeyi $p < .05$ olarak belirlenmiştir.

BULGULAR

Bland-Altman grafikleri tüm zaman serisi çiftleri için iki ölçüm yönteminden elde edilen sonuçların farklarının alt ve üst limitler içerisinde kaldığını göstermiştir. Birinci katılımcının 3. denemesinin vücut bölümlerine ait açısal değerleri ve Bland-Altman grafikleri örnek olarak sunulmuştur (Grafik 1-6). Kolmogorov-Smirnov testleri sonucunda farkların oluşturduğu tüm veri setlerinin normal dağılım gösterdiği bulunmuştur ($p > .05$). Bununla birlikte Tek örneklem T-Testi sonuçları (Tablo 1) tüm veri çiftlerinde iki ölçüm yönteminden elde edilen sonuçların farklarının istatistiksel olarak o'dan anlamlı ölçüde farklı olmadığını göstermiştir ($p > .05$). Elde edilen sonuçlar doğrultusunda iki ölçüm yöntemi ile elde edilen verilerin %95 güven aralığı sınırları içerisinde uyumlu olduğu belirlenmiş ve iki farklı ölçüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar arasında fark yoktur hipotezi kabul edilmiştir.

Tablo 1. Üç Bölgeye Ait Tek Örneklem T-Testi Sonuçları

Katılımcı	Deneme	Ayak (Sol)		Baldır (Sol)		Uyluk (Sol)	
		t	p	t	p	t	p
1	1	1.90	0.06	1.91	0.05	1.70	0.09
	2	1.40	0.16	1.81	0.07	1.81	0.07
	3	1.74	0.08	1.59	0.11	1.44	0.15
2	1	1.55	0.12	1.70	0.09	1.37	0.17
	2	1.25	0.21	1.74	0.08	1.62	0.10
	3	1.71	0.18	1.81	0.07	1.55	0.12
3	1	1.70	0.09	1.81	0.07	1.90	0.06
	2	1.59	0.11	1.62	0.10	1.62	0.10
	3	1.71	0.18	1.51	0.13	1.74	0.08
4	1	1.51	0.13	1.49	0.14	1.37	0.17
	2	1.27	0.20	1.90	0.06	1.81	0.07
	3	1.76	0.08	1.74	0.08	1.70	0.09
5	1	1.37	0.17	1.70	0.09	1.59	0.11
	2	0.99	0.31	1.59	0.11	1.59	0.11
	3	1.49	0.14	1.51	0.13	1.70	0.09
6	1	1.28	0.20	1.30	0.19	1.76	0.08
	2	1.30	0.19	1.72	0.18	1.59	0.11
	3	1.72	0.18	1.55	0.12	1.81	0.07

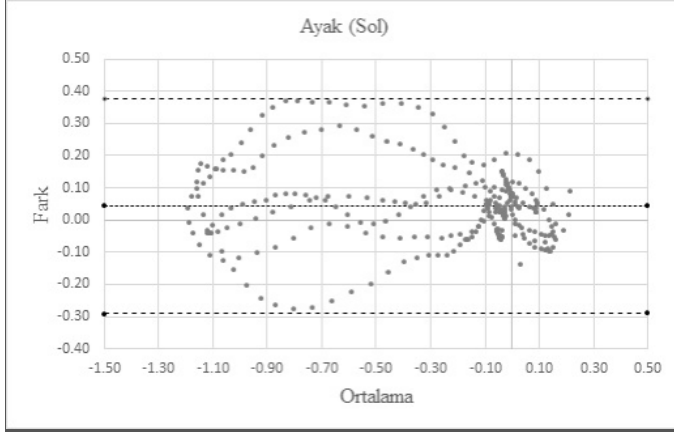
TARTIŞMA

Bu çalışmada yürümenin kinematik analizinde kullanılmak üzere video kamera görüntüleri ve eylemsizlik ölçüm sensörlerinden elde edilen verilerle hesaplanan açısal değerlerin uyumu incelenmiştir. Sol uyluk, baldır ve ayağa ait açısal değerler farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan değerler olmasına rağmen ölçüm sonuçları arasındaki farkın istatistiksel olarak o'dan farklı olmadığı ve veri setlerinin %95 güven aralığı içerisinde uyum gösterdiği bulunmuştur.

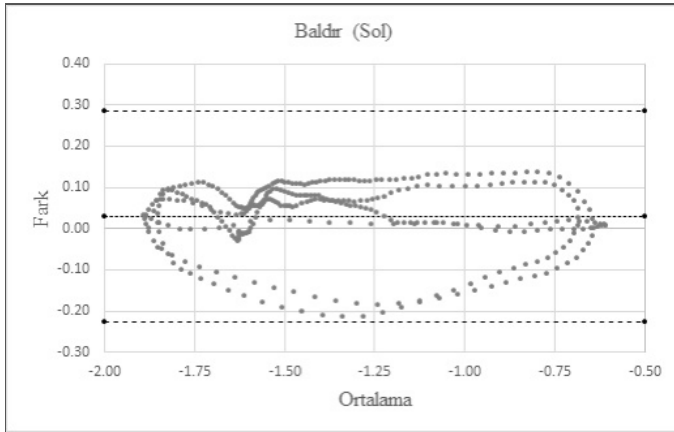
Zhang, Novak (27), Qingguo ve Jun-Tian (28) tarafından yapılan çalışmalarda eylemsizlik ölçüm sensörlerinin (Xsens,

MVN, Hollanda) yürüme analizinde kamera desteği ile ya da tek başına kullanılabileceği belirtilmiştir. Liu, Inoue ve Shibata (29) ise kendi geliştirdikleri giyilebilir sistem ve görüntülerden elde ettikleri verileri karşılaştırdıkları çalışmalarında uyluk, baldır ve ayak açılarının benzer olduğunu bulmuşlardır. İşaretleyicileri ve sensörleri farklı noktalara yerleştirmiş olmalarına ve farkları ortaya koymada "Kök Ortalama Kare Hatası" nı kullanmalarına rağmen çalışmanın sonuçları bu çalışmayla örtüşmektedir. Bir başka çalışmada Seel, Raisch ve Schauer (30) ampute bireylerde hem sağlıklı bacak hem de protez bacak için diz ve bilek açılarının ölçü

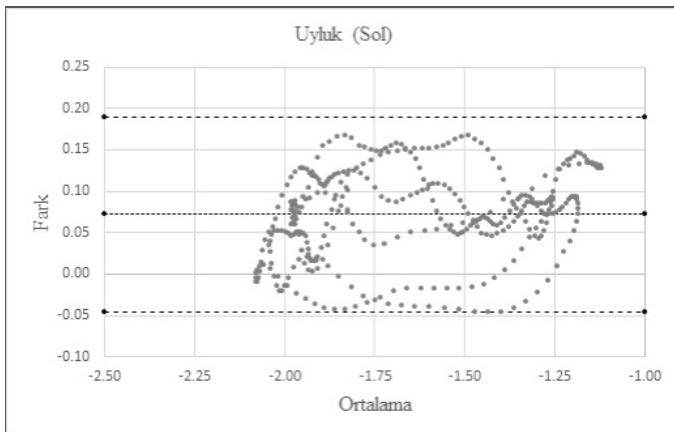
münde eylemsizlik sensörlerinden elde edilen verilerin görüntülerden elde edilenlere oldukça yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Benzer araştırmaların sonuçlarından yola çıkarak farklı ölçüm ve analiz yöntemleri kullanıldığında dahi eylemsizlik ölçüm sensörlerinden elde edilen verilerin görüntülerden elde edilenlerle anlamlı farklılıklar göstermediği söylenebilir.



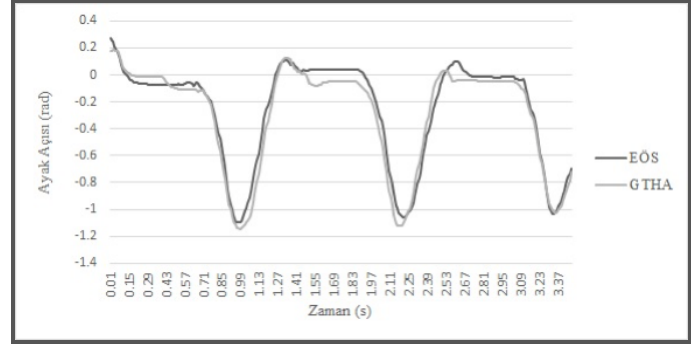
Grafik 1. Ayağa ait açısal değerlerin uyumu



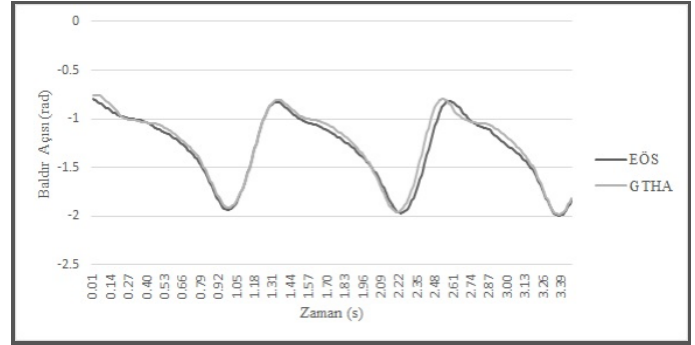
Grafik 2. Baldıra ait açısal değerlerin uyumu



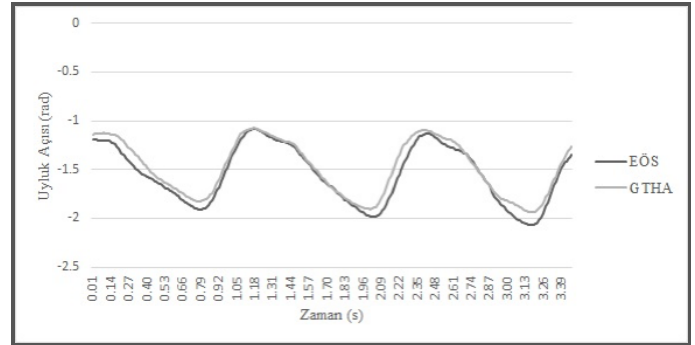
Grafik 3. Uyluğa ait açısal değerlerin uyumu



Grafik 4. Ayağa ait açısal değerler



Grafik 5. Baldıra ait açısal değerler

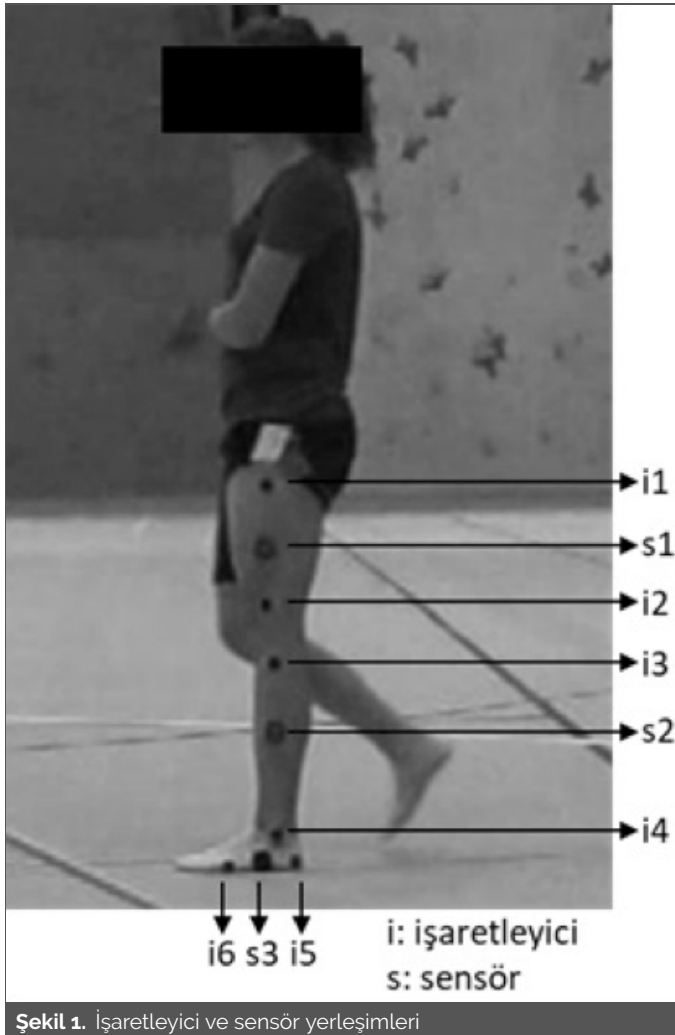


Grafik 6. Uyluğa ait açısal değerler

Araştırmacıların kolaylıkla kullanabileceği basit ve ucuz yöntemlerin geliştirilmesinin alanda yapılacak çalışma sayısını artıracak düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan tamamlayıcı filtreleme eşitliği daha önceki araştırmalarda kullanılan filtreleme eşitlikleri ile kıyaslandığında oldukça basit olmasına rağmen sonuçlarda herhangi bir jiroskop sapmasına rastlanmamıştır. İvmelenme ve açısal hız değerlerine sahip olan araştırmacılar çeşitli ofis yazılımları (MS Excel, Libreoffice Calc vb.) yardımıyla tamamlayıcı filtre kullanarak eklem ve bölüm açılarını kolaylıkla hesaplama olanağı bulabilirler. Bununla birlikte Higgins'in (31) çalışmasında belirtildiği gibi tamamlayıcı filtreleme yöntemi çok daha az hesaplama gerektirir. Yüksek hızlı veri toplama araçlarının kullanıldığı ve binlerce verinin milisaniyeler içerisinde işlenmesi gerektiği durumlarda bu katkı oldukça önemlidir. Ayrıca tamamlayıcı filtreleme yöntemi modelleme hesaplamaları içermez ya da sonuca ulaşmak için Kalman filtreleri gibi bir sonraki veriye ihtiyaç duymaz. Bu ne-

denle insan hareketleri gibi bütünüyle doğrusal olmayan hareketlere ait verilerin hesaplanmasında daha başarılı ve gecikmesiz sonuçlar vermektedir.

Çalışmada kullanılan eylemsizlik ölçüm sensörlerinde 3 eksenli manyetometre bulunmasına ve sensörlerden veri toplanmış olmasına rağmen açısal değerlerin hesaplanmasında bu veriler kullanılmamıştır. Bunun sebebi manyetometre verilerinin ölçüm sahasındaki metal objelerden önemli ölçüde etkilenmesi ve sonuçlarda hataya neden olabilmesidir. Manyetometre ölçümlerinin neden olabileceği olumsuzluklar Bachmann ve ark. (32) ile de Vries ve ark.'nın (33) çalışmalarında ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 1. İşaretleyici ve sensör yerleşimleri

SONUÇ

Çalışmanın sonuçları eylemsizlik ölçüm sensörlerinden elde edilen verilerle hesaplanan açısal değerlerin görüntülerden elde edilen verilerle hesaplanan açısal değerlere benzer olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar doğru yöntemler izlendiğinde yürüme analizinde kullanılmak üzere istenilen açısal değerlere daha hızlı, daha düşük maliyetle ve mekân sınırlaması olmadan eylemsizlik ölçüm sensörleri ile ulaşılabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, ileriki çalış-

malarda farklı hareketlerin ve 3 boyutlu analizlerin yapılmasıyla bu sensörlere olan güvenin artacağı, sporda ve klinik amaçlarla kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

The authors declared no conflicts of interest with respect to authorship and/or publication of the article.

Financial Disclosure / Finansal Destek

The authors received no financial support for the research and/or publication of this article.

KAYNAKLAR

1. McGinnis P. *Biomechanics of Sport and Exercise*. 3rd ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2013.
2. Richards J. *Biomechanics in Clinic and Research: An Interactive Teaching and Learning Course*. Edinburgh: Elsevier; 2008.
3. Robertson D. *Research Methods in Biomechanics*. 2nd ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2014.
4. Muybridge E. *Descriptive Zoopraxography; Or, the Science of Animal Locomotion Made Popular: With Selected Outline Tracings Reduces from Some of the Illustrations of "animal Locomotion.": an Electro-Photographic Investigation of Consecutive Phases of Animal Movements*. Philadelphia, Pa: University of Pennsylvania; 1893.
5. Cuesta-Vargas AI, Galán-Mercant A, Williams JM. The use of inertial sensors system for human motion analysis. *Phys Ther Rev*. 2010;15(6):462-73.
6. Mooney R, Corley G, Godfrey A, Quinlan LR, O'Laughlin G. Inertial Sensor Technology for Elite Swimming Performance Analysis: A Systematic Review. *Sensors*. 2016;16(1):18.
7. Sprager S, Juric MB. Inertial Sensor-Based Gait Recognition: A Review. *Sensors*. 2015;15(9):22089-127.
8. Taborri J, Palermo E, Rossi S, Cappa P. Gait Partitioning Methods: A Systematic Review. *Sensors*. 2016;16(1):66.
9. Barris S, Button C. A review of vision-based motion analysis in sport. *Sports Med*. 2008;38(12):1025-43.
10. Mayagoitia RE, Nene AV, Veltink PH. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *J Biomech*. 2002;35(4):537-42.
11. Hedrick TL. Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems. *Bioinspir Biomim*. 2008;3(3):034001.
12. Pons-Moll G, Baak A, Gall J, Leal-Taixe L, Müller M, Seidel HP, et al. Outdoor human motion capture using inverse kinematics and von mises-fisher sampling. 2011 International Conference on Computer Vision; 2011 May 25-27; Tokyo, Japan. p.1243-50.
13. Yu G, Jang YJ, Kim J, Kim JH, Kim HY, Kim K, et al. Potential of IMU Sensors in Performance Analysis of Professional Alpine Skiers. *Sensors*. 2016;16(4):463.
14. Gouwanda D, Senanayake SMNA. Emerging Trends of Body-Mounted Sensors in Sports and Human Gait Analysis. *IFMBE Proceedings 4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering; 2008 June 25-28*; Kuala Lumpur, Malaysia. 2008. p. 715-18.
15. Hung TN, Suh YS. Inertial sensor-based two feet motion tracking for gait analysis. *Sensors*. 2013;13(5):5614-29.
16. Sabatini AM. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2006;53(7):1346-56.
17. Madgwick SOH, Harrison AJL, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*; 2011 June 29-July 1; Zurich, Sweeden. 2011. p.1-7.
18. Euston M, Coote P, Mahony R, Kim J, Hamel T. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2008 September 22-26; Nice, France. 2009. p.340-345.
19. Guignard B, Rouard A, Chollet D, Seifert L. Behavioral Dynamics in Swimming: The Appropriate Use of Inertial Measurement Units. *Front Psychol*. 2017;8:383.
20. Alonge F, Cucco E, D'Ippolito F, Pulizzotto A. The use of accelerometers and gyroscopes to estimate hip and knee angles on gait analysis. *Sensors*. 2014;14(5):8430-46.
21. Young A. Comparison of Orientation Filter Algorithms for Realtime Wireless Inertial Posture Tracking. *2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*; 2009 June 3-5. CA, Berkeley, USA. 2009. p. 59-64.

22. Windolf M, Götzen N, Morlock M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems-exemplified on the Vicon-460 system. *J Biomech*. 2008;41(12):2776-80.
23. Giavarina D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochem Med*. 2015;25(2):141-51.
24. Anna AS, Wickström N, Eklund H, Zügner R, Tranberg R. Assessment of Gait Symmetry and Gait Normality Using Inertial Sensors: In-Lab and In-Situ Evaluation. *Biomedical Engineering Systems and Technologies Communications in Computer and Information Science*. 2013;239-54.
25. Henkel M. Implementation and Validation of Inertial Measurement Units in marker-based and marker-less 3D motion tracking [Undergraduate]. TU München; 2016.
26. Watanabe T, Saito H, Koike E, Nitta K. A Preliminary Test of Measurement of Joint Angles and Stride Length with Wireless Inertial Sensors for Wearable Gait Evaluation System. *Comput Intell Neurosci*. 2011;2011: 975193
27. Zhang JT, Novak AC, Brouwer B, Li Q. Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiol Meas*. 2013;34(8):63-9.
28. Li Q, Zhang JT. Post-trial anatomical frame alignment procedure for comparison of 3D joint angle measurement from magnetic/inertial measurement units and camera-based systems. *Physiol Meas*. 2014;35(11):2255-68.
29. Liu T, Inoue Y, Shibata K. Development of a wearable sensor system for quantitative gait analysis. *Measurement* 2009; 42(7), 978-988.
30. Seel T, Raisch, J, Schauer, T. IMU-based joint angle measurement for gait analysis. *Sensors*. 2014; 14(4), 6891-6909.
31. Higgins W. A Comparison of Complementary and Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1975;11(3):321-5.
32. Bachmann E, Yun X, Brumfield A. Limitations of Attitude Estimation Algorithms for Inertial/Magnetic Sensor Modules. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007;14(3):76-87.
33. de Vries WH, Veeger HE, Baten CT, van der Helm FC. Magnetic distortion in motion labs, implications for validating inertial magnetic sensors. *Gait Posture*. 2009;29(4):535-41.