

Spor Biyomekaniğinde Performans Analizi için Hareket Yakalama Teknolojisi Uygulamaları

Kübra Elif TOZKOPARAN¹, Özgür KARADUMAN^{2*}

^{1,2} Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ kubraeliftozkoparan@gmail.com, ^{2*} okaraduman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/05/2022;

Kabul/Accepted: 11/07/2022)

Öz: Bu çalışmada, spor performanslarında hareket yakalama teknolojisi kullanılarak sporcuların hareketlerini gerçek zamanlı olarak izleme ve kaydetme yoluyla fiziksel durumu tespit etme, sportif performanslarını belirleme ve yaralanmaları önleme mekanizmaları geliştirme amaçlanmaktadır. Burada, performansın fiziksel yönlerine bakılarak kinetik ve fiziksel performans arasındaki ilişkiyi anlamaya çalışmak için spor biyomekaniği analizi kullanılmaktadır. Biyomekanik analiz, en uygun hareket ve yük analizi için modeller oluşturarak performans üzerinde büyük bir etkiye sahip olma imkânı vermektedir. Dolayısıyla bu analiz, bir beceriyi gerçekleştirmenin en güvenli ve etkili yolunu belirlemek, farklı bir çevreye göre vücudun nasıl hareket ettiği veya nasıl tepki verdiğinin araştırılması için kullanılabilir. Bu çalışmada, spor biyomekaniğinde kullanılan hareket yakalama teknolojilerinin donanım ve yazılım bakımından sınıflandırılması yapılmış; bireysel ve takım sporlarında kullanılan hareket yakalama sistemleri ile ilgili çalışmaların algılayıcılara, denek sayısına, spor türüne göre avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuştur. Ayrıca, spor biyomekaniğinde kullanılan görüntü işleme uygulamaları, optik olan ve optik olmayan sistemler, marker kullanılarak ve marker kullanılmadan yapılan veri toplama işlemleri gibi hususlar ele alınmıştır. Spor biyomekaniğinin etkili ve doğru bir şekilde kullanımının sporcu performansı ve sporcu sağlığı için önemli bir rol oynadığı ve sporcuya özel sistemlerin geliştirilmesinde önemli katkılar sağladığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın biyomekanik alanındaki çalışmalara, özellikle spor biyomekaniği araştırmalarına önemli ölçüde yol gösterici olacağını düşünmekteyiz.

Anahtar kelimeler: Hareket Yakalama, Biyomekanik, Spor Biyomekaniği, Optik Sistem, İşaretli/İşaretsiz Sistem.

Motion Capture Technology Applications for Performance Analysis in Sports Biomechanics

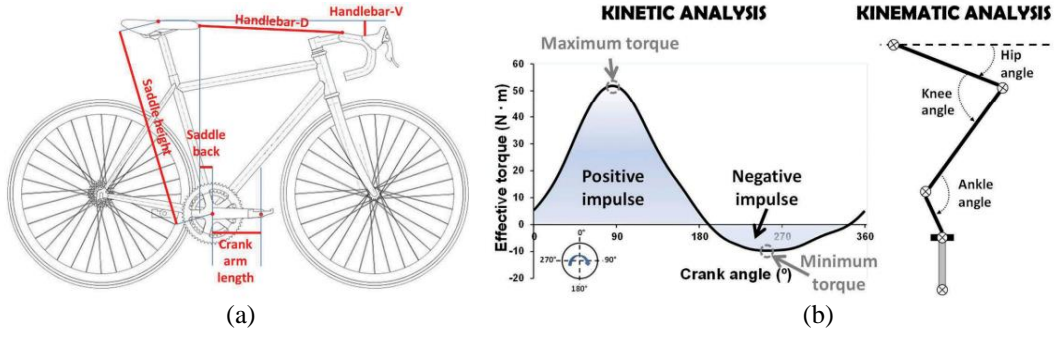
Abstract: In this study, by using motion capture technology in sports performances, it is aimed to develop mechanisms to detect physical condition, determine sports performance and prevent injuries by monitoring and recording the movements of athletes in real time. In this sense, sports biomechanics analysis is used to try to understand the relationship among kinetic and physical performance by looking at the physical aspects of performance. Biomechanical analysis enables to have a major impact on performance by creating models for optimum motion and load analysis. Therefore, this analysis can be used to determine the safest and most effective way to perform a skill, to study how the body moves or responds to a different environment. In this study, motion capture technologies used in sports biomechanics are classified in terms of hardware and software; The advantages and disadvantages of the studies on motion capture systems used in individual and team sports are revealed as regards sensors, the number of subjects, and the type of sport. In addition, matters such as image processing applications used in sports biomechanics, optical or non-optical systems, and data collection processes with or without markers has been handled. It is salient points that the effective and correct use of sports biomechanics plays an important role in athlete performance and athlete health, and makes significant contributions to the development of athlete-specific systems. We hope that this study can significantly guide studies in the field of biomechanics, especially sports biomechanics.

Key words: Motion Capture, Biomechanics, Sports Biomechanics, Optical System, Marker/Markerless System.

1. Giriş

Spor biyomekaniği, spor bilimlerinin daha geniş alanındaki temel disiplinlerinden biridir. Yarışmalarda yaralanma riskini azaltmak ve spor performansını artırmak amacıyla spordaki temel hareketlerin detaylı analizini içerir [1]. Performansın fiziksel yönlerine bakan araştırmacılar, kinetik ve fiziksel performans arasındaki ilişkiyi anlamaya çalışmak için spor biyomekanik analizini kullanır. Biyomekanik analiz, optimum hareket ve yük analizi için modeller oluşturarak performans üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Bu, bir beceriyi hareket ettirmenin veya gerçekleştirmenin en güvenli veya en etkili yolunu belirlemek ve farklı bir çevrenin vücudun nasıl hareket ettiği veya tepki verdiği üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılır. Spor biyomekaniği üzerine yapılan araştırmalar geleneksel olarak kinetik ve kinematik çalışmalara bölünmüştür. Kinetik, vücuda etki eden kuvvetler ile bu kuvvetlerin hareketi nasıl etkilediği arasındaki ilişkinin incelenmesidir.

* Sorumlu yazar: okaraduman@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1140-5631, ^{2*} 0000-0002-6569-3616

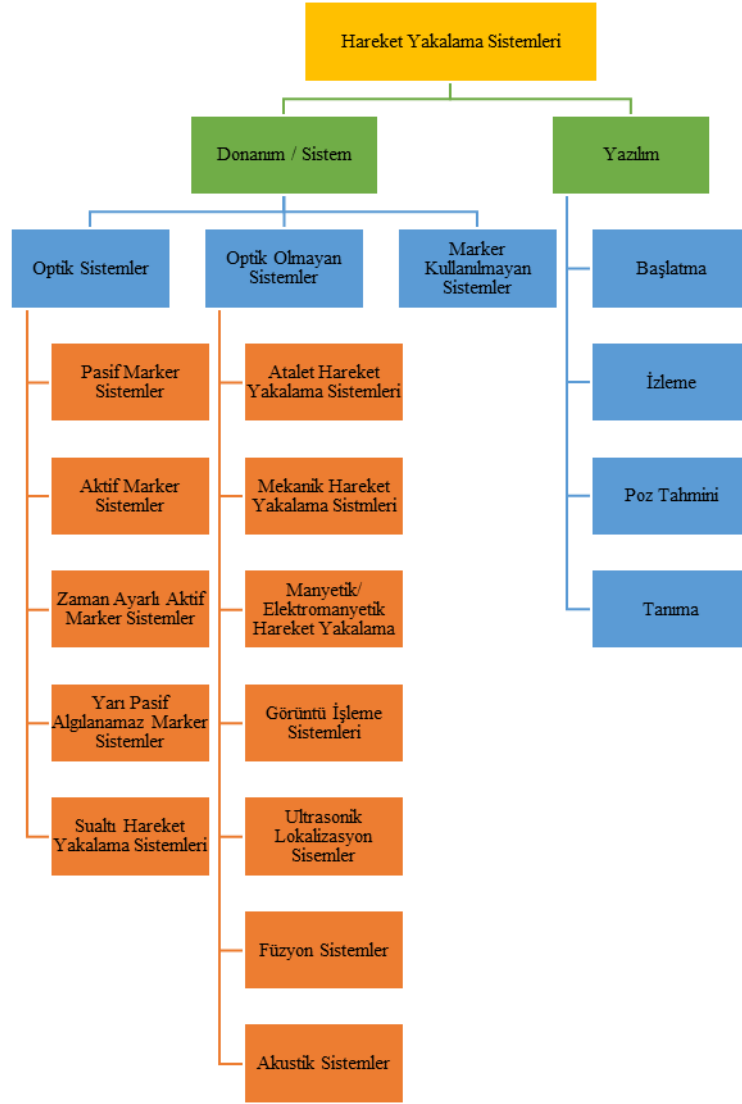


Şekil 1. (a) Bisikletin ana ölçüleri: sele yüksekliği (saddle height), sele arkası (saddle back), krank kolu uzunluğu (crank arm length), selenin üstü ile gidon freni arasındaki dikey mesafe (Handlebar-V) ve selenin önü ile gidonun ortası arasındaki mesafe, (b) Kinetik ve kinematik analiz [2].

Kinematik, yer değiştirme, hız ve ivme içeren nesnelerin hareketinin geometrisidir. Basit bir ifadeyle kinetik, harekete neden olan kuvvetleri (yerçekimi, sürtünme vb.) incelerken, kinematik hareketin kendisini (hız, ivme, vb.) açıklamaktadır. Şekil 1’ de bisikletin ana ölçümleri, kinetik ve kinematik analiz mantığı verilmiştir. Sporunun performans analizi, uzun bir süre boyunca yapılan antrenmanın bir sonucu olarak sporcuların gelişmelerini, fiziksel kondisyon derecesini veya teknik uzmanlığı değerlendirmeyi amaçlar. Optimum performans ve teknik arayan spor eğitmenleri, özel bir antrenman planı geliştirir ve farklı araçlar aracılığıyla sonuçları izler [3]. Tüm bu sistemler, uygun eklem ve segment kinematiğini hesaplamak için vücut segmentlerinin hareketini izlemeyi amaçlar. Ek bilgiler için ise daha ileri işlemlerle ya cihazın kendisinden ya da karmaşık kas ve/veya iskelet modelleri aracılığıyla çıkarılabilir. Spor hareketi için insan hareketini analiz etmenin iki ana yöntemi vardır. İlk yöntem olan video tabanlı yaklaşımda kameralar kullanarak sporcuları antrenman veya yarışma sırasında kaydetmek ve onlara görsel geri bildirim sağlamak söz konusudur [4]. Bu geri bildirim, görev tamamlanır tamamlanmaz veya özel yazılımlar yoluyla ilgi çekici vücut yer işaretlerinin (body landmarks) manuel olarak dijitalleştirilmesinden sonra teslim edilebilir. İkinci yöntem ise, hareket yakalama (motion capture) olarak da bilinen otomatik izleme hareket analiz sistemleri, gecikmeli bir sayısallaştırma süreci olmaksızın insan hareketini gerçek zamanlı olarak izlemeyi ve kaydetmeyi amaçlar [5]. Bu sistemler, kızılötesi ışıkla çalışan çoklu video kameralardan, sahneden derinlik bilgisi almak için ek sensörlere sahip tek kameralı sistemlere kadar çeşitli yakalama teknikleri kullanır [6]. Hareket yakalama, bir canlı hareket olayını kaydetme ve zaman içinde bir dizi önemli noktayı izleyerek ve performansın iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) temsilini elde etmek için birleştirerek bunu matematiksel terimlere yazmak işlemidir. Kısacası, canlı performansını dijital performansına dönüşümü mümkün kılan teknolojidir. Biyomekanik, navigasyon, simülasyon, sanal gerçeklik ve animasyon gibi birçok alanda kullanılan hareket yakalama teknolojisinin önemi giderek artmaktadır. Zaman içinde optik, optik olmayan ve işaretli gibi farklı hareket yakalama yaklaşımları geliştirilmiştir. Hareket yakalama, teknik ve yarışma değerlendirmesi gibi çeşitli spor disiplinleri ve etkinliklerinde nicel amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Ayrıca, biyomekanik bir perspektiften hareket yakalama, araştırmacıların insan hareketini yöneten mekanik hakkında bilgi edinmelerine yardımcı olan birincil veri kaynağıdır. Bu çalışma, bir sporunun vücut segmentlerinin küresel konumunu kaydetme yöntemleri ile ilgili çalışmalar içermektedir. Ölçüm sistemlerinin doğruluğu ve pratik kullanımı hakkında bilgi almak yoğun zaman gerektirmektedir. İç mekân/dış mekân gibi farklı konumlar, sıcaklık ve nem gibi hava koşulları, gürültü, saçılma, manyetik bozulmalar gibi ölçüm parazitleri ve alanda kapamaya (occlusion) neden olan engeller gibi çeşitli zorluklarla karşılaşılabilir.

2. Hareket Yakalama Sistemi

Hareket yakalama, kullanıcıların bir nesnenin hareket desenlerini kaydetmesine olanak tanımaktadır. Hareket yakalama sürecinin veya tekniğinin kullanılmasının temel nedeni, gerçekçi sonuçlar elde etmenin kolay olmasıdır. Bir oyun veya filmin yapımcıları, sanatçıların vücudunun ve yüzünün karmaşık hareketini hareketli bir karaktere iletme için hareket yakalama teknolojisi kullanmaktadır. Hareket yakalama teknolojisi kullanan bazı alanlar; Mühendislik, Hukuk, Eğlence Dünyası, Bilgisayar Oyunları, Televizyon ve Sinema Filmleri, Sağlık Sektörü, Spor Mühendisliği, Savunma Sanayidir [8].



Şekil 2. Hareket yakalama sistemlerinin donanım ve yazılıma göre sınıflandırılması.

Özel yazılım modülleriyle birlikte, veri toplama ve analiz ve raporlamaya kadar araştırma çalışmaları için hareket yakalama teknolojisi kullanılabilir. Elde edilen hareket yakalama verileriyle biyomekanikte yüksek performans, hassasiyet ve kullanılabilirlik sunar. Kuvvet plakaları, EMG' ler ve analog sinyal gösterimi gibi üçüncü parti ekipmanlara destek verir niteliktedir. Şekil 2' de görüldüğü üzere hareket yakalama sistemleri donanım ve yazılım olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. Donanım kısmı algılama işlemlerinin yapıldığı bölümdür. Donanım elemanları elektromekanik, optik fiberler, LED' ler, akustik, geri yansıtıcı markerlar, sensörler ve kameralardan oluşmaktadır. Algılama ortamından alınan veriler yazılım modülü ile verileri işleyecek konuma gelmeden önce başlatılması gerekir. Ardından sporcu gözlemlenir ve izleme kare kare yapılır. Bu, sporcunun arka plandaki segmentasyonudur. Elde edilen verilerden bilgi edinmek amaçlı gerçek zamanlı poz tanıma yapılabileceği için sporcunun duruşunun tahmin edilmesi gerçekleştirilir. Spor performans analizi, basit ve yaygın olarak kullanılan bir insan bilgisayar ara yüzü gibi aktif görüşe dayalı hareket yakalama teknolojileri sahada kullanılmaktadır, ancak yeterli çevresel kontrol gerektirmektedir. Kablo veya tel gerektirmeyen elektromanyetik dalgalar gibi doğal sinyallerin kökenlerine dayanan pasif yorumlama akıllı izleme ve İnsan Bilgisayar Etkileşimi (Human Computer Interface - HCI) regülasyonu alanlarında uygulanır [9]. Çalışmada, kullanılan sistem, kamera veya sensör özellikleri ve sayısı, frekans veya fps değerleri ve yerel koordinat sistemi tanımlama türü dâhil, genel olarak kinematik modeller verilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen fonksiyonel görevler ve ana sonuç çıktıları gibi metodolojik faktörlere odaklanılmıştır.

2.1. Optik sistemler

Optik algılama, geniş ve değişken bir teknoloji koleksiyonunu kapsar. Görüntü tabanlı sistemler, belirli kemik noktalarıyla hizalanmış, öznenin vücut bölümleri üzerinde önceden belirlenmiş noktaları markerlar ile izlemek için birden fazla kamera kullanarak konumu belirleme işlemidir. Pozisyon, çalışma hacminin birden fazla 3D görüntüsü kullanılarak tahmin edilir. Stereometrik teknikler, her bir görüntüdeki izlenen nesnelere üzerindeki ortak izleme noktalarını ilişkilendirir ve bu bilgiyi, her bir görüntü ve kamera parametreleri arasındaki ilişki ile ilgili bilgilerle birlikte konumu hesaplamak için kullanır. Optik sistemler; pasif marker sistem, aktif marker sistem, zaman modülasyonlu aktif marker sistem, yarı pasif algılanamaz marker sistem ve sualtı hareket yakalama sistemlerinden oluşmaktadır. Markerlar pasif (yansıtıcı) veya aktif (ışık yayan) olabilmektedir [10]. Yansıtıcı sistemler, kamera merceğinin etrafına monte edilmiş kızılötesi (IR) LED' leri, kamera merceğinin üzerine yerleştirilen IR geçiş filtreleri ile birlikte kullanır ve markerlardan yansıyan ışığı ölçer. Darbeli LED' lere dayalı optik sistemler, gövde bölümlerine yerleştirilen LED' lerin yaydığı kızılötesi ışığı ölçer. Ayrıca, doğal nesnelere markerların yardımı olmadan kamerayla izlenmesi mümkündür, ancak genel olarak daha az doğrudur. Büyük ölçüde görüntü tanıma için computer vision tekniklerine dayanır ve genellikle yüksek hesaplama kaynakları gerektirir. Optik sistemler, gerekli bir ışık yolu engellendiğinde kapama (occlusion) sorunlarını içermektedir. Diğer ışık kaynaklarından veya yansımalarından kaynaklanan parazit de sözde hayalet markerlarla sonuçlanabilecek bir sorun olabilir [11].

Tablo 1. Optik sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera /Sensör Sayısı, Frekans(fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[12-17]	Qualisys, Vicon, M. Analysis 5, 8, 16 100-250 Hz	10 – 89 arası sporcu 8 erkek + 7 kadın 15 erkek + 15 kadın	Koşu	Ayakkabısız koşmak, ayağın yere vuruş modellerini değiştirmektedir ve diz ekstansiyon eklem momentlerini azaltmaktadır. Ayrıca ön çapraz bağın, ayakkabı giyildiği zamana göre daha az gerilmesine neden olur ve ön çapraz bağ yaralanmasıyla ilgili istenmeyen mekanikleri azaltabilir. Erkek rekreasyonel koşucularda aşıl tendon patolojisi açısından daha büyük risk altında olabilir. Kararlılık, hareketlerin hızı üzerindeki kısıtlamalar değiştirildiğinde düzenlenir, bu nedenle yavaş koşma, hızlı koşmadan daha kararlıdır. Hızlandırılmış koşudaki skapular davranış üst ve alt ekstremite hareketlerine katkıda bulunur ve hızlı bir sprint için tüm vücut dengesinin koordinasyonunu kolaylaştırır. Atel koşullarının kontrol koşulundan daha simetrik bir koşu düzenine yol açtığını ortaya çıkardı.
[18]	Vicon, 8, 200 Hz	15 sporcu	Ragbi	Katılımcıların tee koşullarında değişkenlik olmasına rağmen, tee yanındaki son ayak pozisyonu çok benzer ve tutarlı olabilir.
[19-22]	Vicon, M. Analiz 8 250 – 500 Hz	19 – 40 arası sporcu 10 erkek sporcu	Beyzbol	Oyun boyunca top hızını takip etmek, atıcıya anlık geri bildirim sağlar, bu bilgi top hızını korumak için gereklidir. Adım uzunluğu, top hızını bozmadan fiziksel eforu etkileyebilir, burada kısalan adımlar beyzbol atıcılarında rekabetçi eforlara makul bir şekilde yanıt verebilir. Hızlanma aşaması sırasında etkileşim torkunun kullanımı ile ilişkili sıraya bağlı dönüş eksenini değişiklikleri, topun serbest bırakılmasında el hızının üretiminde önemli bir faktör olabilir.
[23]	Qualisys, 7, 100 Hz	9 erkek sporcu	Cross-country sky	Çift kutuplama, esas olarak ters sarkaç veya yaylı kütle tipi ile karakterize edilen, diğer birçok bacaklı karasal hareket biçiminden farklı benzersiz bir hareket modelini içerir.
[24, 25]	Optitrack, Vicon 8, 10, 12 100 – 120 Hz	1 – 13 arası sporcu	Yürüyüş	Yürüme sırasında yürüme hızı, yüzey eğimi ve bireylerin boyuydu. Optitrack sistemi, daha eski ve hala yaygın olarak kullanılan bir sistemle karşılaştırılabilir, işaretçi izleme doğruluğu ve güvenilirliği sunabilen düşük maliyetli bir 3D hareket analiz sistemi sağlar.
[26]	Vicon, 8, 250 Hz	8 erkek sporcu	Masa Tenisi	Raket kütlesi ve hızı, masaya yakın oynamanın ve ralli hızını hızlı hale getirmenin avantajlarından birini vurgular.
[27]	Qualisys, 8, 250 Hz	8 erkek + 8 kadın sporcu	Eskrim	Kadınlar, hamlenin sonunda daha fazla diz abduksiyonu ve daha fazla kalça adduksiyonu ürettiler, bu nedenle eskrim hamlesi sırasında üretilen daha fazla diz abduksiyonu ve kalça adduksiyonu nedeniyle daha fazla diz yaralanması riski altında olabilirler.
[28-32]	Vicon, Qualisys 8, 10 250-500 Hz	50-285 arası, 34 erkek sporcu	Golf	Kulüp başı sunumundaki farklılıklar, topun fırlatma koşullarında değişikliklere neden oldu. Darbe konumu değişkenliği, fırlatma açısının ve toplam mesafe değişkenliğinin belirlenmesinde rol oynar. Dirsek - omuz hareketi ve gövde tilt analizi, Sagittal ve koronal düzlemde dirsek açısı tahmini. Bilek, dirsek ve omuz hareket tahmini. Üst uzuv hareket analizi

[33-48]	Derinlik Kamera (Leap Motion Controller) , Çoklu Kamera (Qualisys, Vicon, BTS SMART-D) 12, 24 240-300 Hz	8-20 arası, 28 kadın sporcu	Tenis	Tenis servisi sırasında uygun olmayan enerji akışı ve geçici mekanikler top hızını azaltabilir, üst ekstremitte eklem kinetiklerini artırabilir ve bu nedenle muhtemelen üst ekstremitenin aşırı kullanım yaralanmalarını artırabilir. Pelvisin tepe açılma hızları, üst gövde, gövde rotasyonları ve omuzlar arasındaki süre, üst ekstremitte eklem kinetiği ve top hızı ile önemli ölçüde ilişkilidir. Maksimum açılma hızların zamanlamasındaki tutarlılık, ileri düzey tenisçilerin kas yorgunluğuna rağmen servis tekniklerinin zamansal modelini koruyabildiklerini göstermektedir. Sınırlı ölçüm alanında sadece pozisyon tespiti yapılmıştır; tıkanıklıklar ve işlem sonrası gecikme mevcuttur, hassasiyet 1mm'den küçüktür ve sistem kablosuzdur.
[49-54]	Vicon, 8, 100 Hz	3 erkek sporcu	Kürek	Bir hareket edinim sistemi, bir EMG sistemi, bir ergometre ve bir kalp atış hızı monitörü ile kürekçilerin disiplinler arası bir araştırmasının geliştirilmesi odaklı çalışılmıştır.
[55]	Vicon, Optitrack 8, 10 250Hz	8 erkek sporcu	Bowling	Gövde momentlerinde ve lomber omurga kuvvetinde iki tür kriket bowling tekniği arasında anlamlı bir fark bulunmadı, bu nedenle max-gövde tekniği bel yaralanma risklerini artırmayabilir.
[56]	M. Analysis, 10, 200 Hz	4 sporcu	Buz Hokeyi	Lineer ve açılma hızları, doğruluk ve pakın devrilmesi, çıplak hokey sopası/normal hokey eldivenleri ve kalan üç kavrama koşulu arasında farklı olmadığı görüldü.
[57]	GoPro, 2, 60 Hz	2 SCF	Yüzme	Aksiyon kameraları, uygun bir kalibrasyon metodolojisi (kullanışlı araçlar ve paket ayarı) aracılığıyla doğru bir metrik sistem haline getirilebilir.
[58, 59]	Vicon, Optitrack 8, 12 100Hz	1-3 arası SCP	Laboratuvar	NaturalPoint OptiTrack kamera sistemi, biyomekanik ve diğer ilgili alanlarda kesinlikle kullanılabilir güvenilir bir çalışma sistemidir. Düşük maliyetli hareket yakalama sistemleri genel kullanım için yeterince doğrudur; bununla birlikte, Vicon sistemi, çok daha kısa etiket etiketleme süresi ile NaturalPoint sisteminden daha iyi performans gösterdi.
[60- 62]	Vicon, Optitrack, Qualisys 10, 8, 6 100-250 Hz	31-40 arası erkek sporcu, 16 kadın sporcu	Atlama	Kol sallama, daha büyük net eklem momentleri ve segment ivmeleri ile ilişkili olan ve hepsi birlikte daha iyi dikey sıçrama performansına katkıda bulunan bir proksimalden distale stratejinin kullanımını teşvik eder. Atlama minderi sistemleri, atlama yüksekliğindeki değişiklikleri izlemek için güvenilir ölçümler sağlar. Ayak uzunluğu, hareket yakalama ile önemli ölçüde daha yüksek atlama yüksekliğini açıklayabilir.
[63-65]	Qualisys, 8, 240 Hz	8 – 10 arası sporcu	Tekvando	Eş fazlı hareket gerektiren egzersizleri dahil etmek, sporcuların sadece koordinat stabilitesi kazanmalarına değil, aynı zamanda verimlilik kazanmalarına da yardımcı olabilir. Sporcular dairesel vuruşta en iyi performansı elde etmelerini sağlayamayacağından 90° duruş pozisyonunu benimsememelidir.
[66]	Qualisys, 6, 500Hz	12 erkek sporcu	Powerlifting	Halterin dirsek eklemi etrafındaki moment kolundaki farklılıklar nedeniyle, eklem açısına özgü toplam kuvvet üretimi için hala zayıf bir mekanik bölge olabilir.
[67]	Vicon, 10, 250 Hz	31 sporcu	Avustralya Futbolu	Direnç antrenmanı ve beceri kazanım programları, vuruş isabeti ile göreceli zayıf kütle pozitif korelasyon gösterdiğinden, vuruş isabetliliğinin geliştirilmesinde rol oynayabilir.
[68]	Vicon, 10, 250 Hz	8 kadın sporcu	Jimnastik	Çalışma, kalça fleksiyon-abdüksiyonunu artırmak, bacak ve kol açılma momentumunu gövdeye aktarmak ve çubuğa giden el yolunu düzeltmek için yönergeler sağladı.
[69]	Vicon, 12, 200 Hz	10 sporcu	Unihockey	Top hızı temel olarak, kalçanın ve gövdenin rotasyonu ve elinin kol üzerindeki rotasyonu ve kaçırma hareketleri nedeniyle destek bacağının (ayak bileği, diz ve kalça) esnekliğinden etkilenmiştir.
[70]	Vicon, 6, 200Hz	18 erkek sporcu	Kriket	Omuz ve bacak hareketi ile ilişkili ve adım uzunluğunun önemi ve eğitilebilirliği nedeniyle, kriketçiler topu almak için ivmeyi artırmayı hedeflemelidir.
[71-76]	Qualisys, BTS, Vicon 4, 10, 9, 6 60-500 Hz	10 – 22 arası sporcu	Futbol	Daha hızlı oyuncular topla daha kısa bir yoldan daha ekonomik bir şekilde koşabilirler, bu nedenle antrenörler yüksek adım sıklığı ve dar koşu yörüngelerinin gerekli olduğu özel uygulamalar tasarlamaya teşvik edilir. Oyuncular, top hızına ve potansiyel olarak genel performansına en güçlü katkısı sağlayan diz ekstansiyon açılma hızının iyileştirilmesine yönelik antrenörlerden yararlanabilirler.
[77]	Qualisys, 8, 236 Hz	7 sporcu	Ski cross	İç mekan antrenman rampalarının elit sporcuları eğitmek ve izlemek için daha uygun olduğu belirlendi.
[78]	Vicon, 10, 200 Hz	24 sporcu	Badminton	Gövde dönüşünün, raketle serbest bırakma hızını en üst düzeye çıkarmak için forehand şutunun kalitesinin önemli bir ölçüsü olarak belirlendi.

Gerçek sistemler, saniyede 100 kareden (fps) 500 fps' ye kadar yakalayabilir, ancak görüntü çözünürlüğünü azaltarak daha yüksek kare hızları elde edilebilir. Alternatif olarak, fps sayısı, 1 fps değeri 1 Hz değerine eşit olduğunda, görüntü yakalama frekansı Hertz (Hz) cinsinden de görüntülenir. Kızılötesi aydınlatma, 2 kHz' e kadar yansıtıcı markerların yüksek kontrastlı görüntülerinin yakalanmasını sağlar. Optik hareket yakalama, beyzbolda adım uzunluğu [20] veya sıraya bağlı dönüş eksenleri [21], tenis ve golf sporunda üst ekstremite eklemine [34 - 36] alt gövde [28] ve gövde dönüşü [31] gibi çeşitli biyomekanik koşulların bir fonksiyonu olarak top hızını değerlendirmek için kullanılan materyallerle birlikte sporda kullanılmıştır.

2.2. Optik olmayan sistemler

Optik olmayan sistemler, uzaydaki konumları hakkında veri göndermek için vücut parçalarına bağlı sensörler kullanır. Optik olmayan sistemler inersiyel (atalet) sistemleri, mekanik sistem, manyetik/elektromanyetik sistem, germe sensörleri, görüntü işleme, ultrasonik lokalizasyon sistemi, füzyon sistemi ve akustik sistemleri içermektedir. İlerleyen bölümlerde ilgili başlıkların ayrıntılı açıklamalarına yer verilmiştir. Elektromanyetik sistemler, güçlü bir kaynak tarafından oluşturulan iyi tanımlanmış bir elektromanyetik alan içinde küçük elektrik bobinlerinden (sensör başına üç, ortogonal olarak) oluşur. Bobinler sabit bir manyetik akım içinde küçük voltaj veya akım ürettiğinde sporcunun hareketleri izlenir.

Tablo 2. Optik olmayan sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera / Sensör Sayısı, Frekans (fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[79-85]	IMU, EM 1 60-100 Hz	4 sporcu	Koşu	Sık ve hızlı duruşlar, kas ve eklem yorgunluğunun daha erken başlamasına ve yaralanma olasılığının artmasına neden olabilir. Geleneksel ayakkabı tipinde ve minimalist ayakkabı tipinde 50 km'lik koşudan sonra, uzun mesafe, sürekli hızlı koşu sırasında motor ünite işe alım modelinde bir değişiklik olabilir.
[86, 87]	EM, IMU, Vicon 2 100-300 Hz	41 erkek + 41 kadın sporcu	Atlayış	Daha büyük sagittal düzlem ilk darbe fazı enerji emilimi muhtemelen daha fazla ön çapraz bağ yüklemesini gösterirken, ön düzlemde daha az elverişli ön düzlem biyomekaniği ile ilişkilendirilmiştir. Kinematik parametrelerdeki değişiklikler, koşullar arasında belirgin ve birkaç değişiklik, sıçrama performansındaki değişikliklerle önemli ölçüde ilişkilidir.
[88-92]	IMU, Qualisys, M.Analysis, Probe, Radar, Vicon 1, 2, 8, 10 100-200 Hz	7 erkek + 7 kadın sporcu 7 kadın + 6 erkek sporcu	Yürüyüş	Bu yeni yürüyüş kayıt sistemleri, yürüme hızından bağımsız olarak adım döngüsünün %51'inde güvenilir bir şekilde topuk-off momenti gibi zamansal ve uzamsal tanımlayıcıları değerlendirmeyi amaçlar. Elde edilen ve dikey ivmeden elde edilen sonuçlar mükemmel bir uyum içindeydi, bu da ivmenin ivme boyutlarını bağımsız olarak ele almaya uygun bir alternatif olduğunu gösteriyor. Ultrason ve hareket yakalama, intrinsik ayak kinematığının daha doğru ölçümlerini sağlamaya yardımcı olabilecek invazif olmayan bir tekniktir. Sistemin ev ortamlarında günlük yürüyüş değerlendirme aracı olarak kullanılabilmesi, düşme riski değerlendirmesi ve diğer sağlık uygulamaları için faydalı olması. Fonksiyonel yerleşimlerde bulunan giyilebilir teknolojilerin potansiyel kullanımı, egzersiz sırasında denek performansını değerlendirmek için geçerlidir ve kabulü artırmak için fonksiyonel çözümler önerir.
[93, 94]	IMU, 2, 500 Hz	4 erkek + 6 kadın sporcu	Cross-country sky	Bu çalışma, kutuplarda ve kayaklarda IMU' ları entegre ederek çapraz adımlı XC kayakta uzamsal-zamansal parametreleri ölçmek için kullanımı kolay bir sistem tanıttı.
[95-104]	IMU, Vicon 1,7 200 Hz	12 sporcu	Dağ Kayağı	Uyarlanan algoritmanın koşu bandında kayakla dağcılık için uzaysal-zamansal parametreleri ölçmek için geçerli olduğu kanıtlandı ve kar üzerinde benzer şekilde performans göstermesi bekleniyor.
[105]	IMU, Vicon 5, 7 100 Hz	1 sporcu	Kürek	Enstrümanlı tekne veya simülatörden toplanan veriler ile atalet sensörlerinden elde edilen vücut hareketi verilerinin birleştirilmesine dayanan, dış mekan kürek performansını izlemek için yeni bir yaklaşım.

[106]	IMU, 1, 120 Hz	6 sporcu	Alp Kayağı	Sert, donmuş yüzeylerde geniş bel genişliğine sahip kayaklar, diz eklemini enine ve ön düzlemlerde ROM'un sonuna olumsuz bir şekilde yaklaştırabilir ve böylece diz yaralanmaları riskini artırır.
[107-115]	EM, 12, 240 Hz	20 erkek sporcu	Bezbol	Aşırı yüklemeli ısınmada, bezbol oyuncuları, aktivasyon sonrası güçlendirmenin etkisini en üst düzeye çıkarmak ve etki yorgunluğunu en aza indirmek için 3 dakikalık dinlenme ile en az 3'ten fazla kuru vuruş yapmalıdır.

Her sensör konum ve oryantasyonu aynı anda okuyabilir, ancak sensörlerin yakınındaki herhangi bir metal nesne manyetik alanda bozulmalara neden olarak ölçüm doğruluğunu bozabilir [79, 86, 107]. Örneğin, kollar üzerindeki ağırlık takviyesinin yanı sıra sopanın kendisi, 4" x 4" global referans çerçeve vericisiyle etkileşimi önlemek için değildir. Bu kayıtlarda, 60 Hz [79] ile 120 Hz [86] arasında değişen tek sensörlü bir kurulumda 240 fps' de çalışan 12 sensörlü bir kurulum olmak üzere iki çalışma mevcuttur. Genel olarak, bu tür sistemler, referans kriteri olarak optik sistemlerle karşılaştırılır veya yukarıda açıklanan özelliklerle verileri tamamlamak için bunlarla birlikte kullanılır. Ancak, bir Gerçek Zamanlı Kinematik Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GZ KKN), alperde kayakları izlemek için atalet verilerini yüksek çözünürlüklü ve yüksek frekanslı gerçek zamanlı coğrafi konum belirleme ile birleştirmek için kullanılır. Benzer şekilde orta ile üst göğüs vertebraına (omurlara) yerleştirilmiş $\pm 8g$ üç eksenli ivmeölçerli bir IMU (Inertial Measurement Unit) ve zemin etkilerinin ilk IMU tarafından sağlanan $\pm 8g$ aralığını aşmasının beklendiği durumlarda koşudaki dikey ivmeleri ölçmek için distal fibulalara (ayak bileğine) bağlı 100 g'lık bir ivmeölçer içeren ek bir özel yapım IMU' ya sahip bir IMU kullanmıştır [80]. Belirli konumlarda bir veya iki IMU bulunan her bir çalışmadaki IMU' ların sayısı son derece düşüktür. Ancak dış mekan kürek çekme performansını farklı aletlerden izlemek için bunlardan biri de gövdenin orta noktasında bulunan bir IMU ve her üst uzuv için kolda ve ön kolda bulunan iki IMU kullanılarak yeni bir yaklaşım önermiştir [105]. Bu çalışma, IMU' ların potansiyellerinden birinin, düşük kütleleri ve minimum saldırgan davranışları nedeniyle iç ve dış mekan deneyleri için uygunlukları olduğunu göstermektedir.

2.3. İşaretsiz (Markerless) sistemler

Nesnelerin izlenmesi için özel ekipman giymesi gerekmeden video ve diğer sensörlerden 3D hareketi yeniden oluşturmak için gelişmiş bilgisayarlı görüntü işlemedir. Genel olarak, kızılötesi ve ultrasonik sensörlerle birlikte bir veya iki normal video kameradan oluşan vücut bölümlerinin ve eklemlerinin çıkarılacağı insan formlarını tanımlamak için kullanılır.

Tablo 3. İşaretsiz sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera /Sensör Sayısı, Frekans (fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[116-122]	Video, Microsoft Kinect, Leap Motion controller, RGB Kamera	7 erkek sporcu	Tenis	Arkaya yönlendirilmiş daha büyük omuz kuvvetlerine sahipken, düz servis, dilim servise kıyasla önemli ölçüde daha yüksek maksimum omuz iç rotasyon hızına sahip olduğu belirlendi. Omuz eklemi kinematığı. Üst vücut, önkol, el, parmak hareketi. El hareketi için sınıflandırma teknikleri analizi. Yüksek gürültü, tıkanıklıklar, yüksek işlem maliyeti, genellikle gerçek zamanlı değildir ve aydınlatmaya karşı yüksek hassasiyetli. Kablosuz dış mekan, esnek, sensör yükü yok ve bağlamsal bilgi belirlendi.
	8			
	200 Hz			
[123-128]	Kinect, Vicon, Video, Xtion, RFID etiketler, Qualisys	1-21 arası sporcu,	Yürüyüş	Kinect, klinik yürüyüş analizi için düşük maliyetli, gelecek vaat eden bir geliştirme prosedürüdür. Kinect, adım zamanlamasını ölçmek için uygun bir araç olmak için temel hareket yakalama yeteneklerine sahiptir, ancak klinik kullanım için uygulanmadan önce hassasiyetini artırmak için daha fazla ilerleme gereklidir. Fleksiyon/ekstansiyon açılarının yanı sıra kalça abduksiyonu/addüksiyonu, marker bazlı sistemden elde edilenlere çok benzemektedir. Ancak iç/dış rotasyonlar, diz abduksiyonu/addüksiyonu ve ayak bileği inversiyonu/eversiyonu daha az güvenilir. Önerilen koşu bandı,
	8, 12	5 erkek + 5 kadın		
	30-120 Hz			

				bir hareket yakalama sistemi ve aletli bir koşu bandı içeren tipik, maliyetli, etkileşimli bir koşu bandına benzer bir performansa ulaşır. Yöntemin ilk geliştirme aşamasında olmasına rağmen, sonuçlar umut vericidir ve hareket bilgilerinin RFID yanıt sinyallerinden çıkarılabileceğini göstermektedir.
[129]	Kinect, BTS	5 erkek + 5 kadın sporcu	Atlayış	Kinetik, geleneksel hareket analizi teknolojisi için uygun bir vekil olmayabilir, ancak patolojik/yüksek yaralanma riski popülasyonlarında gerçek zamanlı bir geri bildirim aracı olarak potansiyel uygulamalara sahip olabilir.
	8			
	30-250 Hz			
[130-133]	Video, Kinect, M. Analysis, Vicon	20 erkek sporcu,	Laboratuvar	Sonuçlar, hiperkinezili bireylerde hareketi ölçebilen, invazif olmayan bir yöntem olarak işaretsiz bir sistemin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini ortaya koymaktadır. Kinect, hareket paterni, güvenilirlik ve hesaplanan tepe açıları açısından işaretçi tabanlı sistemle uyumuştur, bu nedenle klinikte kullanılabilir, işaretçisiz, uygulanabilir bir hareket yakalama aracı olabilir. Kinect tekrarlanabilirliğinin, egzersiz için işaretleyici tabanlı sistem sonuçlarına istatistiksel olarak benzer olduğu bulundu. Ancak ölçülen ROM, sistemler arasında farklı bulundu. Kinetik, alt ekstremite kinematığını doğru bir şekilde ölçmek için etkilidir ve hasta popülasyonlarının eklem kinematığındaki klinik olarak anlamlı farklılıkları ayırt etmek için ilk adımı sağlar.
	8, 10, 14	48 sporcu		
	30, 200 Hz			
[134]	Kinect, Vicon	10 erkek sporcu	Stability	Kinect sistemi, toplam vücut kütle merkezi salınımlarının yüksek oranda ilişkili ölçümünü üretir, bu nedenle klinik salınımların değerlendirilmesi için hareket yakalama ve kuvvet plakası sistemine uygun maliyetli bir alternatiftir.
	8			
	30-240 Hz			

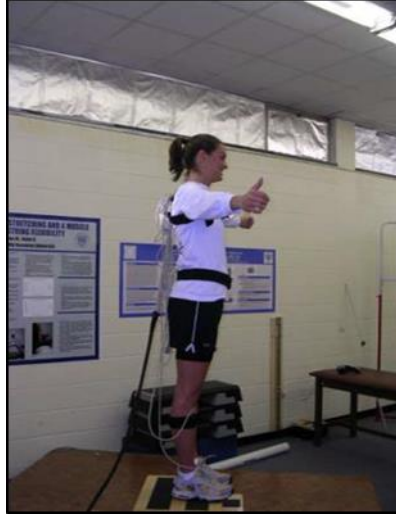
Bilgisayarlı görmede ortaya çıkan yeni teknikler ve araştırmalar, hareket yakalama teknolojisine yönelik markersız yaklaşımın hızla gelişmesine yol açmaktadır. Stanford ve Maryland Üniversitesi, MIT ve Max Planck Enstitüsü'nde geliştirilenler gibi markersız sistemler, deneklerin izleme için özel ekipman giymesini gerektirmez. Özel bilgisayar algoritmaları, sistemin birden çok optik girdi akışını analiz etmesine, insan biçimlerini tanımlamasına ve bunları izleme için kurucu parçalara ayırmasına imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. İşaretsiz sistemlerde kullanılan derinlik kamerasının dezavantajı, mekânsal ve zamansal doğruluk düzeyidir. Bu tür sistemlerdeki video kameralar genellikle 640x480 piksel çözünürlükte çalışır ve bu da oyunlarda vücut tanıma için yeterlidir ancak amaç bir vücut segmentinin hareketini izlemek olan uygulamalarda bazı sorunlar ortaya çıkabilir.

3. Hareket Yakalama Teknolojisi ve Spor Türleri

Bir ülke içerisinde herhangi bir spor dalını uygulamak ve o sporla uğraşmak için var olan şartlar olgunlaştıkça bireylerde her zaman profesyonelleşme dürtüsü ortaya çıkar. Çünkü şartlar iyileştikçe daha fazla o sporla uğraşmak ve daha iyi performans sergilemek kaçınılmaz bir istektir. Ancak spor aktivitesindeki kullanım artışıyla birlikte birkaç problemle karşılaşmak olası bir sonuçtur. Bu problemler başlıca spor sırasında sakatlanma ve yaralanmalardır. İyi teknikten en küçük sapma bile yaralanmalara neden olabilir veya aksi takdirde sporcu performansını azaltabilir. Yanlış spor yapım veya araçların yanlış kullanımları sonucu vücuttaki verimlilik oranının düşmesi, fazla güç kaybı ve spor sırasında yapılan hataların tespit edilememesi karşılaşılan problemlerdendir. Bu problemlerin çözümleri için açıklanan hareket yakalama sistemleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Elektromanyetik sistemler (Electromagnetics Systems - EMS)

Manyetik sistemler, hem verici hem de alıcıdaki birbirine dik üç bobinin bağlı manyetik akışına göre konumu ve yönelimi hesaplar. Üç bobinin voltaj veya akımının göreceli yoğunluğu, bu sistemlerin izleme hacmini ayrıntılı haritalayarak hem menzili hem de yönelimi hesaplaması imkânını verir. Sensör çıkışı 6 DoF olmakta ve optik sistemlerde gerekli olan marker sayısının üçte ikisi ile elde edilen dirsek pozisyonu ve dirsek açısı için biri üst



Şekil 3. Manyetik/elektromanyetik hareket yakalama sistemi [135].

kolda ve biri alt kolda olmak üzere etkili sonuçlar sağlamaktadır. İşaretler metalik olmayan nesnelere tarafından kapatılmaz. Ancak manyetik alanı etkileyen inşaat demiri veya kablolar gibi çevredeki metal nesnelere ve monitörler, ışıklar gibi elektrik kaynakları sebebiyle manyetik ve elektriksel parazitlere karşı hassastır. Özellikle yakalama alanının kenarlarına doğru sensör tepkisi doğrusal değildir. Sensörlerden gelen kablolar, aşırı performans hareketlerini engelleme eğilimindedir. Manyetik sistemlerle, bir hareket yakalama oturumunun sonuçlarını gerçek zamanlı olarak izlemek mümkündür. Manyetik sistemler için yakalama hacimleri, optik sistemler için olduğundan önemli ölçüde daha küçüktür. Manyetik sistemlerde, alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) sistemleri arasında bir ayrım vardır. DC sistemi kare darbeler kullanır, AC sistemleri sinüs dalgası darbesi kullanmaktadır [135]. Elektromanyetik sistemler, transponderden bazı istasyonlarına giden elektromanyetik dalgalarının (radyo dalgalarının) uçuş süresi vasıtasıyla ölçüm transponderlerinin bilinmeyen konumlarını bulur [136]. Bir OMS' den farklı olarak, transponderlerin konumlarını bulmak için görüş hattı gerekli değildir. Ayrıca insan vücudu uygulanan alan için şeffaftır [137]. Deneysel kurulumla ilgili olarak sistemin sınırlamaları, ortamdaki ferromanyetik malzeme için verilerin doğruluğunu azaltan hassasiyettir [138]. Üstelik bazı istasyonu ile transponder arasındaki mesafe arttıkça gürültü artmakta ve sinyal kalitesi düşmektedir [138, 139]. EMS genellikle spor analizi için bir dezavantaj olan düşük örnek frekanslarına sahiptir. Birden fazla işaretleyici kullanıldığında frekanslar düşer.

3.2. Atalet ölçüm birimi (Inertial Measurement Unit - IMU)

İnarsiyal (atalet) sistemi teknolojisi, ivmeölçerler içeren küçük mikromekanik sensörler olan genellikle üç koordinatı ölçmek için üç eksenli ve genellikle jiroskoplar ve manyetometrelerle birleştirilen atalet ölçüm birimlerine dayanan başka bir optik olmayan sistem türüdür. Statik nesnelere için, ivmeölçerler açısal dönüşleri ölçebilir, ancak dinamik hareketler için jiroskoplar ve manyetometreler, sensör füzyon algoritmaları aracılığıyla ivmeölçer ile birleştirilir. Atalet sistemi verileri, sensör başına 6 DoF serbestlik derecesi ile gerçek zamanlı olarak genellikle kablosuz olarak bir bilgisayara iletilir. Literatürde genellikle hız entegre jiroskopları ve ivmeölçerler olarak anılırlar. Sistemin kalitesi sadece içerdiği algılama unsurları tarafından değil, aynı zamanda sinyal işleme hattının kalitesi ile de belirlenir. Atalet sensörleri sırasıyla kuvvetler veya torklardan etkilenmedikçe, sabit öteleme ve dönme hızını korumak için cisimlerin özelliğini kullanmaktadır. İç kulakta bulunan vestibüler sistem biyolojik bir 3D atalet sensörüdür. Başın doğrusal ivmesinin yanı sıra açısal hareketi de algılayabilir. Vestibüler sistem, gözlerin çevreye göre dengesini ve stabilizasyonunu sağlamak için önemlidir. Pratik atalet takibi, özellikle silikon ivmeölçerler ve hız sensörlerinde minyatürleştirilmiş ve mikro işlenmiş sensör teknolojilerindeki gelişmelerle mümkün kılınmıştır. Bir hız jiroskopu açısal hızı ölçer ve eğer zaman içinde entegre edilirse, başlangıçta bilinen bir açıya göre açıdaki değişikliği sağlar. Bir ivmeölçer, yerçekimi ivmesi g dahil olmak üzere ivmeleri ölçer. Küçük ve ucuz sensörlerle ilişkili gürültü ve önyargı hataları, herhangi bir telafi uygulanmadığında uzun süre yön ve konumun izlenmesinde pratik değildir. Atalet sensörlerinden gelen sinyalleri yardımcı / tamamlayıcı sensörlerle birleştirerek ve sinyal karakteristikleri hakkındaki bilgileri kullanarak sapma ve diğer hatalar en aza indirilebilir.



Şekil 4. Atalet hareket yakalama sistemi [140].

Atalet sistemlerini kullanılması hızlı, kolay kurulum nedeniyle ve dar alanlarda avantajlıdır fakat düşük konumsal doğruluğu ve zamanla birleşebilen konumsal kayma nedeniyle dezavantajlı bir sistemdir. Zeminin yönünü bir dereceye kadar doğru bir şekilde ölçebilirler. Sistemin taban fiyatları 1.000 Amerikan Doları ile 80.000 Amerikan Doları arasında değişmektedir.

3.3. Görüntü işleme sistemi (Image Processing System - IMS)

IMS genellikle EMS ile karşılaştırıldığında daha iyi doğruluğa ve OMS ile karşılaştırıldığında daha iyi bir aralığa-menzile sahiptir. Görüntü işlemede çekilen filmler veya fotoğraflar dijital olarak analiz edilir. Sensör tabanlı olan diğer ölçüm yöntemlerinin aksine, bu yöntem optik kameralar ve bilgisayarlı görme algoritmaları (computer vision algorithms) kullanılarak görüntü tabanlıdır. Bu işaretli izleme, olay tespiti (event-detection) gibi durumlarda sporlarda büyük bir avantaj olabilir [142]. Görüntü işlemenin bazı dezavantajları da vardır bunlar gerçek zamanlı görüntü tanıma gerçekleştirmek kolay değildir ve pahalıdır, yüksek kaliteli ve/veya yüksek hızlı kameralar gerektirebilir. Doğruluk aynı zamanda deneysel kurulumla, yani kameranın nesne yörüngesine göre konumu ve kamera sayısına da bağlıdır [143]. Ayrıca, genel olarak, kamera çözünürlüğündeki bir artış, uygulanabilir maksimum örnekleme frekanslarında bir azalma ile sonuçlanır. Görme tabanlı sistemler (vision-based) iki kategoriye ayrılabilir: Model tabanlı izleme (model-based tracking) ve özellik tabanlı izleme (feature-based tracking). Model tabanlı izleme, izlenen nesnenin 3D modelini kullanır. Model tabanlı izlemenin temel konseptinde, her video karesinde poz bilgisi, önce bir tahmin filtresi aracılığıyla dinamik bir model kullanılarak ve ardından video karesindeki ölçümlerle güncellenir. Model tabanlı izleme sistemlerinin bir dezavantajı, katılımcıların ve ortamın 3 boyutlu modelleri gibi ek bilgilere ihtiyaç duyulması nedeniyle bilinmeyen ortamlarda kullanımlarının zor olması ve kamera hareketini kısıtlamalarıdır [144]. Özellik tabanlı izleme algoritmaları, nesneyi izlemek için çerçevelerdeki ilgili noktaları kullanır.



Şekil 5. Görüntü işleme tabanlı hareket yakalama sistemi [143].



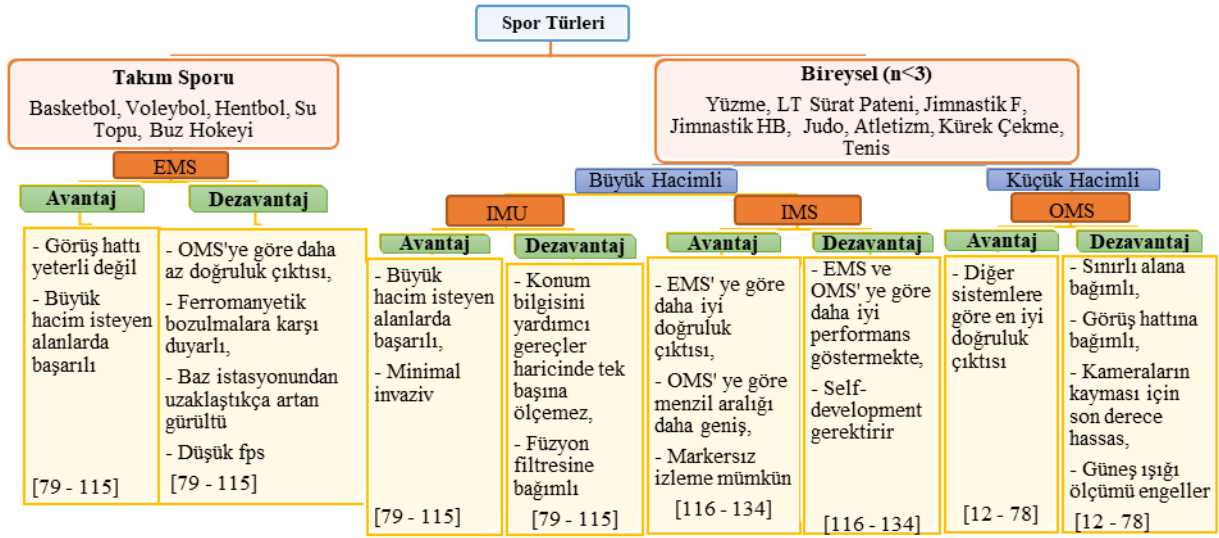
Şekil 6. Optoelektronik Hareket Yakalama Sistemi [10].

3.4. Optoelektromanyetik sistem (Optoelectromagnetic System - OMS)

Optik sistemler, üst üste binen projeksiyonlar sağlamak üzere kalibre edilmiş iki veya daha fazla kamera arasındaki bir nesnenin 3D konumunu üçgen hale getirmek için görüntü sensörlerinden alınan verileri kullanır. Veri alma, geleneksel olarak bir aktöre bağlı özel markerlar kullanılarak uygulanır; ancak, daha yeni sistemler her bir nesne için dinamik olarak tanımlanan yüzey özelliklerini izleyerek doğru veriler oluşturabilir. OMS' ler diğer sistemlerden daha hassastır. Optik sistemlerin (örneğin Optitrack veya Vicon) literatürde genellikle hareket yakalamada altın standart olarak kabul edilmektedir [145]. Bir OMS ışığı algılar ve bu algılamayı, zaman aşımı üçgenlemesi (time-offlight triangulation) yoluyla bir markerın 3D konumunu tahmin etmek için kullanır. Sistemlerin doğruluğu, deneysel kurulumun aşağıdaki bölümlerine bağlıdır: kameraların birbirine göre konumları, kameralar ve markerlar arasındaki mesafe, alandaki markerların konumu, sayısı ve türü, ve yakalama hacmi içindeki markerların hareketi [146]. Ayrıca, kamera çözünürlüğü ile örnekleme frekansı arasında bir değiş tokuş söz konusudur. OMS, sabit kameralara dayalıdır ve bu nedenle yalnızca sınırlı bir alanda veri alabilir [147]. Yakalama hacmi, maksimum kamera sayısına ve her kameranın görüş alanına bağlıdır. Fazladan markerlar genellikle hata olasılığını azaltan tıkanıklıkların üstesinden gelmek için kullanılır, ancak markerların sayısını artırmak aynı zamanda işleme gecikmesini de artırır. Sistemin diğer sınırlamaları, görüş hattı gerekliliğidir. Bu, kameralar işaretleri gözden kaybettiğinde veri çıkışının kesileceği anlamına gelir [148, 149]. Ayrıca, sistemler kurulumdaki değişimlere, örneğin kameranın yanlışlıkla kayması nedeniyle, karşı son derece hassastır [149]. Sistemler daha çok karanlık alanlarda (iç mekânlarda) kullanılır çünkü parlak güneş ışığı ölçümleri etkiler [148]. Özetle birçok kamera tarafından izlenen işaretleyiciler kullanılmaktadır. Kablo bağlantısı olmadığından hareketler serbestçe gerçekleştirilmektedir. Sahnede birden fazla kişi bulunabilir. Gerçek zamanlı uygulamalarda diğerlerine göre daha etkindir. Veriler temiz ve detaylıdır.

4. Değerlendirme ve Tartışma

Şekil 7' de takım sporları ve bireysel sporlar arasında doğruluk değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Takım sporları öncelikli olarak büyük ölçüm hacimleri ve kapamaları (occlusions) içerir. Takım sporları esas olarak takiple ilgili olduğundan, doğruluk, teknik faktörlerin yaygın olarak analiz edildiği bireysel sporlardan daha az önemlidir [150]. Bireysel sporlar ise istenilen ölçüm hacimlerine göre ayrıştırılmıştır. Daha küçük hacimler, son derece hassas OMS' ler tarafından karşılanır. Daha büyük hacimlerdeki bireysel sporlar, şu anda kinematik ölçümü açısından en uygun seçenekler IMS ve IMU sistemleri olarak belirlenmiştir. Bireysel sporlar altında belirlenen sistemlerin avantaj ve dezavantajlarına Şekil 7' de belirtilmiştir. Tipik olarak doğruluk, bir konumlandırma sisteminin kapsamı ile ters orantılıdır (yani daha büyük bir ölçüm hacmi için daha düşük bir doğruluk), bu da bunu genellikle bir ölçüm sisteminin seçiminde sınırlayıcı faktör haline getirir. Katılımcıların yer değiştirmesi büyüdüğünde, bazen çok sayıda hareket döngüsü elde etmek için ergometreler kullanılır [147]. Ancak, bu her zaman istenen bir şey değildir, çünkü bir ergometre üzerindeki hareketler gerçek hareketten farklı olabilir ya da sporcu aynı hareketi tekrarlayamaz.



Şekil 7. Spor türlerine göre hareket yakalama sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.

Spor analizi araştırmaları genellikle, yakalanması statik veya yavaş hareketlerden (örneğin yürüyüş analizi) daha zor olan oldukça dinamik hareketlerle ilgilenir. Örneğin, yüksek örnek frekanslarının gerekliliği teknik bir zorluk teşkil etmektedir. Spor uygulamaları için tipik örnek frekansları 50 Hz- 250 Hz arasındadır (Tablo 1-2-3). Aşırı miktarda veri kullanılmasını önlemek ve yüksek frekanslı paraziti önlemek için çok yüksek örnek frekansları kullanmayı tercih eder. Yalnızca belirli durumlarda örneğin çarpma (atlama gibi) veya çok yüksek hızlı hareketleri (beyzbol atışları gibi) incelemek için çok yüksek frekanslar (>1000 Hz) gereklidir. Ayrıca, sistemin, örneğin lineer ivmelerin sensör füzyon algoritmalarının sensör oryantasyon tahminini bozabileceği inertial ölçüm birimlerinde sorunlu olduğu kanıtlanan hareket dinamikleri ile ilgilenmesi gerekmektedir. Ölçüm sistemi sensörlerin, markerların, aktarıcılarının veya etiketlerin doğrudan bir sporcunun üzerine yerleştirilmesini gerektirdiğinde sensörlerin boyutu ve ağırlığı önemlidir. Özellikle yüksek performans ve yüksek dinamik koşullarda, bir sporcunun hareket özgürlüğü minimum düzeyde engellenmelidir.

Kaynaklar

- [1] Thomas J, Hall J.B, Bliss R. Guess TM. Comparison of Azure Kinect and optical retroreflective motion capture for kinematic and spatiotemporal evaluation of the sit-to-stand test. *Gait & Posture* 2022; 94: 153-159.
- [2] García-López J, Díez-Leal S, Ogueta-Alday A, Larrazabal J, and Rodríguez-Marroyo JA. Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(17), 1619-1626.
- [3] Southgate DFL, Prinold JAI, and Weinert-Aplin RA. In sports innovation, technology and research motion analysis in sport 2016; 3-30.
- [4] Pueo B. High speed cameras for motion analysis in sports science. *Journal of Human Sport and Exercise* 2016; 11(1): 53-73.
- [5] Lopez Elvira JL, Lopez Plaza D, Lopez Valenciano A, and Alonso Montero C. Influence of footwear on foot movement during walking and running in boys and girls aged 6-7. *Retos-Nuevas Tendencias En Educacion Fisica Deporte Y Recreacion* 2017; 31: 128-132.
- [6] Kotsifaki A, Rossom SV, Whiteley R, Korakakis V, Bahr R, Sideris V, and Jonkers I. Single leg vertical jump performance identifies knee function deficits at return to sport after ACL reconstruction in male athletes. *British Journal of Sports Medicine* 2022; 20: 755-769.
- [7] Marqués L, Cela J, and Gisbert M. Pre-service physical education teachers' self-management ability: a training experience in 3D simulation environments. *Retos. Nuevas Tendencias En Educación Física, Deporte Y Recreación* 2017; 32: 30-34.
- [8] Kurban T, Beşdok E. İnersiyal algılayıcı tabanlı hareket yakalama. In: *Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO*; 26 - 30 Kasım 2008; Turkey.
- [9] Zhuang Y, Pan Y, Xiao J. A modern approach to intelligent animation 2008; 77-106.
- [10] Motion Capture. https://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture (Son Erişim: 23-07-2022).
- [11] Human Motion Analysis. <https://www.xsens.com/a-history-of-motion-capture> (Son Erişim: 23-07-2022).

- [12] Bisesti BA, Lawrence MA, Koch AJ, and Carlson LA. Comparison of knee moments and landing patterns during a lateral cutting maneuver: shod vs. barefoot. *Journal of strength and conditioning research* 2015; 29(11): 3075–3078.
- [13] Greenhalgh A, Sinclair J. Comparison of achilles tendon loading between male and female recreational runners. *Journal of Human Kinetics* 2014; 44(44): 155–159.
- [14] Mehdizadeh S, Arshi AR, and Davids K. Effect of speed on local dynamic stability of locomotion under different task constraints in running. *European Journal of Sport Science* 2014; 14(8): 791–798.
- [15] Otsuk M, Ito T, Honjo T, and Isaka T. Scapula behavior associates with fast sprinting in first accelerated running. *SpringerPlus* 2016; 5(1): 682.
- [16] Maurer C, Stief F, Jonas A, Kovac A, Groneberg DA, Meurer A, and Ohlendorf D. Influence of the lower jaw position on the running pattern. *PLoS ONE* 2015; 10(8): 1-16.
- [17] Goss DL, Lewek M, Yu B, Ware WB, Teyhen DS, and Gross MT. Lower extremity biomechanics and self-reported footstrike patterns among runners in traditional and minimalist shoes. *Journal of Athletic Training* 2015; 50(6): 603–611.
- [18] Cockcroft J, Van Den Heever D. A descriptive study of step alignment and foot positioning relative to the tee by Professional rugby union goal-kickers. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(4): 321–9.
- [19] Crotin RL, Ramsey DK. Stride Length: A reactive response to prolonged exertion potentially effecting ball velocity among baseball pitchers. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2015; 15(1): 254–267.
- [20] Crotin RL, Kozlowski K, Horvath P, and Ramsey DK. Altered stride length in response to increasing exertion among baseball pitchers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2014; 46(3): 565–571.
- [21] Hansen C, Rezzoug N, Gorce P, Venture, G, and Isableu B. Sequence-dependent rotation axis changes and interaction torque use in overarm throwing. *Journal of Sports Sciences* 2015; 34(9): 878-885.
- [22] Laughlin WA, Fleisig GS, Aune KT, and Diffendaffer AZ. The effects of baseball bat mass properties on swing mechanics, ground reaction forces, and swing timing. *Sports Biomechanics* 2016; 15(1): 36–47.
- [23] Danielsen J, Sandbakk O, Holmberg HC, and Ettema G. Mechanical energy and propulsion in ergometer double poling by cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2015; 47(12): 2586–2594.
- [24] Hejrati B, Chesebrough S, Bo FK, Abbott JJ, and Merryweather AS. Comprehensive quantitative investigation of arm swing during walking at various speed and surface slope conditions. *Human Movement Science* 2016; 49: 104–115.
- [25] Carse B, Meadows B, Bowers R, and Rowe P. Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. *Physiotherapy* 2013; 99(4): 347–351.
- [26] Iino Y, Kojima T. Mechanical energy generation and transfer in the racket arm during table tennis topspin backhands. *Sports Biomechanics* 2016; 15(2): 180–197.
- [27] Sinclair J, Bottoms L. Gender differences in the kinetics and lower extremity kinematics of the fencing lunge. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2013; 13(2): 440–451.
- [28] Joyce C, Burnett A, Cochrane J, and Ball K. Three-dimensional trunk kinematics in golf: between-club differences and relationships to clubhead speed. *Sports Biomechanics* 2013; 12(2): 108–120.
- [29] Sommer M, Häger C, and Rönnqvist L. Synchronized metronome training induces changes in the kinematic properties of the golf swing. *Sports Biomechanics* 2014; 13(1): 1–16.
- [30] Milanese C, Corte S, Salvetti L, Cavedon V, and Agostini, T. Correction of a Technical Error in the Golf Swing: Error Amplification Versus Direct Instruction. *Journal of Motor Behavior* 2016; 48(4): 365–376.
- [31] Sinclair J, Currigan G, Fewtrell D, and Taylor PJ. Biomechanical correlates of club head velocity during the golf swing. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2014; 14(1): 54–63.
- [32] Betzler NF, Monk SA, Wallace ES, and Otto SR. The relationships between driver clubhead presentation characteristics, ball launch conditions and golf shot outcomes. *Journal of Sports Engineering and Technology* 2014; 228(4): 242–249.
- [33] Lädermann A, Chagué S, Kolo FC, and Charbonnier C. Kinematics of the shoulder joint in tennis players. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2016; 19(1): 56–63.
- [34] Martin C, Bideau B, Bideau N, Guillaume N, Delamarche P, and Kulpa R. Energy Flow Analysis During the Tennis Serve Comparison Between Injured and Noninjured Tennis Players. *The American Journal of Sports Medicine* 2014; 42(22): 2751–2760.
- [35] Martin C, Kulpa R, Delamarche P, and Bideau B. Professional tennis players' serve: correlation between segmental angular momentums and ball velocity. *Sports Biomechanics* 2013; 12(1): 2-14.
- [36] Martin C, Kulpa R, Ropars M, Delamarche P, and Bideau B. Identification of temporal pathomechanical factors during the tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2013; 45(11): 2113-2119.
- [37] Martin C, Bideau B, Delamarche P, and Kulpa R. Influence of a prolonged tennis match play on serve biomechanics. *PLoS ONE* 2015; 11(8): 1-14.
- [38] Reid M, Giblin G, and Whiteside D. A Kinematic comparison of the overhand throw and tennis serve in tennis players: How similar are they really? *Journal of Sports Sciences* 2015; 33(7): 713-723.
- [39] Judson LJ, Churchill SM, Barnes A, Stone JA, Brookes IGA, Wheat J. Measurement of bend sprinting kinematics with three-dimensional motion capture: a test–retest reliability study. *Journal of Biomechanics* 2020; 19(6): 761-777.
- [40] Elgammal A, Lee CS. Tracking people on a torus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2009; 31(3): 520-38
- [41] Inamura T, Toshima I, Tanie H, and Nakamura Y. Embodied symbol emergence based on mimesis theory. *International Journal of Robotics Research* 2004, 23(4-5): 363-377.

- [42] Kulic D, Takano JW and Nakamura Y. Incremental learning, clustering and hierarchy formation of whole body motion patterns using adaptive hidden Markov chains. *International Journal of Robotics Research* 2008; 27(7): 761-784.
- [43] Shon AP, Grochow K, and Rao RPN. Robotic imitation for human motion capture using Gaussian processes. In: 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots; December 2005; Tsukuba: IEEE. pp. 129-134.
- [44] Shon AP, Grochow K, Hertzmann A, and Rao RPN. Learning shared latent structure for image synthesis and robotic imitation. In Weiss Y, Schlkopf B, and Platt JC (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [45] Butt A, Rovini E, Dolciotti C, Bongioanni P, De Petris G and Cavallo F. Leap Motion Evaluation for Assessment of Upper Limb Motor Skills in Parkinson's Disease. In: *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, July 2017; IEEE. pp. 116-121.
- [46] Gieser SN, Boisselle A, and Makedon F. Realtime static gesture recognition for upper extremity rehabilitation using the leap motion. In: *International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*, August 2015; Springer. pp. 144-154.
- [47] Yahya M, Shah JA, Warsi A, Kadir K, Khan S, and Izani M. Real time elbow angle estimation using single RGB camera. *arXiv preprint arXiv* 2018; 1808.07017.
- [48] Manghisi VM, Uva AE, Fiorentino M, Bevilacqua V, Trotta GF, and Monno G. Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor. *Applied Ergonomics* 2017; 65: 481-491.
- [49] Skublewska-Paszowska, M, Montusiewicz J, Łukasik E, Pszczoła-Pasierbiewicz I, Baran KR, Smółka J, and Pueo, B. Motion capture as a modern technology for analysing ergometer rowing. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2016; 10(29): 132-140.
- [50] Naksuk N, Lee G, and Rietdyk S. Whole-body human-to-humanoid motion transfer, In: *Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2005; Tsukuba, pp. 104-109.
- [51] Sigal L, Balan A, and Black M. HumanEva: synchronized video and motion capture dataset and baseline algorithm for evaluation of articulated human motion. *International Journal of Computer Vision* 2009; 87(1-2): 4-27.
- [52] Rawal A, Chehata A, Horberry T, Shumack M, Chen C, and Bonato L. Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clinical Biomechanics* 2008; 54: 78-85.
- [53] Figueiredo PRP, Silva PL, Avelar BS, da Fonseca ST, Bootsma RJ, and Mancini MC. Upper limb performance and the structuring of joint movement in teenagers with cerebral palsy: the reciprocal role of task demands and action capabilities. *Experimental Brain Research* 2015; 233(4): 1155-1164.
- [54] Yang C, Kerr A, Stankovic V, Stankovic L, Rome P, and Cheng S. Human upper limb motion analysis for post-stroke impairment assessment using video analytics. *IEEE Access* 2016, 4: 650-659.
- [55] Zhang Y, Ma Y, and Liu G. Lumbar spinal loading during bowling in cricket: a kinetic analysis using a musculoskeletal modelling approach. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(11): 1030-1035.
- [56] Frayne RJ, Dean, RB, and Jenkyn TR. Improving ice hockey slap shot analysis using three-dimensional optical motion capture: A pilot study determining the effects of a novel grip tape on slap shot performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2015; 229(2): 136-144.
- [57] Bernardina GRD, Cerveri P, Barros RML, Marins JCB, and Silvatti AP. Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. *Plos One* 2016; 11(8).
- [58] Hansen C, Gibas D, Honeine JL, Rezzoug N, Gorce P, and Isableu B. An inexpensive solution for motion analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2014; 228(3): 165-170.
- [59] Thewlis D, Bishop C, Daniell N, and Paul G. Next-generation low-cost motion capture systems can provide comparable spatial accuracy to high-end systems 2013; 29(1): 112-117.
- [60] Mundy PD, Lake JP, Carden PJC, Smith NA, and Lauder MA. Agreement between the force platform method and the combined method measurements of power output during the loaded countermovement jump. *Sports Biomechanics* 2016; 15(1): 23-35.
- [61] Chiu LZ, Bryanton MA, and Moolyk AM. Proximal-distal sequencing in vertical jumping with and without arm swing. *Journal of Strength and Conditioning Research* 2014; 28(5): 1195-1202.
- [62] Pueo, B. High speed cameras for motion analysis in sports science. *Journal of Human Sport and Exercise* 2016; 11(1): 53-73.
- [63] Estevan I, Falco C, Silvernail JF, and Jandacka D. Comparison of lower limb segments kinematics in a taekwondo kick. an approach to the proximal to distal motion. *Journal of Human Kinetics* 2015; 47(1): 41-49.
- [64] Estevan I, Freedman Silvernail J, Jandacka D, and Falco C. Segment coupling and coordination variability analyses of the roundhouse kick in taekwondo relative to the 68 initial stance position. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(18): 1766-1773.
- [65] Estevan I, Jandacka D, and Falco C. Effect of stance position on kick performance in taekwondo. *Journal of Sports Sciences* 2013; 31(16): 1815-1822.
- [66] Gomo O, van den Tillaar R. The effects of grip width on sticking region in bench press. *Journal of Sports Sciences* 2015; 1-7.
- [67] Hart NH, Cochrane JL, Spiteri T, Nimphius S, and Newton RU. Relationship between leg mass, leg composition and foot velocity on kicking accuracy in Australian football. *Journal of Sports Science and Medicine* 2016; 15(2): 344-351.

- [68] Huchez A, Haering D, and Holvoët P. Local versus global optimal sports techniques in a group of athletes. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 2013; 18: 37–41.
- [69] Lazzeri M, Kayser B, and Armand S. Kinematic predictors of wrist shot success in floorball/unihockey from two different feet positions. *Journal of Sports Sciences* 2016; 1–8.
- [70] Lockie RG, Callaghan SJ, and Jeffriess MD. Acceleration kinematics in cricketers: Implications for performance in the field. *Journal of Sports Science and Medicine* 2014; 13(1): 128–136.
- [71] López, JL, López D, López A, and Alonso C. Influence of footwear on foot movement during walking and running in boys and girls aged 6-7. *Retos. Nuevas Tendencias En Educación Física, Deporte Y Recreación* 2017; 31: 128–132.
- [72] Zago M, Piovan AG, Annoni I, Ciprandi D, Iaia FM, and Sforza C. Dribbling determinants in sub-elite youth soccer players. *Journal of Sports Sciences* 2015; 414: 1–9.
- [73] Sinclair J, Fewtrell D, Taylor PJ, Bottoms L, Atkins S, and Hobbs SJ. Three dimensional kinematic correlates of ball velocity during maximal instep soccer kicking in males. *European Journal of Sport Science* 2014; 14(8): 799–805.
- [74] Sinclair J, Fewtrell D, Taylor PJ, Atkins S, Bottoms L, and Hobbs SJ. Three dimensional kinematic differences between the preferred and non-preferred limbs during maximal instep soccer kicking. *Journal of Sports Sciences* 2014; 32(20): 1914–1923.
- [75] Inoue K, Nunome H, Sterzing T, Shinkai H, and Ikegami Y. Dynamics of the support leg in soccer instep kicking. *Journal of Sports Sciences* 2014; 32(11): 1023–1032.
- [76] Arshi AR, Nabavi H, Mehdizadeh S, and Davids K. An alternative approach to describing agility in sports through establishment of a relationship between velocity and radius of curvature. *Journal of Sports Sciences* 2014; 33(13): 1349–1355.
- [77] Nedergaard NJ, Heinen F, Sloth S, Holmberg HC, and Kersting UG. Biomechanics of the ski cross start indoors on a customised training ramp and outdoors on snow. *Sports Biomechanics* 2015; 14(3): 273–286.
- [78] Zhang Z, Li S, Wan B, Visentin P, Jiang Q, Dyck M, Shan, G. The Influence of X-Factor (Trunk Rotation) and Experience on the Quality of the Badminton Forehand Smash. *Journal of Human Kinetics* 2016; 53(1): 9–22.
- [79] Kasmer ME, Ketchum NC, and Liu XC. The effect of shoe type on gait in forefoot strike runners during a 50-km run. *Journal of Sport and Health Science* 2014; 3(2), 122–130.
- [80] Gageler WH, Thiel D, Neville J, James DA. Feasibility of using virtual and body worn inertial sensors to detect whole-body decelerations during stopping. *Procedia Engineering* 2013; 60(0): 28–33.
- [81] Hollander K, Hoenig T, Edouard P. Biomechanics of running. In: *IEEE International Workshop on The Running Athlete*, April 2022; IEEE. pp. 3-11.
- [82] Losciale JM, Ithurburn MP, Paterno MV, and Schmitt LC. Passing return-to-sport criteria and landing biomechanics in young athletes following anterior cruciate ligament reconstruction. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Journal of Orthopaedic Research*, 2022; 40(1), pp. 208-218.
- [83] Hindle BR, Keogh JW, Lorimer AV. Inertial-based human motion capture: a technical summary of current processing methodologies for spatiotemporal and kinematic measures. *Applied Bionics and Biomechanics* 2021.
- [84] Ruiz-del-Solar J, Palma-Amestoy R, Marchant R, Parra-Tsunekawa I, and Zegers P. Learning to fall: designing low damage fall sequences for humanoid soccer robots, robotics and autonomous systems. *Humanoid Soccer Robots* 2009; 57(8): 796-807.
- [85] Pastor I, Hayes HA, and Bamberg SJ. A feasibility study of an upper limb rehabilitation system using kinect an computer games. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, August 2012; IEEE. pp. 1286-1289.
- [86] Taborri J, Keogh J, Kos A, Santuz A, Umek A, Urbanczyk C, Kruk E, Rossi S. Sport biomechanics applications using inertial, force, and emg sensors: a literature overview. *Journal of Applied Bionics and Biomechanics* 2020.
- [87] McGinnis RS, Cain SM, Davidson SP, Vitali RV, Perkins NC, and McLean SG. Quantifying the effects of load carriage and fatigue under load on sacral kinematics during countermovement vertical jump with IMU-based method. *Sports Engineering* 2016; 19(1): 21–34.
- [88] Bötzel K, Marti FM, Rodríguez MÁC, Plate A, and Vicente AO. Gait recording with inertial sensors - How to determine initial and terminal contact. *Journal of Biomechanics* 2016; 49(3): 332–337.
- [89] Rantalainen T, Hart NH, Nimphius S, and Wundersitz DW. Associations Between Step Duration Variability and Inertial Measurement Unit Derived Gait 70 Characteristics. *Journal of Applied Biomechanics* 2016; 32(4): 401–406.
- [90] Telfer S, Woodburn J, and Turner DE. An ultrasound based non-invasive method for the measurement of intrinsic foot kinematics during gait. *Journal of Biomechanics* 2014; 47(5): 1225-1228.
- [91] Wang F, Skubic M, Rantz M, and Cuddihy PE. Quantitative gait measurement with pulse-doppler radar for passive in-home gait assessment. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2014; 61(9): 2434-2443.
- [92] Papi E, Osei-Kuffour D, Chen YMA, and McGregor, AH. Use of wearable technology for performance assessment: a validation study. *Medical Engineering & Physics* 2015; 37(7): 698–704.
- [93] Fasel B, Favre J, Chardonens J, Gremion G, and Aminian K. An inertial sensor based system for spatio-temporal analysis in classic cross-country skiing diagonal technique. *Journal of Biomechanics* 2015; 48(12): 3199–3205.
- [94] Atrsaei A, Salarieh H, and Alasty A. Human arm motion tracking by orientation-based fusion of inertial sensors and Kinect using unscented Kalman filter. *Journal of Biomechanical Engineering* 2016; 138(9).
- [95] Fasel B, Praz C, Kayser B, and Aminian K. Measuring spatiotemporal parameters of uphill ski-mountaineering with ski-fixed inertial sensors. *Journal of Biomechanics* 2016; 1-4.

- [96] Calinon S, Guenter F, and Billard A. On learning, representing and generalizing a task in a humanoid robot. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B* 2007; 37(2): 286-298.
- [97] Field M, Stirling D, Naghdy F, and Pan Z. Motion segmentation for humanoid control planning. In: *ARAA Australasian Conference on Robotics and Automation*, 3-5 December 2008; Canberra,
- [98] Fujimori Y, Ohmura Y, Harada T, and Kuniyoshi Y. Wearable motion capture suit with full-body tactile sensors. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 12-17 May 2009; Kobe. IEEE. pp. 3186-3193.
- [99] Miller N, Jenkins OC, Kallmann M, and Mataric, MJ. Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation. *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, 10-12 November 2012; Los Angeles, CA. IEEE. pp. 547-565.
- [100] Vlastic D, Adelsberger R, Vannucci G, Barnwell J, Gross M, Matusik W, and Popovic J. Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics* 2007; 26(3): 35-es.
- [101] Ward JA, Lukowicz P, Troster G, and Starner T. Activity recognition of assembly tasks using body-worn microphones and accelerometers. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006; 28(10), pp. 1553-1567.
- [102] Biswas D, Cranny A, Gupta N, Maharatna K, Achner J, Klemke J, Jöbges M, and Ortmann S. Recognizing upper limb movements with wrist worn inertial sensors using k-means clustering classification. *Human Movement Science* 2015. 40: 59-76.
- [103] El-Gohary M, McNames J. Human joint angle estimation with inertial sensors and validation with a robot arm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2015; 62(7): 1759-1767.
- [104] McLeod A, Bochniewicz EM, Lum PS, Holley RJ, Emmer G, and Dromerick AW. Using wearable sensors and machine learning models to separate functional upper extremity use from walking-associated arm movements. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 2016; 97(2): 224-231.
- [105] Ruffaldi E, Peppoloni L, Filippeschi A. Sensor fusion for complex articulated body tracking applied in rowing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2015; 229(2): 92-102.
- [106] Zorko M, Nemeč B, Babič J, Lešnik B, and Supej M. The waist width of skis influences the kinematics of the knee joint in alpine skiing. *Journal of Sports Science and Medicine* 2005; 14(3): 606-619.
- [107] Kim YK. The Effect of Different Warm-up Procedures on Bat Speed in Baseball. *Korean Journal of Sport Biomechanics* 2013; 23(2): 91-97.
- [108] Matsunaga T, Oshita M. Recognition of walking motion using support vector machine. In: *Proceedings of the ISICE2007*, pp. 337-342.
- [109] Moldenhauer J, Boesnach I, Beth T, Wank V, and Bos K. Analysis of human motion for humanoid robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 18-22 April 2005; Barcelona, Spain. IEEE. pp. 311-316.
- [110] Ramana PKR, Grest D, and Volker K. Human action recognition in table-top scenarios: an HMM-based analysis to optimize the performance. In: *Proceedings of 12th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, 2007; 27-29 August 2007; Vienna, Austria. pp. 101-108.
- [111] Yamamoto T, Fujinami T. Hierarchical organization of the coordinative structure of the skill of clay kneading. *Human Movement Science* 2008; 27 (5): 812- 822.
- [112] Zhao L and Badler NI. Acquiring and validating motion qualities from live limb gestures. *Graphical Models* 2005. 67(1): 1-16.
- [113] Bai L, Pepper MG, Yan Y, Spurgeon SK, Sakel M, and Phillips M. Quantitative assessment of upper limb motion in neurorehabilitation utilizing inertial sensors. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2015; 23(2), pp. 232-243.
- [114] Huang MH, Brown SH. Age differences in the control of postural stability during reaching tasks. *Gait & Posture* 2013; 38(4), pp. 837-842.
- [115] Pang M, Guo S, Huang Q, Ishihara H, and Hirata H. Electromyography based quantitative representation method for upper-limb elbow joint angle in sagittal plane. *Journal of Medical and Biological Engineering* 2015; 35(2): 165-177.
- [116] Abrams GD, Harris AH, Andriacchi TP, Safran MR, and Safran M. Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. *Br J Sports Med* 2014; 48: 339-342.
- [117] Nakano N, Sakura T, Ueda K, Omura L, Kimura A, Iion Y, Fukashiro S, and Yoshioka S. Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose with Multiple Video Cameras. *Journal of Sports Science, Technology and Engineering* 2020; 2:50.
- [118] Drazan JF, Phillips WT, Seethapathi N, Hullfish TJ, Baxter JR. Moving outside the lab: Markerless motion capture accurately quantifies sagittal plane kinematics during the vertical jump. In: *IEEE International Conference on Journal of Biomechanics*, 26 August 2021; 125.
- [119] Wade L, Needham L, McGuigan P, Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. In: *IEEE Transactions on Sports Medicine and Rehabilitation*, 25 February 2022.
- [120] Xu X, Robertson M, Chen KB, Lin JH, and McGorry RW. Using the Microsoft KinectTM to assess 3-D shoulder kinematics during computer use. *Applied Ergonomics* 2017; 65: 418-423.
- [121] Schlagenhauf F, Sreeram S, and Singhose WE. Comparison of kinect and vicon motion capture of upperbody joint angle tracking. In: *14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 2018; IEEE.
- [122] Yang C, Kerr A, Stankovic A, Stankovic L, and Rowe P. Upper limb movement analysis via marker tracking with a single-camera system. In: *International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014; IEEE.

- [123] Auvinet E, Multon F, and Meunier J. New Lower-Limb gait asymmetry indices based on a depth camera. *Sensors* 2015; 15(3): 4605-4623.
- [124] Pfister A, West AM, Bronner S, and Noah JA. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. *J Med Eng Technol* 2014; 38(5): 1464-522.
- [125] Sandau M, Koblauch H, Moeslund TB, Aanæs H, Alkjær T, and Simonsen EB. Markerless motion capture can provide reliable 3D gait kinematics in the sagittal and frontal plane. *Medical Engineering and Physics* 2014; 36(9): 1168-1175.
- [126] Clark RA, Bower KJ, Mentiplay BF, Paterson K, and Pua YH. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables. *Journal of Biomechanics* 2013; 46(15): 2722-2725.
- [127] Kim J, Gravunder A, and Park HS. Commercial Motion Sensor Based Low-Cost and Convenient Interactive Treadmill. *Sensors* 2015; 15(9): 23667-23683.
- [128] Krigslund R, Dosen S, Popovski P, Dideriksen JL, Pedersen GF, and Farina D. A novel technology for motion capture using passive UHF RFID tags. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2012; 60(5): 1453-1457.
- [129] Eltoukhy M, Kelly A, Kim CY, Jun HP, Campbell R, and Kuenze C. Validation of the Microsoft Kinect® camera system for measurement of lower extremity jump landing and squatting kinematics. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports* 2016, 1-14.
- [130] O'Keefe JA, Oriás AAE, Khan H, Hall DA, Berry-Kravis E, and Wimmer MA. Implementation of a markerless motion analysis method to quantify hyperkinesia in males with fragile X syndrome. *Gait and Posture* 2014; 39(2): 827-830.
- [131] Schmitz A, Ye M, Boggess G, Shapiro R, Yang R, and Noehren B. The measurement of in vivo joint angles during a squat using a single camera markerless motion capture system as compared to a marker based system. *Gait and Posture* 2015; 41(2): 694-698.
- [132] Bonnechère B, Jansen B, Salvia P, Bouzahouene H, Omelina L, Moiseev F, Van Sint Jan S. Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: Comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait and Posture* 2014; 39(1): 593-598.
- [133] Schmitz A, Ye M, Shapiro R, Yang R, and Noehren B. Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system. *Journal of Biomechanics* 2014, 47(2), 587-591.
- [134] Yeung LF, Cheng KC, Fong CH, Lee WCC, and Tong KY. Evaluation of the Microsoft Kinect as a clinical assessment tool of body sway. *Gait & Posture* 2014; 40(4): 532-538.
- [135] Motion Capture: Magnetic Systems. Next Generation. *Imagine Media* October 1995; 10: 51.
- [136] Gustafson JA, Dowling B, Heidloff D, Quigley RJ, Garrigues GE. Optimizing Pitching Performance through Shoulder and Elbow Biomechanics. *IEEE Transactions on Operative Techniques in Sports Medicine* 2022; 150890.
- [137] Trasolini NA, Nicholson KF, Mylott J, Bullock GS, Phil D, Hulburt TC, Waterman BR. Biomechanical Analysis of the Throwing Athlete and Its Impact on Return to Sport. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation* 2022; e83-e91.
- [138] Choo CZY, Chow JY, Komar J. Validation of the Perception Neuron system for full-body motion capture. *Journal of Biomechanics* 2022; 31(10): 957-961.
- [139] Diffendaffer AZ, Bagwell MS, and Fleisig GS. The Clinician's Guide to Baseball Pitching Biomechanics. *Journal of Biomechanics, Sports Health* 2022.
- [140] <https://www.technaid.com/products/motion-capture-system-tech-mcs-hub-imu/> (Son erişim: 23.07.2022)
- [141] Wade L, Needham L, McGuigan P, Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. *PeerJ* 2022; 10: e12995.
- [142] Girbés-Juan V, Schettino V, Gracia L, Solanes JE, Demiris Y, Tornero J. Combining haptics and inertial motion capture to enhance remote control of a dual-arm robot. *Measurement* 2022; 1-20.
- [143] Beetz M, von Hoyningen-Huene N, Kirchlechner B, Gedikli S, Siles F, Durus M, and Lames M. Asporago: Automated sports game analysis models. *International Journal of Computer Science in Sport* 2009; 8(1): 1-21.
- [144] Corazza S, Mündermann L, Gambaretto E, Ferrigno G, Andriacchi TP. Markerless motion capture through visual hull, articulated icp and subject specific model generation. *International Journal of Computer Vision* 2010; 87(1): 156-169.
- [145] Maletsky LP, Sun J, and Morton NA. Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies. *Journal of Biomechanics* 2007; 40(3): 682-685.
- [146] Begon M, Colloud F, Fohanno V, Bahuaud P, and Monnet T. Computation of the 3D kinematics in a global frame over a 40 m-long pathway using a rolling motion analysis system. *Journal of Biomechanics* 2009; 42(16): 2649-2653.
- [147] Spörri J, Schiefermüller C, and Müller E. Collecting kinematic data on a Ski track with optoelectronic stereophotogrammetry: A methodological study assessing the feasibility of bringing the biomechanics lab to the field. *PloS One* 2016; 11(8): e0161757.
- [148] Panjkota A, Stancic I, and Supuk T. Outline of a qualitative analysis for the human motion in case of ergometer rowing. In: *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*; 2009.
- [149] Windolf M, Götzen N, and Morlock, M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systemsexemplified on the vicon-460 system. *Journal of Biomechanics* 2008; 41(12): 2776-2780.
- [150] Van Der Kruk E, Reijne MM. Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European journal of sport science* 2018; 18(6): 806-819.