



Yürüme ve hareket analizi sistemleri: teknik ayrıntılar

Gait and motion analysis systems: technical details

Ergin Tönük

Makina Mühendisliği Bölümü, Biyomedikal Mühendisliği, Disiplinlerarası Lisansüstü Programı,
BIOMATEN, Biomalzeme ve Doku Mühendisliği Mükemmeliyet Merkezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Bilgisayarlı ve üç boyutlu yürüme analizi sistemleri klinikte görsel olarak yapılan yürüme analizine ek olarak yürüyüş kinematiki ve kinetiki ile ilgili yürüyüşün her anına ait sayısal veriler sağlayarak tanılama, tedavi planlama ve değerlendirme ile protez ve ortez tasarımı, ayarlama ve değerlendirmesinde yardımcı bir araç olarak kullanılmaktadır. Elde edilen verilerin sayısal olmasına ek olarak objektif olması da bilgisayarlı yürüyüş analizi sistemlerinin önemli bir üstünlüğüdür. Öte yandan, gerek sistem tarafından yapılan ölçümler gerekse ölçülen verilerden hesaplanarak elde edilen ve yazılım tarafından sunulan sonuçlar değerlendirilirken bunların elde edilme şeklinin dikkate alınması yerinde olur. Bu çalışmada yürüyüş analizi sistemlerinin veri toplama, işleme ve sunduğu sonuçlar haline getirmesi sırasında izlediği yöntemler mühendislik ağırlıklı olarak genel hatları ile sunulmuştur.

Anahtar sözcükler: bilgisayarlı yürüme analizi; yürüyüş kinematiki; yürüyüş kinetiki

Computerized and three-dimensional gait analysis systems supply quantitative data about kinematics and kinetics of the gait unlike the visual gait analysis. The results can be utilized for diagnostics, rehabilitation planning and evaluation, during prosthetic and orthotic design, tuning and evaluation. Data obtained being numerical and objective are the two other major advantages of gait analysis systems. However, it is important to consider the methods of obtaining direct measured data and computed quantities presented as the results of gait analysis system. In this review the methods of data collection and processing, and finally computation of the results are presented from an engineering point of view.

Key words: computerized gait analysis system; gait kinematics; gait kinetics

GİRİŞ

Yaşanan teknolojik gelişmeler hayatın her alanında hızlı değişimlere neden olurken, tıbbın her alanında da yaygın uygulama alanı bulmuştur. Eskiden beri gözlem ile yapılan yürüme analizi de uzunca bir süredir bilgisayarlı yürüme analizi sistemlerince yapılmaya başlanmıştır.

Yürüme analizinde elde edilen veriler, görsel yürüme analizinden farklı olarak, sayısal bilgiler içerir ve gözlemciden bağımsız, yansız sonuçlar verir. Bu veriler saklanabilir ve aynı denek için değişik zamanlarda alınan veriler veya bir denek grubunun verileri istatistik olarak değerlendirilebilir. Yürüme analizi sonuçları tanı koymakta, tedavi planlamasında ve değerlendirmesinde, ortez ve protez tasarlama, hasta üzerinde

ayarlama ve değerlendirmesinde yardımcı bir araç olarak kullanılmaktadır.

Öte yandan klinik uygulamalarda kullanılan yürüme analizi sistemlerinin hemen tümü ticari sistemler olup veri toplama, işleme ve matematik model tabanlı hesaplamalar ilgili firmaların ticari sırları olduğu için kullanıcıya sunulmamakta, sadece deneyin yapılma yöntemi, sistemin kullanımı ve sonuçların elde edilmesine yönelik bilgiler verilmektedir. Olağan bir klinik uygulamada çoğunlukla bu bilgiler yeterli olmaktadır. Ancak kimi zaman yürüme analizi sistemleri özellikle araştırma amaçlı olarak rutin uygulamanın dışında da kullanılmaktadır. Bu durumda sistemin nasıl veri topladığı, bu veriyi nasıl işlediği, model tabanlı hesaplar sonucu sunduğu bilgileri nasıl elde ettiği önemli olabilmektedir.

Bu çalışmada üniversitemiz bünyesinde geliştirilen ve 1998 yılından beri kullanımda olan ODTÜ-Kiss (**Kas-İskelet Sistemi** veya İngilizce *Kinematic Support System*) sisteminden edindiğimiz bilgi birikimi ile bilgisayarlı, üç boyutlu tipik bir yürüme analizi sisteminin temel teknik özellikleri ve çalışma prensipleri sunulacaktır.^[1-3]

YÜRÜME ANALİZİ SİSTEM BİLEŞENLERİ

Donanım

Kinematik veri toplama sistemi

Hemen tüm yürüme analizi sistemlerinde deneğin hareketlerini algılamak için kinematik bir veri toplama sistemi bulunur. Çoğu sistemde denek üzerine belirli bir protokole göre takılmış işaretleyici noktalarının üç boyutlu uzayda (genellikle laboratuvar koordinat takımında) yeri birden fazla kamera görüntüsü aracılığıyla bulunur.^[4] Deney başlamadan önce kameralar ya koordinatları önceden bilinen durağan işaretleyici noktaları kullanılarak (statik kalibrasyon) veya birbirlerine göre konumları bilinen, bir cisim üzerine yerleştirilmiş birkaç işaretleyici noktasının deney hacmi içerisinde hareketi ile (dinamik kalibrasyon) kalibre edilir. Kameraların bir cisim üzerine hareketsiz olarak takıldığı bazı sistemlerde kalibrasyon ürün kullanıcıya teslim edilirken üretici tarafından yapılır ve kameraların birbirine göre konumu değişmediği sürece sistemin yeniden kalibre edilmesi gerekmez. İşaretleyici noktalarının denek üzerine takıldığı yaygın kullanılan bazı protokoller: Helen Hayes işaretleyici seti (hastane [*hospital*] ve uyarlanmış [*modified*] olmak üzere iki tipi vardır), Keith Vaughan^[5] işaretleyici seti, Davis^[6] işaretleyici seti, Cleveland Clinic işaretleyici seti, Stanhope ve Holden işaretleyici seti, Ohio State Üniversitesi işaretleyici seti, Mayo Clinic işaretleyici seti, OLGA (VICON) işaretleyici setidir. Yeni sistemlerden bazıları örneği algılama teknikleri aracılığıyla denek üzerinde belirli noktaları işaretleyici noktaları olmaksızın izleyebilmektedir. Diğer bazı sistemler kamera görüntüleri ile işaretleyici noktasının konumunu belirlemek yerine denek üzerinde belirli noktalara takılan eylemsizlik ölçerler (IMU, *Inertial Measurement Unit*) ile algılayıcı eksen takımına göre doğrusal ivmenin üç bileşeni ve açısal hızın üç bileşenini ölçerek, buradan konum bilgisi elde etmektedir.

Yukarıda anılan tüm sistemlerde elde edilen bilgi, ekstremiteler üzerindeki belirli noktaların sabit bir koordinat takımına göre hareket süresince konumlarıdır. Bu bilginin elde edilmesi hareket analizi sistemlerinin genellikle en zahmetli, karmaşık ve hataya açık kısmıdır.

Kinetik veri toplama sistemi

Yürüyüş analizi sırasında iki ayağın da yerle temas halinde olduğu anlarda ekstremiteler arasındaki kuvvet

dağılımını kinematik ölçümler ve matematik modelleme ile belirlemek olanaksız duruma geldiği için, yer tepki kuvvet vektörlerinin ölçümü mutlak bir zorunluluk haline gelir. Öte yandan kuvvet ölçüm sistemleri (kinetik sistemler) kinematik sistem ile karşılaştırıldığında görece daha yalın ve hassas veri alabildiği için, denek tarafından yere uygulanan kuvvetle etki-tepki çifti oluşturan yer tepki kuvvet vektörleri her bir ayak için birer olmak üzere en az iki veya modern sistemlerin çoğunda peş peşe adımlarda kullanılmak üzere daha fazla kuvvet platformu tarafından ölçülür. Kuvvet platformu bileşke yer tepki kuvvet vektörünü, kuvvet platformu koordinat sisteminde üç bileşen kuvvet ve üç bileşen moment biçiminde ölçer. Kuvvet platformu verileri ayak tabanındaki basınç dağılımı bilgisini içermez. Öte yandan basınç dağılımını ölçen cihazlar sadece yüzeye dik kuvvet dağılımını ölçtüğü için yer ile oluşan sürtünme kuvvetleri ve yer düzlemine dik eksen çevresindeki moment bilgisi vermezler. Ayak tabanındaki basınç dağılımı klinik açıdan önemli olsa da bu tip sistemlerden alınan veri yürüme analizinde gerekli olan tüm kinetik verileri içermediği için ancak kuvvet platformuna ek olarak kullanılabilir.

Bilgisayar sistemi

Kinematik ve kinetik veri toplama sistemleri ile diğer yardımcı sistemlerden gelen verileri eş-zamanlı olarak toplayan, üzerinde verileri işleyen, matematik modeller içeren yazılımlar aracılığıyla hekimler tarafından kullanılacak veriler haline getiren, andırım ve canlandırma yapan yazılımların çalıştığı, önceki deney verilerinin saklandığı bir sistemdir.

Yazılım

Yürüyüş analizi sistemi ile birlikte sağlanan yazılımların deneye hazırlık aşamasından tüm sonuçların elde edilmesine ve raporlanmasına kadar kullanıcı tarafından görülen bir kullanıcı arayüzü vardır. Kullanıcı arayüzünün arkasında çalışan program modülleri, ticari yürüyüş analizi sistemlerinin ticari sınırları olarak açıklanamamaktadır. Öte yandan çoğu ticari sistem araştırma amaçlı kullanıma olanak vermek üzere ham ve yarı işlenmiş deney verilerini de kullanıcıya sunabilmektedir. Burada ODTÜ-Kiss sistemi üzerinde çalışan Kiss-DAQ veri toplama yazılımı ile Kiss-Gait yürüyüş analizi programlarının önemli olduğu düşünülen noktalara değinilecektir.^[2] Şüphesiz, ticari sistemlerin burada sunulan sistemden önemli farkları olabileceği açıktır.

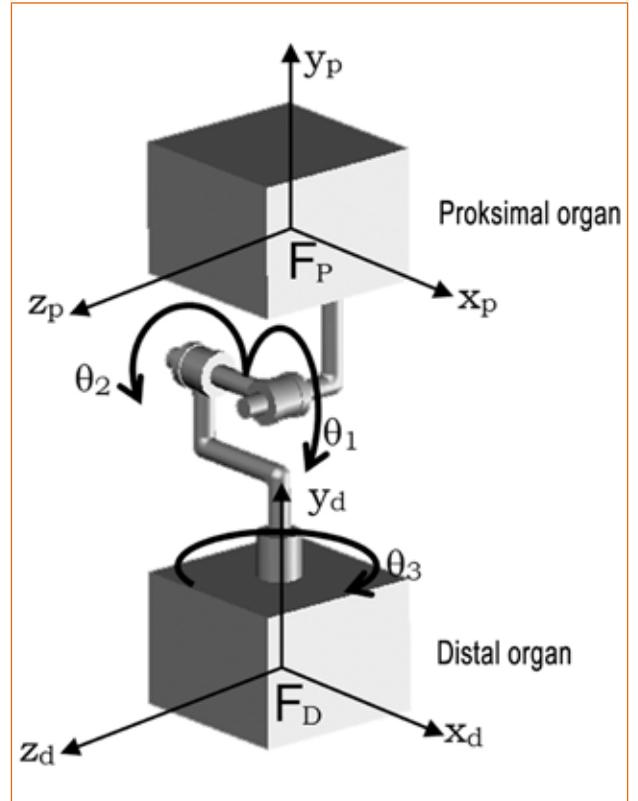
Kinematik veriler

Çoğu sistemde alt ekstremiteler üzerinde bulunan işaretleyici noktalarının laboratuvar koordinat sistemindeki koordinatları veya eylemsizlik ölçerlerin her birinin

kendi koordinat sisteminde ivme ve açısal hız bileşenleri (ve kimi zaman yerçekimi vektörünün konumu aracılığıyla eylemsizlik ölçeğin yer koordinat eksenine göre açısal durumu) kinematik girdilerdir. Bu girdiler, alınan ham verilerin (iki boyutlu kamera görüntülerinin veya eylemsizlik ölçüm sistemlerinden gelen elektriksiz sinyallerin) bir ön işlemden geçirilmesiyle elde edilir. Yürüyüş ile ilgili kinematik bilgilerin elde edilmesine yönelik ilk adım pelvis, uyluk, baldır ve ayakların konumlarının laboratuvar koordinat sisteminde elde edilmesidir. Üç boyutlu uzayda şekil değiştirmeyen (rijid) bir cismin konumu cisim üzerinde, bir doğru üzerinde olmayan üç noktanın konumları ile belirlenebilir. Ancak yürüyüş analizinde genellikle ilgilenilen yedi cisim (pelvis, iki uyluk, iki baldır ve iki ayak) için izlenecek toplam 21 nokta belirlemek yerine, bu cisimler birbirlerine eklemlerle bağlı oldukları için, eklem merkezi olarak anılan ve eklemde bir araya gelen distal ve proksimal uzvun tüm hareketleri için çakışık olan noktalar kullanılarak gerekli nokta sayısı azaltılır. Öte yandan kalça, diz ve ayak bileği eklemlerinin her biri birbirine dik eksenlerde ve anatomik eksenler çevresinde dönme yapan üç döner eklem (menteşe) ile modellenir (Şekil 1). Her bir eklem için bu üç eksenin kesiştiği nokta, varsayılan eklem merkezidir ve proksimal ve distal uzuvlar üzerinde bulunan ve her an çakışık olan noktalardır. Bu yaklaşım tüm eklemlerin ideal bir küresel eklem olduğu varsayımına dayanır ve eklemlerde olabilecek öteleme hareketlerini göz ardı eder. Böylelikle pelvis ile uyluk arasında kalça eklem merkezi, uyluk ile baldır arasında diz eklem merkezi, baldır ile ayak arasında ayak bileği eklem merkezi çakışık noktalar olarak kullanılır. Öte yandan kinematik sistemdeki ölçüm hatalarını azaltmak, yumuşak doku etkisi nedeniyle işaretleyici noktalarında oluşan hareketin deney sonuçlarına etkisini azaltmak gibi nedenlerle, gereken en az sayıdan daha fazla işaretleyici noktası kullanılabilir. Burada dikkat çekici noktalardan birisi de “varsayılan” eklem merkezinin yerinin kestirilmesidir. Bu kestirimde yapılacak önemli hatalar kinematik ve kinetik sonuçları etkiler.^[7] Klinik yürüyüş analizi deneylerinde kalça eklem merkezini belirlemek üzere “antropometrik yöntem” olarak adlandırılan ve denek üzerinde dıştan alınan ölçülerle eklem merkezinin yerinin bir denklem aracılığıyla kestirilmesi kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem kalça patolojisi olmayan deneklerde genellikle yeterli hassasiyette sonuç vermektedir. Ancak anatomik özellikleri sıra dışı deneklerde kestirimlerin sorgulanması, gerekli görülmesi durumunda kestirimin diğer yöntemlerle doğrulanması yerinde olur. Kalça merkezini belirlemek için diğer iki yöntem ise, denegün kalça eklemine belirli hareketler yaptırması sonucu (veya yürüyüş sırasındaki hareketi kullanılarak) uyluk üzerinde bulunan işaretleyici noktalarının pelvise göre

küresel yörünge izlemesine dayanan ve kürenin merkezini kalça eklem merkezi olarak kabul eden fonksiyonel yöntem ve çeşitli tıbbi görüntüleme yöntemlerinden birisi ile femur başının veya asetabulumun bir küreye tamamlanarak bu kürenin merkezini kalça eklem merkezi olarak kabul eden girişimsel yöntemdir. Diz ve ayak bileği eklem merkezlerinin kestirilmesinde kimi sistemler özel merkezleyici aparatları kullanarak ve bu aparatları belirli, anatomik noktalara tutturarak yaparken, kimi sistemler daha basit ve kaba yaklaşımlarla cilt üzerine yapıştırılan işaretleyici noktalarından giderek diz ve ayak bileği eklem merkezlerini kestirmektedir. Her durumda, ilgili işaretleyici ve merkezleme aparatının uygun anatomik noktalara deneyimli bir operatör tarafından ve özenle takılması diz ve ayak bileği eklem merkezi kestirimlerindeki hataları azaltacaktır.

Eklem aracılığıyla birbirine bağlı iki uzvun bağlı konumları Euler veya Kardan açıları kullanılarak belirlenebilse de bu iki yaklaşım belirli bir sıraya bağlı olmaları nedeniyle yürüyüş analizi uygulamaları için uygun değildir. Grood ve Suntay tarafından önerilen eklem koordinat sistemi, dönme açılarının anatomik olarak da anlamlı olarak tanımlanmasını sağlamıştır (Şekil 1).^[8]



Şekil 1. Kalça, diz ve ayak bileği eklemleri için kullanılan mekanik eklem modeli.

Kinetik veriler

Kuvvet platformu tarafından ölçülen her bir ayak için bileşke yer tepki kuvvet vektörünü tam olarak tanımlayan, kuvvet platformu eksen takımına veya laboratuvar eksen takımına göre üç kuvvet ve üç moment bileşeni sistemin girdisidir. Kinematik veriler aracılığıyla hesaplanan uzuvların anlık konumları ve yürüyüş sırasındaki ivmeli hareketten kaynaklanan eylemsizlik kuvvet ve momentleri kullanılarak önce ayak bilekleri, ardından diz ve kalça eklemlerinde oluşan eklem anatomik eksenlerindeki eklem tepki kuvvet ve moment bileşenleri hesaplanır. Eylemsizlik kuvvetlerinin hesaplanması için ilgili uzun kütle, kütle merkezinin yeri ve kütle merkezi çevresindeki kütle eylemsizlik momentleri çeşitli varsayımlar kullanılarak kestirilir. Genellikle deneğin boyu, beden kütlesi, bacak uzunlukları gibi klinik ortamda belirlenmesi kolay parametreler kullanılarak bu kestirimler yapılır. Doğrusal ve açısız ivmeler, kinematik sistem tarafından toplanan işaretleyici noktaları bilgisinden elde edilen uzuv doğrusal ve açısız konum bilgisinin zamana göre iki defa türevinin alınması ile veya eylemsizlik ölçüm sistemi kullanılıyorsa açısız ivmelerin açısız hız vektörünün zamana göre bir kez türevinin alınması ile doğrusal ivmeler ise elde edilen ölçümlerden hesaplanmaktadır. Her durumda, içinde sinyalle birlikte gürültü de bulunan verilerin zamana göre türevlerinin alınması (özellikle kameralı sistemlerde iki kez türev alınması), veriler uygun koşullarda filtre edilmezlerse gürültünün sinyalden baskın olmasına neden olabilmektedir. Ancak, normal hızda yürüyüş için ağırlık nedeniyle oluşan kuvvetler ve kuvvet platformlarıyla ölçülen kuvvetlerle karşılaştırıldığında, eylemsizlik kuvvetlerinde kütle, kütle eylemsizlik momentleri, doğrusal ve açısız ivmeler nedeniyle oluşan hatalar genellikle yürüyüş analizi sisteminin ölçüm hassasiyet sınırının altında kalmaktadır.^[9] Eklem tepki kuvvet ve momentlerinin hesaplanmasında kinematik sonuçlar da kullanıldığı için kinematik veri toplama veya bu verilerin işlenmesinde (örneğin eklem merkezi kestiriminde) yapılacak bir hata etkisini kinetik sonuçlarda da belirgin biçimde gösterir.^[7]

Diğer Sonuçlar

Yürüyüş analizi sistemlerinin çoğu kinematik ve kinetik verilerin hesaplanmasından sonra bu verileri değişik biçimlerde sunabilirler. En sık ve yaygın kullanılan biçim bağımsız değişken olarak bir yürüyüş çevriminin yüzdelik kısmına karşılık kinematik veya kinetik değişkenin bir grafik aracılığıyla sunulmasıdır. Burada iki ekstremitenin arasında olabilecek farkların daha rahat görülebilmesi için, sağ ve sol bacak hareketleri arasında yürüyüşte oluşan zaman farkı giderilecek biçimde, iki ekstremitenin için de belirli bir zaman noktası (örneğin

topuk vuruşu) temel alınarak ekstremitelerden birisinin verisi diğerine göre kaydırılır. Kinetik veriler kimi zaman deneğin beden ağırlığına bölünerek normalize edilir ve yüzde cinsinden sunulur. Yürüyüşün görselleştirilmesi elde edilen sonuçların yorumlanması sırasında çok önemli bir araçtır. Ekranda deneğin yürüyüşü ile kinematik açıdan tutarlı bir model yürürken seçili kuvvet veya moment vektörlerinin model üzerinde gösterilmesi, deneğe ait video kaydının canlandırma modeli ile eşzamanlı olarak gösterilmesi de yürüyüşle ilgili önemli ipuçları sağlar.

SONUÇ

Bu yazıda tipik bir üç boyutlu bilgisayarlı yürüyüş analizi sisteminin veri toplama ve işleme sırasında izlediği adımlar ana hatları ile sunulmuştur. Sunulan bilgiler 16 yıl önce çalışmaya başlamış, tasarım ve üretimi bundan da eskiye dayanan, amatörce geliştirilmiş ama sonuçları ticari sistemlerle karşılaştırılarak tatmin edici bulunmuş olan ODTÜ-Kiss yürüyüş analizi sisteminde edinilmiştir.^[10] Ticari sistemlerin geliştirilmesinde çalışan değişik disiplinlerden çok miktarda profesyonel işgücünün varlığı ve firmalar tarafından oluşturulan bilgi birikiminin büyüklüğü göz önüne alındığında her bir ticari ürünün, burada sunulan ana hatlardan çok daha fazla ayrıntı içerdiği göz önünde tutulmalıdır. Öte yandan, ticari sistemlerin açıklanmayan çalışma ayrıntıları ile ilgili, genel bir bilgi sunulması amaçlanmıştır.

Teşekkür

Bu yazı ODTÜ-Kiss sistemini kuran ekip içerisinde bulunan Dr. Cenk Güler'in anısına adanmıştır. Yazar ODTÜ-Kiss sisteminin kurucu ekip başkanlığını yapan ve sistemin isim babası olan Prof. Dr. S. Turgut Tümer'e, yıllar içinde sistem üzerinde sabır ve heyecanla çalışmalar yapan, iyileşmesine katkıda bulunan, isimlerini burada sıralama olanağı bulunmayan çok sayıda lisansüstü öğrencilerimize, birlikte çalıştığımız değişik disiplinlerden hekimlere ve laboratuvarımıza yürüme analizi deneyleri için gelen tüm gönüllü deneklere ve hastalara teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Tümer ST, Güler HC. Diz osteoartriti bulunan hastaların ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinde oluşan momentlerdeki değişikliğin incelenmesi, Proje Sonuç Raporu, TÜBİTAK MİSAG-28; 1995.
2. Güler HC. Alt ekstremitenin biyomekanik modellemesi ve yürüyüş sırasında ayağın benzetimi, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara; 1998.
3. Güler HC. Yürüyüş analizi: Temel kavramlar ve uygulama. In: Beyazova M, Kutsal YG, editörler: Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon, 2. baskı. Güneş Tıp Kitabevi; 2011. p.401-26.

4. Shafiq MS, Tümer ST, Güler HC. Marker detection and trajectory generation algorithms for a multicamera based gait analysis system. *Mechatronics* 2001;11: 409-37.
5. Vaughan CL, Davis BL, O'Connor JC. *Dynamics of Human Gait*, 2nd ed. Cape Town: Kiboho Publishers. 1999.
6. Davis RB, Ounpuu S, Tyburski D, Gage JR. A gait analysis data collection and reduction technique. *Hum Move Sci* 1991;10:575-88.
7. Yousefi A. In-vivo verification of different hip joint center estimation methods in gait analysis for healthy and pathologic subjects. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara; 2014.
8. Grood ES, Suntay WJ. A joint coordinate system for the description of three-dimensional motions: application to the knee. *J Biomech Eng* 1983;105(2):136-44.
9. Erer KS. Verification and MATLAB implementation of the inverse dynamics model of the METU gait analysis system, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara; 2008.
10. Civek, E. ODTÜ-Kiss ve Ankara Üniversitesi-VICON yürüyüş analizi sistemlerinin kinematik sonuçlarının karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara; 2006.