

İNSANSI ROBOTLARDA KAS İSKELET MODELİ YAKLAŞIMI

Hikmet İMAMOĞLU¹, Süleyman Murat BAĞDATLI²

Accepted: 2024-07-17
DOI: 10.47118/somatbd.1493355

ÖZ

Hareket edebilmek eylemi canlılığın bir sonucudur ve en gelişmiş türü ise 2 ayak üzerinde yürüme eylemidir. Belirli uzuvların kendi hareketlerini periyodik olarak tekrarlamasıyla yürüme eylemi meydana gelir. Bu hareket “adım” olarak adlandırılır. Yürüme hareketi adımların tekrarlanmasıyla oluşur. İnsan gövde yapısal tasarımı farklı yaklaşımlar ile günümüz teknolojisine uyarlamaya çalışılmıştır ancak bu yaklaşımlar esnasında teknolojik açıdan bir fark yaratmak isterken bir takım temel gerçekleri ihmal etmişlerdir. Bu çalışmada, insansı yürüme hareketi adımlama biçiminde parçalara bölünerek hareket kabiliyeti ve denge kabiliyeti olarak 2 ye ayrılmış ve matematiksel olarak incelenmiştir. Hareketi sağlayacak ideal bir fiziksel model tasarım gerçekleştirilmiştir. Yürüme hareketinin incelenmesi sonucu ortaya çıkan matematiksel model örnek hareketlerde uygulanarak analiz edilmiş elde edilen grafiksel sonuçlarla yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansı robot, İnsan yürüyüşü, Kas-İskelet Modeli, İnsansı Denge Adımı

ABSTRACT

The act of being able to move is a result of vitality, and the most advanced type is the act of walking on two legs. The act of walking occurs when certain limbs periodically repeat their own movements. This movement is called a "step". The walking movement is formed by the repetition of steps. Human body structural design has been tried to adapt to today's technology with different approaches, but while trying to make a technological difference during these approaches, they neglected some basic facts. In this study, the humanoid walking motion was divided into parts in the form of stepping and divided into 2 as mobility and balance ability and analyzed mathematically. An ideal physical model design that will provide movement has been realized. The mathematical model that emerged as a result of the examination of the walking movement was applied to the sample movements and analyzed with the graphical results obtained.

Keywords: Humanoid robot, Human-gait, Musculoskeletal model, Humanoid balance step

1. GİRİŞ

İnsan düşünce sisteminin ve mantık yapısının bir makinanın iş yapabilme kabiliyetleri ile birleşmesinden ortaya çıkacak sonucun muhteşemliği tartışılmayacak bir gerçektir. Bir

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 45140 Manisa,0000-0002-5683-6478

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 45140 Manisa,0000-0002-5152-9604

makınaya, makina olarak sahip olduğu avantajların yanı sıra gerek şeklen gerek zihnen insan gövdesini taklit edebilecek bir tasarım ortaya konulması; bugün “gelişmiş” olarak nitelendirilen tüm teknolojilerin ve idari/siyasi yapıların önemle üzerinde durduğu bir konudur.

İnsansı robotlar; karmaşık bir mekanik yapıya sahip olan, yapay zekâ ile donatılmış robotik sistemlerdir. Bu sistemler, insanların hareket yeteneklerine benzer hareket edebilecek şekilde tasarlanmışlardır. İnsansı robotların geliştirilmesine yönelik süregelen çalışmalar vardır. Teknolojinin ilerlemesiyle çalışmalar hız kazanmış, gerçekleştirilebilirlik açısından bu gelişmeler bilim insanlarına umut olmuştur.

Canlıların temel ihtiyaçlarından biri olarak hareket edebilmek yeteneğini, 2 ayak uzvu ile gerçekleştirebilmek gelişmiş canlılara ait bir özelliktir. Yürüme, bilinçli ya da bilinçsiz olarak yapılabilen, canlının bir yerden bir yere gidebilmesi için gerçekleşen bir eylemdir. [1]. Yürüme eylemi olarak adlandırılan bu süreç, birtakım etkenlere göre değişebilmektedir, bu bağlamda incelenen yürüme hareketi, diğer bütün etkenlerden bağımsız olarak, dengeli ve zamandan bağımsız nizami hareketler bütünüdür.

Hareketlerin incelenmesi ve fiziksel olarak yorumlanması tarih boyunca birçok bilim insanının önemle üzerinde durduğu bir konudur. Eylemleri meydana getiren hareketlerin nasıl gerçekleştiği, etkileri ve sonuçları tüm insanlık adına kabul edilebilir biçimde yorumlara ihtiyaç duymuştur. Yürüme mekaniği, insansı robotlar ve diğer yapay sistemlerin geliştirilmesinde büyük bir rol oynamıştır. İnsanların yürüme sürecini anlamak ve taklit etmek, insansı robotların doğal ve etkili bir şekilde hareket etmelerini sağlamak için önemlidir. Bu alanda yapılan araştırmalar, robotik sistemlerin yürüme becerilerini geliştirmek, dengeyi sağlamak, adaptif adım atma stratejileri oluşturmak gibi konuları ele almıştır.

İnsan gövde yapısının mekanik bir sistem üzerine modellenmesi esnasında sistemin her bir elemanın en yakın karşılıklarının meydana getirilmesi ve doğru bir algoritma ile çalıştırılması gereklidir. Geliştirilen neredeyse tüm iki ayaklı robotlarda uzuvların hareketleri, eklemlerde bulunan motorlar ile sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Robot ve özellikle insansı robot konuları elektronik ve bilgisayar mühendisliklerinin çalışma konuları ile sınırlı kalmıştır, ancak burada mekanik ve dinamik pek çok çalışma vardır. Sensörler ve algoritmalar aracılığıyla bu sorunların üstesinden gelinmeye çalışılsa da hareket eylemlerinin temelinde bir dinamik, bir matematik vardır. Bu bağlamda öncelikle yürüme hareketini mekanik olarak ele almak gereklidir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Yürüme Hareketinin Mekanik Modellemesi

Yürüme hareketi, birtakım canlıların veya mekanik sistemlerin bir yerden başka bir yere ulaşmak için gerçekleştirdikleri hareket biçimidir. Yürüme hareketi, belirli uzuvların kendi hareketlerini periyodik olarak tekrarlamasıyla meydana gelir. Ortaya çıkan hareket “adım” olarak adlandırılır. Yürüme hareketi adımların tekrarlanmasıyla oluşur. Bu konuda literatürde yapılan bazı çalışmalarda, canlılarda yürüme hareketinin modellenmesi incelenmiş, farklı tipte eğri uydurma yöntemleri ile yürüme hareketinin matematiksel bir formda modellenebileceği görülmüştür [2].

İki ayak üzerinde yürüme eyleminin gerçekleşebilmesi için sistem, belirli zamanlarda tek ayak üzerinde, belirli zamanlarda her iki ayak üzerinde denge şartını sağlamalıdır. Denge şartlarını yerine getiren yürüme hareket fonksiyonları elde edildiğinde bu sürekli fonksiyon matematiksel olarak modellenilebilir ve konum değişimleri incelenebilir [3].

Literatürde yürüme hareketi, periyodik hareketin birtakım aşamalara bölünerek tanımlanmasıyla incelenmiştir. Bu aşamaların her birinin farklı zamanlarda gerçekleşmesinin yanı sıra, süreç boyunca varlığını sürdüren aşamalarda mevcuttur. İki ayak üzerinde yürüme hareketini modellemek için adımlama hareketini aşamalara bölerek mekanik açıdan incelemek gereklidir [4]. Yürüme eylemi, Şekil 1’ de gösterildiği gibi incelendiğinde, denge ve yer değişimi şeklinde modellenmesi ile mümkündür.

Başlangıç Durumu: Yürüme hareketi, başlangıç pozisyonunda başlar. Ayaklar veya bacaklar yerde dururken, vücut dengede ve dik bir duruşta bulunur. İlk durumda iki ayak uzvu üzerinde ayakta duran bir sistem için sistemin ağırlık merkezi izdüşümü yere temas eden ayak uzuvları arasında olacaktır.

Yükleme: Adımlamanın ilk aşaması, sistem ağırlığını taşıyacak ayağın üzerine sistem ağırlık merkezini taşımaktır. Harekete başlayabilmek için sistem ağırlık merkezini bir ayak uzvu üzerine getirmesi gerekmektedir. Seçilen ayak uzvu sistemi taşıyacaktır. Sistem ağırlığı, seçtiği ayak üzerinde taşınırken, diğer ayağını yerden kaldıracaktır. Bu noktada ayak taban uzvuna binen yük artacaktır. Yer ile temas etmeyen ayak uzvunun ağırlık merkezinin sisteme etkisini yere temas eden ayak karşılayacaktır.

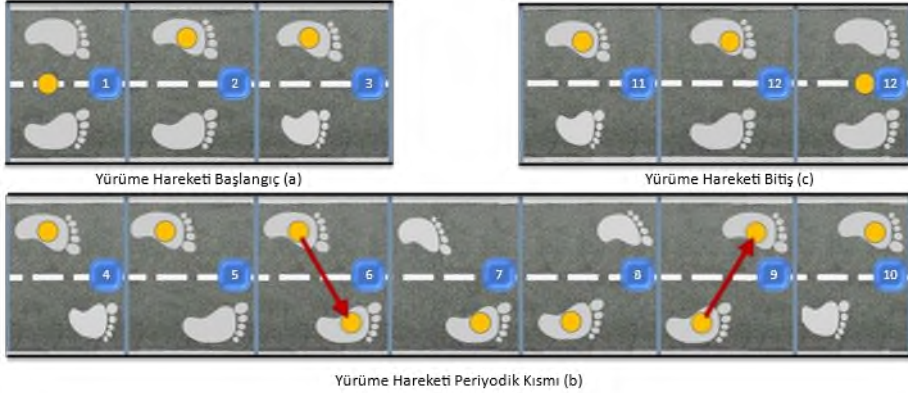
Adım Atma: Taşıyıcı ayak sistem ağırlığını taşıırken, diğer ayak sistemin bir sonra ki konumuna ulaşmak üzere hedeflediği koordinat bileşenlerine göre hareketini gerçekleştirecektir. Şekil 1b. ‘de gösterilen yürüme hareketinin periyodik kısmını göstermektedir.

Dengenin Korunması: Yürüme hareketi sırasında, mekanik dengenin sürekli olarak korunması çok önemlidir. Dengenin korunması, dış etmenlere veya zeminin eğimine bağlı değişiklik gösterebilir.

Koordinasyon: Yürüme hareketi, bacakların ve diğer beden parçalarının koordinasyonunu gerektirir. Ağırlık merkezi diğer ayak noktasına ulaştınca, sistemin ağırlığını başlangıç konumundan farklı bir noktada bulunan diğer ayak taşımaya başlamış olacaktır. Geride kalan ayak elemanı yeni konumuna gitmek üzere hedeflenen koordinata ötelenir.

Yürüme hareketinin dinamik modellenmesi sonucunda iki ayak elemanın farklı referans eksenleri merkezi kabul edildiği birbirlerine göre konum değişimleri ile modellenilebilmektedir. Ağırlık merkezi, sağ ayak tabanı konumu ve sol ayak tabanı konumu ile ifade edilebilen yürüme hareketi Şekil 1’deki gibi gösterilebilmektedir [5]. Şekil 1. ‘de bulunan Yürüme hareketi Modeli bu çalışma kapsamında özgün olarak çizilmiştir. Yürüme hareketi ağırlık merkezinin iki ayak tabanı arasında bulunması (sistemin ayakta dik durması) ile başlar. Yürüme hareketi başlangıcı ise ayaklardan birinin sistem ağırlığını tek başına taşıması ve diğer ayağın serbest hareket edebilmesiyle Şekil 1a ‘da gösterildiği gibi başlar. Yürüme hareketinin periyodik kısmı, adımlama olarak da adlandırılabilir Şekil 1b ‘de adımlama işlemi gösterilmektedir. Adımlama hareketi sistem ağırlığını seçilmiş bir ayağın taşımasıyla başlar ve diğer ayağın sistemin bir sonraki adımda ulaşacağı hedef pozisyona ilerlemesiyle devam eder. Serbest ayak hedef

pozisyona ulaştığında ağırlığı taşıyıcı ayaktan, hedef pozisyonda bulunan ayağa ötelenir. Harekete devam edilip edilmeyeceği sorgulanarak, eğer adımlama işlemi bitecekse Şekil 1c 'de gösterildiği geride kalan ayak, taşıyıcı ayak ile yatay eksende paralel duruma getirilir. Sistemin ağırlık merkezi izdüşümünü bir ayaktan, iki ayak arasındaki konumuna getirilir.



a) Yürüme Başlangıç b) Yürüme Periyodik Kısmı c) Yürüme Bitiş
Şekil 3. Yürüme Hareketi Modeli

Sistemin denge merkezi tayini için, bacağın üst ve alt kısmı, bağlantılar için gerekli elemanların tamamı bütünü kütleleri oranında hesaplanmasıyla sistem ağırlık merkezi tayin edilebilir. Yürüme hareketi üzerindeki araştırmalar ve geliştirmeler, insansı robotlar için daha doğal ve etkili yürüme yetenekleri sağlamak üzerine odaklanmaktadır. Ayak tabanı noktaları ve sistem ağırlık merkezi konumlarına göre Tablo 1' deki gibi 3 farklı durumdadır.

TABLO 4. Ağırlık Merkezi Bulunabileceği Durumlar

Ağırlık Merkezi	Gerçek Durum	Denge Durum
Ayak ortasında	Ayaklar yükü birlikte taşır	0
Sağ ayak üzerinde	Sağ ayak tüm yükü taşır	1
Sol ayak üzerinde	Sol ayak tüm yükü taşır	2

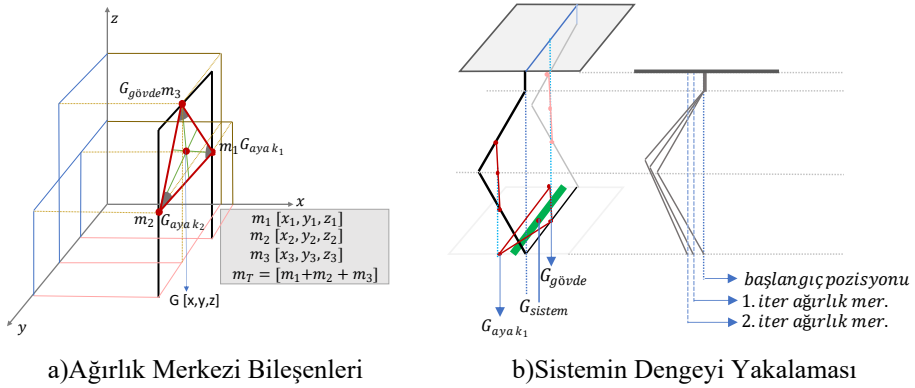
İyileştirilmiş Denge Kontrolü; daha gelişmiş hesaplamalı yöntemler, sensörler ve kontrol algoritmalar ile insansı robotların dengelerini daha iyi şekilde korumasını sağlar. Yürüme hareketi için ihtiyaç duyulacak olan temel parçalar ile gerçekleştirilecek bir modelin denge sistemi için mekanik denge sisteminin basitleştirilerek incelemek gereklidir.

****Denge ve Hareket Arasındaki İlişki Her Zaman Korunmalıdır****

İnsan gövde yapısı tasarımı yapısal olarak incelendiğinde bu sistemin denge ve hareket kabiliyetleri bakımından davranışları, bütünü oluşturan her bir parçanın sisteme etkisi ile mümkündür [6]. Başka bir deyişle sistemi oluşturan her bir parça sisteme bir etki doğurmaktadır. Bu etkilerin bileşke davranışı sistemin davranışı olarak nitelenebilir. Yürüme sistemini meydana getiren uzuvlar, sağ bacak, sol bacak ve kalça olarak 3 eleman olarak modellenebilir.

2.1.1. Denge

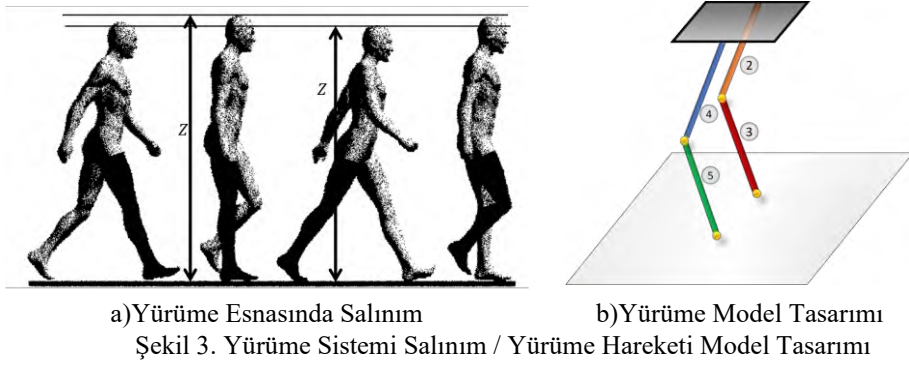
Her parçanın her bir elemanının kendi ağırlıkları, ağırlık merkezi konumları olduğu gibi sistem içerisinde sahip oldukları toplam ağırlığına katılım oranlarınca sisteme etkileri de bulunmaktadır. Başlangıç konumunda sistemin dengede kalabilmesi için; başlangıç hedef konumlarının ağırlık merkezi izdüşümü üzerinde kalması gerekmektedir ve başlangıç hedef pozisyonu hesaplanarak bulunur. Adım boyunu belirleyebilmek için başlangıç konumunda ki ayak yüksekliğini kısaltmak amacıyla bacağına bir kırılma açısı verilir [7]. Kırılma esnasında bacağın aldığı pozisyon, ayağın adım atarken ulaştığı en uzun mesafeyi gerçekleştirmesini sağlar. Bu nedenle sistem dik pozisyonda ayakta dururken dizlerine bir açı verir [8].



Şekil 2. Yürüme Sistemi Dik Duruş / Denge Pozisyonu

Sistemi taşıyan ayakların konumu; sistem ağırlık merkezinin taban düzlemine izdüşümü ile ayak taban noktalarının statik denge şartını sağladığı pozisyonlarda olması ile bulunur. Ayaklar başlangıç konumunda iken hesaplanan ağırlık merkezi konumunu hedef alarak geldiği durumda, sistemin ağırlık merkezi konumu tekrar değişmektedir. Yeniden hesaplanan ağırlık merkezi konumuna taşınan ayaklar, bu konuma da ulaştığında, yeni bir ağırlık merkezi olacaktır. Sistem üzerinden seçilen elemanların sayısı artırıldığında ise hesaplanabilecek olan ağırlık merkezi konumu hassasiyeti artırılmış olacak ve sistemde bulunan her bir sonlu elemanın sisteme etkisini açıkça hesaplanabilecektir. Sistemi oluşturan elemanların sayısının artırılması Teorik olarak iğne-uçlu ayak modeli mümkün olacaktır [9].

Yürüme hareketi “tekrarlanan adımlardan” meydana gelir. Adım atabilmek için sistem dik konumdan sonra atılacak adımın maksimum uzunluğunu sağlayacak toplam uzunluğu belirlemelidir. Adım boyunu belirleyebilmek için başlangıç konumunda ki ayak yüksekliğini kısaltmak amacıyla sağ bacak, sol bacak ve kalça eklemlerinden meydana gelen sistemin, bacaklarına ilave bir eklem eklenerek kırılma esnasında bacağın aldığı pozisyon ile ayağın adım atarken ulaştığı en uzun mesafeyi gerçekleştirmesi sağlanır [10]. Yürüme hareketini sağlayabilecek en az bileşenli sistem iki parçadan meydana gelen ve iki bacaklı bir tasarımın bir gövde üzerinde birleşmesi ile modellenebilecektir. Bu model tasarım; proje kapsamında tasarlanarak 5 elemandan meydana gelen tasarım görseli Şekil 3b ‘de gösterilmektedir [11].



Ayak merkezi konumları sırasıyla X_{R_0} , Z_{R_0} , Y_{R_0} , X_{L_0} , Z_{L_0} , Y_{L_0} , olmak üzere sistem serbest şekilde bırakıldığında kalça ve ayaklar aynı eksende kalmak üzere başlangıç konumları 0 olacaktır. Sistem gövdesini oluşturan eleman belirli bir “Z” yüksekliğinde bulunduğu, sistem ağırlık merkezi G_x , G_y , G_z hesaplanabilir. Ayakların merkezlerinin, sistemin devrilmeye karşı dengesi için taban düzleminde ağırlık merkezi izdüşümüne statik denge şartını sağladığı hedef konumlara gelmesi gerekir. Ayak merkez konumlarının hedef noktaya gelmesi; 5 elemandan meydana gelen bir sistem ele alındığında iterasyon sonucunda gerçekleşmektedir. İnsan gövde yapısının iki ayak üzerinde sağa-sola devrilmesi x ekseninde dönme moment dengesi ile, öne-arkaya devrilmesi ise y ekseninde dönme moment dengesi ile mümkün olacaktır [12]. Sistemin her bir hareketi sonucunda ulaşacağı yeni ağırlık merkezi konumu meta-sezgisel olarak hesaplanmalı ve sayısal iterasyon yöntemleri ile incelenmelidir. Mekanik olarak sistem denge durumu göz önüne alındığında tek seferde ayakların denge şartlarını sağlayan doğru konumlarını bulmak, sistemin hızlı ve tek seferde doğru sonuca ulaşması ile sistemin kararlı çalışmasını sağlanacaktır.

2.1.2. Hareket

İki ayak zemin ile temas halinde ve sistem ağırlık merkezi iki ayak arasında kalmak kaydıyla; sistemin yapabileceği 3 farklı hareket vardır ve bunlar sistemin ileri-geri sallan, sağa-sola sallan ve diz eklemleri yardımıyla yukarı-aşağı çök-kalk şeklinde olacaktır. Sistemin çözülebilir denklemlerine bu işlemleri yaptırabilmek için sistemin hareket fonksiyonunu $F(hareket) = [X_R, Z_R, Y_R, X_L, Z_L, Y_L]$ gibi tanımlayabiliriz. Başlangıç pozisyonunun her iki ayak içinde ayrı ayrı 0 olduğu durumda hareket fonksiyonu $F(hareket) = [0,0,0,0,0,0]$ biçiminde tanımlanabilir.

Ayakların “X” değerlerine pozitif sayılar verilmesi ile $F(hareket) = [X + x, 0,0, X + x, 0,0]$ eklemi ileri-geri sallan hareketi yapacaktır.

Ayakların “Y” değerlerine pozitif sayılar verilmesi ile $F(hareket) = [0,0, Y + y, 0,0, Y + y]$ eklemi sağa-sola sallan hareketi yapacaktır. Eğer “y” mesafesi ağırlık merkezi G_y bileşenine eşitlenirse, sistem ağırlığını tek bir ayak taşıyacaktır.

Ayakların kalça eklemi ile arasında “Z” mesafesi üzerinden ilave bir değerlerine pozitif sayı verilmesi ile sistem dizlerini kırarak ve $F(hareket) = [0, Z + z, 0,0, Z + z, 0]$ ayaklar ile kalça eklemleri arasında ki yeni mesafe Z-z olacak şekilde bir hareket gerçekleşecektir.

Sisteme seri olarak farklı pozisyonların çözdürülmesiyle sistem her bir konum değeri için pozisyon hesabı yaparak hareketi tamamlamış olur. Sisteme n bileşenli bir pozisyon dizisi tanımlarsak, sistem bu pozisyonları sırayla yerine getirdiğinde istenilen hareket fonksiyonunu gerçekleştirecektir. Bu değerleri sürekli bir biçimde modelleyebilmek için, trigonometrik bir fonksiyon olarak sinüs fonksiyonuna $f(x) = A \sin(\beta x + \alpha) + B x + C$ gibi modelleyebiliriz. Bu fonksiyondaki değerleri adımlama için $F(X)$, $F(Z)$, $F(Y)$ değerleri için yerine yazıldığında, sinüs dalga formunun frekansı ve genliği tanımlanabilecektir. Mekanizmanın hareketleri hem sinüzoidal hem de farklı dalga şekillerinde yerine getirmesi gerekecektir. Bu hareketler esnasında gecikme süresi çok önemli olacaktır. Sistemin sensörlerden alacağı verilere göre bu hareketin doğrusal ya da sinüzoidal değerler ile gerçekleştirmesi gerekecektir. Yürüme Fonksiyonu: Yürümek işlemler dizisi bir fonksiyon haline getirildiğinde, periyodik hareketin, istenilen bir anda konum değişkeni tanımlanabilir. Bu değerler denge şartlarına göre sistem ağırlık merkezi izdüşümü hesaplanacak, X ve Y koordinatları seçilen ayak üzerinde olacak şekilde tekrar uygulayacaktır. “D” değerlerini Denge Durumuna bağlı olarak yazdığımızda, ağırlık merkezi G_y değerini sağlayacak “D” değerini sağlayarak denklemleri çözecektir. $F(Denge_{durum}) = [G_x \rightarrow f(X), G_y \rightarrow f(Y)]$

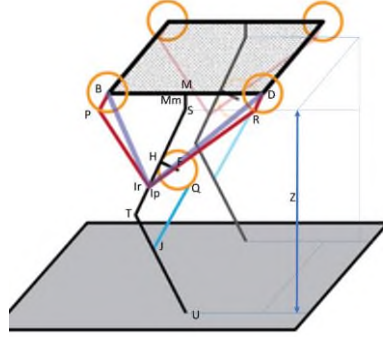
2.2. Mekanizma

İnsan gövde yapısal tasarımı üzerinden, taşıyıcı unsuru olan iskelet sistemini robotik yürüme sistemi olarak modellediğimizde basit bir kinematik zincir olarak 5 elemanlı yapısal tasarımı ele alınabilir. Bu taşıyıcı sistem modeline hareket verebilmek için bir mekanizma tasarımı gerçekleştirildiğinde, insan gövde yapısında bulunan kas yapılarının uzayıp kısılması ile ortaya çıkan bu uzaklık değişimi ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Kas iskelet sistemi modeli üzerinde ilgili kinematik denklemler çözüldüğünde x ekseninde, y ekseninde ve bu eksenlerdeki değişimlere bağlı olarak z ekseninde bir konum değişimi sağlanabildiği ortaya çıkmaktadır. X eksenini ayağın adım atması için gerekli konum değişimini, Y eksenini ayağın adım atma işlemi sırasında platformun dengeleme eksenini belirleyecektir. Burada 2 eyleyici ile 2 ekseninde istenilen konum değişimi sağlarken Z ekseninde bağlı bir değişim ortaya çıkacaktır. Yürüme esnasında ayak kalça arasında arasındaki dikey mesafe harekete bağlı olarak değişir [13]. Bu değişime salınım adı verilir. Salınım genliği yürüme esnasında taşıyıcı uzuvların uzayda ki konumlarını değiştirir. Taşıyıcı uzuvları bu konumda tutacak kas modelleri yürüme esnasında harcanacak enerjiyi etkiler [14]. Bu bağlı değişimi ilave bir eyleyici ile tatbik edebilir olduğumuzda ayakları istenilen konumlara getirebilecek bir kinematik zincir tasarımı kendiliğinden ortaya çıkmaktadır.

Literatürde, yürüme hareketini iki ayak üzerinde gerçekleştirebilecek birçok mekanizma tasarımı üzerine çalışılmıştır [15]. Yürüme hareketini sağlayan mekanizmalar basit bir biçimde 5 elemandan meydana gelen bir sistem olarak tasarlanmıştır, ancak her bir kinematik elemanın mafsalların üzerinde bulunduran eyleyiciler ile tahrik edilmiştir bu model eklem tahrikli olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 4a da gösterilmektedir [16]. İnsansı bir sistemde ise yürüme hareketi, iskelet sistemi üzerinde kurulu başka bir sistem olan kas sistemi ile gerçekleştirilmektedir. İnsansı robotlar özelinde, yürüme hareketini gerçekleştirebilecek yürüme sistemi modeli tıpkı bir “kukla” modeli gibi iskelet sistemine tahrik veren, kas sistemi üzerinden gerçekleştirilerek mümkün kılınabilmektedir.



a) Eklem Tahrikli Model



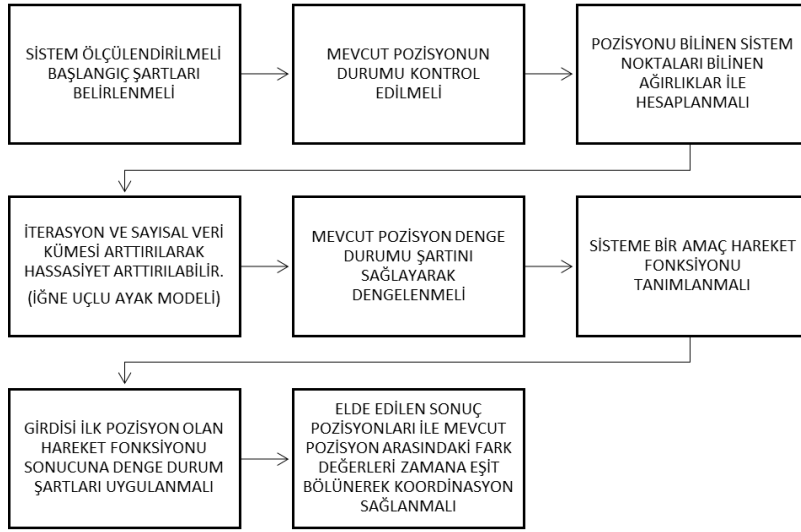
b) Kas-İskelet Temelli Model

Şekil 4. Literatürde ki alternatif modeller / Önerilen Yürüme Sistemi

Mekanizmalar; uzuvlar ve mafsallar aracılığıyla hareket kabiliyetine sahiptirler. Seçilen mafsallar sahip oldukları serbestlik derecelerine göre hareket sınırları meydana getirir [17]. Şekil 4b de özgün olarak tasarlanarak modellenen Kas-iskelet modeli olarak uzayda dönmeye sahip P ve R noktaları PI ve RI uzuvları ile küresel bir harekete sahip olacaktır. Çalışma uzayı analizinde mafsal tipi Universal Mafsal (Kardan Mafsal) olarak seçildiğinde θ ve ω açıları eş merkezli olamayacaktır. Ayak tabanı yere temas noktaları üzerinden eksenlerden uzaklıklara X, Z ve Y mesafeleri tanımlanabilecektir. |ST| ve |TU| uzuvları taşıyıcı iskelet sistemini modellerken, |DI| ve |BI| mesafeleri değişimleri ile taşıyıcı uzuvlar istenilen konumlarda tutulabilecektir. Bu mesafeler kas doku temsil etmektedir. Kas doku üzerinde ki uzayıp kısalma radyal motorlar vasıtasıyla D ve B noktalarına bağlı R ve P rotorları üzerinde mafsal bağlanmış RI ve PI kirişlerince tahrik edilmektedir. Radyal motorların birlikte ve eşit hareketleri ile I noktası tek eksende hareket edebiliyorken, Radyal motorların birbirinden farklı hareketleri ile I noktası ikincil eksende hareket edebilmektedir. U noktasının üçüncül eksende hareketi için F merkezli |FQ| yarıçaplı döner mafsal QJ kirişince hareket ettirilebilir.

2.3. Algoritma

Mekanizma hareket edebilmek yeteneğini gerçekleştirecek bir yapısal tasarımın modelidir. Sistem ise bu mekanizmanın yapabileceği hareketler içerisinden küçük ve anlamlı bir bütünü içeren, bir amaç uğruna iş yapabilme yeteneğini sunan bölümdür [18]. Bir sistem olarak bu yapısal tasarımın yapacağı hareketler ve bir bütün olarak arka arkaya yapacağı hareketler sonucunda ortaya çıkacak anlamlı bütün bu sistemin çalışması ile mümkün olacaktır. Bu bağlamda incelenecek olan temel tasarım, mekanizma, mekanizma elemanları ve mafsallardan ziyade sistem algoritma mantığıdır. Şekil 5. üzerinde sistem algoritmasının şeması basitleştirilerek gösterilmiştir.



Şekil 5. Sistem Algoritma Şeması

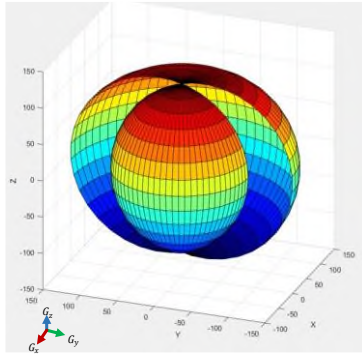
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Çalışma Uzayı Analizi

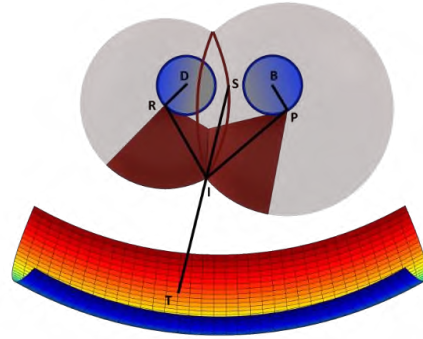
Mekanizmanın hareket kabiliyeti bakımından incelenmesi esnasında, uzayda bulunabileceği konumları incelemek gereklidir. $\forall K(x, y, z) \in \mathbb{C}.K. olmak üzere; P(a, b, c)$ merkezli PI yarıçaplı kürenin formülü $(x - P_x)^2 + (y - P_y)^2 + (z - P_z)^2 = PI^2$ gibidir. Bilinen noktaların dönme merkezi olarak uzayda ki konumlarının P_x, P_y, P_z yerine yazılmasıyla $(x - R_x)^2 + (y - R_y)^2 + (z - R_z)^2 = RI^2$ halini alır. M merkezli MS uzvunun serbestlik derecesi 1 dir ve ω açığı değişimi ile hareket tanımlanabilir. S merkezli ST uzvunun serbestlik derecesi 1 dir ve ω açısına dik eksenli θ açığı değişimi ile tanımlanır. Yarıçapları $R = |MS|$ ve $r = |SI|$ yarıçaplı farklı dönme merkezli geometri bir torus geometrisi $x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - r^2 = 4R^2(x^2 + y^2)$ olarak tanımlanabilmektedir. $R < r$ Değeri mekanizma için bilindiğine göre oluşacak torus geometrisi Elma içerisinde limon geometrisi biçiminde oluşacaktır. $R = |MS|$ ve $r = |SI|$ olacak şekilde yazılır ve denklemin kökleri çözüldüğünde aşağıdaki halini alacaktır.

$$I(x, y, z) = \begin{cases} x(\theta, \omega) = (R + r \cos \theta) \cos \omega \\ y(\theta, \omega) = (R + r \cos \theta) \sin \omega \\ z(\theta, \omega) = r \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

Bu ifadeleri sistem koordinat düzlemine göre uyarladığımızda Denklem 1 elde edilir; bu ifadeler $[x, y, z] 0 \rightarrow 2\pi$ sayısal olarak çözüldüğünde elde edilen denklem MATLAB programı üzerinde matematiksel olarak çizildiğinde elde edilen çözüm grafiği Şekil 6a da gösterilen Elma içinde Limon geometri bir Torus olacaktır. Bu geometri MATLAB üzerinde sayısal olarak çözülmüş ve görselleri Şekil 6 da ki gibidir.



(a) Denklemlerin Çözümü



(b) Çalışma Uzayı

Şekil 6. a) Denklemlerin Çözümü, b) Çalışma Uzayı

Torus geometrisinin bir türü olarak ulaşılmaktadır. $I(x, y, z)$ noktalarını bu şekilde sağlayan değerler almak Denklem 1 şartını sağlayacaktır. Elde edilen geometrinin yürüme hareket modelinde çalışacağı $+45, -45$ derece için modellenmesi yapıldığında, kalça eklemine bulunan motorların hareketine göre üst bacak yukarıda ki gibi bir çalışma uzayında çalışacaktır. Bu çalışma uzayı torus geometrisinin bir bölümünü temsil etmektedir.

3.2. Adımlama Yürüme Fonksiyonu

Adım atmak için mekanik yürüme modeli uygulandığında ayak ortasında bulunan ağırlık merkezi seçilen bir ayak üzerine alınmış, diğer ayak yerden kaldırılarak ileriye götürülüp farklı bir noktada yere indirilmiştir. İki ayak yerde ve farklı konumlardayken sırasıyla denge durum şartları uygulanarak ağırlık merkezi izdüşümü diğer ayak taban noktasına gelecek şekilde sistem hareket ettirilerek diğer ayağın sistemi taşıması sağlanmıştır.

Arkada kalan ayak yerden kaldırılarak ileriye götürülmüş, ulaşılan yeni konumda yere indirilmiş, iki ayak yer ile temas halindeyken denge durum şartları seçilen pozisyonda olacak şekilde öteleme yapılarak denge durumu korunmuş olacaktır.

İki ayak için verilen her konum değerinde ilave bir parametre olarak denge durumu sorgulatıldığında sistem her hareketinde denge şartını göz önünde bulundurarak hareketine devam edecektir. Elde edilen yürüme modeli üzerinden sayısal olarak yürüme adım parametreleri tanımlamasını Tablo 2 de ki gibi yazabiliriz.

TABLO 2. Örnek Adım Parametreleri

S o l A y a k			S a ğ A y a k			Denge Durum
A	B	D	A	B	D	
F(A)	0	0	F(A)	0	0	0
F(A)	0	F(D)	0	0	0	1
F(A)	0	F(D)	4 0	15	0	1
F(A)	0	F(D)	8 0	0	0	1
-80	0	0	F(A)	0	F(D)	2
-40	15	0	F(A)	0	F(D)	2
4 0	15	0	F(A)	0	F(D)	2
8 0	0	0	F(A)	0	F(D)	2
F(A)	0	F(D)	-80	0	0	1
F(A)	0	F(D)	-40	15	0	1
F(A)	0	F(D)	0	0	0	1
F(A)	0	0	0	0	0	0
F(A)	0	0	F(A)	0	0	0

Burada her bir ayak için ayrı ayrı olmak kaydıyla;

A: X ekseninde istenilen hedef mesafe miktarı (Adım boyu)

B: Z ekseninde istenilen hedef mesafe miktarı (Çökme)

D: Y ekseninde istenilen hedef mesafe miktarı

F(A): ağırlık merkezi denge koşulu sağlanmış X mesafesi

F(B): ağırlık merkezi denge koşulu sağlanmış Z mesafesi

F(C): ağırlık merkezi denge koşulu sağlanmış Y mesafesi

3.3. Tek ayak denge duruna geçiş ve diğer ayağın yerden kaldırılması

İki ayak yere temas halinde durumundan, bir ayak üzerinde denge durumuna geçilmesiyle ağırlık merkezi izdüşümü taşıyıcı ayak temas noktası üzerine aktarılmış olur. Taşıyıcı ayak sistemi taşımaya devam ederken diğer ayağın hareketi sistem denge noktasını etkileyecek. Taşıyıcı ayağın pozisyonunu etkileyecektir. Bunu modelleyebilmek için Tablo 3 de ifade edilen değerleri sisteme uygulayabiliriz.

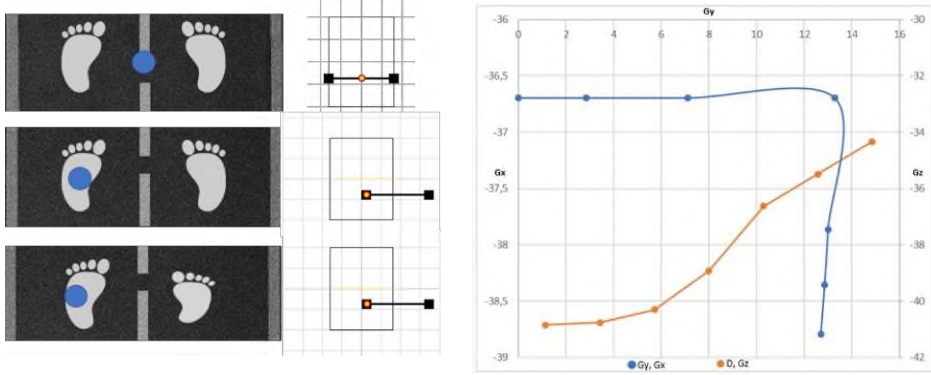
TABLO 3. Model 1 Parametreleri

Ağırlık Merkezi			Diğer Ayak Konum			Denge Durum
G_x	G_y	G_z	A	B	D	
-36,7	0,0	-40,9	-36,7	0,0	0,0	0
-36,7	2,8	-40,8	-36,7	0,0	<u>20</u>	=
-36,7	7,1	-40,3	-36,7	0,0	<u>50</u>	=
-36,7	13,3	-38,9	-36,7	0,0	0	1
-37,9	13,0	-36,6	-37,9	20	0	1
-38,4	12,9	-35,5	-38,4	30	0	1
-38,8	12,7	-34,3	-38,8	40	0	1

Değerler, deneysel model prototip üzerinden hesaplanan sayısal verilerdir.

İki ayak üzerinde denge pozisyonundayken, ağırlık merkezini 1 ayak üzerine taşıma esnasında diğer ayağın “D” mesafesi değişmemiş ancak ağırlık merkezi ile y mesafesi değişmiştir. Ağırlık merkezi taşıyıcı ayak üzerine alındıktan sonra diğer ayak yerden kaldırılarak

ağırlık merkezinin taşıyıcı ayak üzerine etkisi incelenebilir. Tablo 3. de gösterilen hareket modeli, Şekil 7. de ki değerleri ifade etmektedir.



a) Hareketin model gösterimi b) Ağırlık Mer. Diğer Ayak Kon. İle Değişimi

Şekil 7. Tek ayak denge duruna geçiş ve diğer ayağın yerden kaldırılması

İki ayak üzerinde denge durumundan tek ayak üzerinde denge durumuna geçerken, yalnızca Y ekseninde bir ağırlık merkezi değişimi beklenirken, sistemde az da olsa bir Z eksen farkı olması sistemin ağırlık merkezinin X ekseninde değişimine neden olmuştur. Sistem tek ayak üzerinde denge pozisyonuna geldikten sonra, Z ekseninde büyük bir değişime sebep olmaktadır, çünkü diğer ayak yerden kaldırılmaya başladığında X değişimi artmaya başlamıştır.

3.4. Tek ayak denge durumunda, ağırlık merkezindeki salınım hareketi

Sistem tek ayak üzerinde denge pozisyonundayken, diğer ayak yerden kaldırılarak, X, Y üzerinde Z kadar yüksekte yaklaşık 20mm çapında dairesel bir hareket yapıyor olduğunda ise, referans değerler Tablo 4'teki gibi olacaktır.

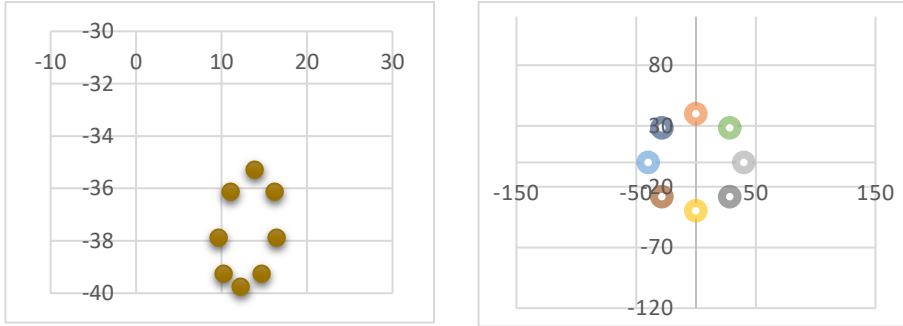
TABLO 4. Model 2 Parametreleri

AĞIRLIK MERKEZİ			DİĞER AYAK KONUM		
G_x	G_y	G_z	A	B	D
-37,9	13,0	-36,6	0,0	20,0	0,0
-35,3	13,9	-39,1	0,0	20,0	40,0
-36,1	16,3	-37,4	28,3	20,0	28,3
-37,9	16,4	-35,4	40,0	20,0	0,0
-36,1	11,1	-39,0	-28,3	20,0	28,3
-37,9	9,7	-37,4	-40,0	20,0	0,0
-39,3	10,3	-35,7	-28,3	20,0	-28,3
-39,8	12,3	-34,6	0,0	20,0	-40,0
-39,3	14,7	-34,4	28,3	20,0	-28,3

Değerler, deneysel model prototip üzerinden hesaplanan sayısal verilerdir.

Z ekseninde B kadar yüksekte olan ayak, X ve Y eksenlerinde dairesel hareket ettirildiğinde Şekil 8b elde edilir. Taşıyıcı ayak üzerinde ise meydana gelen ağırlık merkezi yer değişiminden dolayı Şekil 8a' deki gibi noktasal yer değişimleri olacaktır. Teorik olarak iğne-uçlu ayak modeli

sistemce mümkün olsa da sistemin kararlılığı açısından bir ayak taban alanı ihtiyacı olmaktadır. Ayak tabanı ise sistemin ayaklarına etkiyen kuvvetlerin statik dengesi ile ölçülenebilir.



a) Taşıyıcı Konum Değişimi

b) Dairesel Hareketi Konumları

Şekil 8. Tek ayak denge durumunda, ağırlık merkezindeki salınım hareketi

Taşıyıcı ayak sistemi taşımak için ağırlık merkezi noktalarını ayak taban noktaları olarak kabul edecektir. Diğer ayağın hareketlerine göre bu konum değişimi ise eliptik bir biçimde değişecektir.

SONUÇ

Yürümek eylemi modellenmiş, denge ve hareket kabiliyetleri bakımından incelenmiştir. Yürüme hareketi, belirli uzuvların kendi hareketlerini periyodik olarak tekrarlamasıyla meydana gelir. Ortaya çıkan hareket “adım” olarak adlandırılır. Yürüme hareketi adımların tekrarlanmasıyla oluşur. Denge durumları araştırılmış devrilmeye karşı ayaklara etkiyen momentler hesaplanmıştır. Bu durumda sistem ağırlık merkezi hesaplaması ardından ayak konumları denge merkezi X-Y konumlarına çekilmelidir. İki ayak üzerinde denge durumu statik olarak ele alındığında momentum dengesi ile mümkün olacaktır.

Yürüme Hareketinin incelenmesi denge kabiliyeti ve hareket kabiliyetinin bir sonucudur. Bu yaklaşım ile denge problemi çözümlenirken, hareket kabiliyeti yüksek bir çalışma ortaya çıkmıştır. Çalışma uzayı analizi yapılarak θ , β , ω gibi anatomik düzlemler ile açılar tanımlanmış ve bu açıların alabileceği değerler ile analitik çözüm ele alınmıştır.

Kas iskelet modeli ile yapılan hesaplamalar ve bilgisayar destekli çözüm neticesinde ayak uzvu hareket kabiliyeti, çalışma uzayı anatomik açıdan diz eklemine karşılamıştır. İki ayaklı bir model üzerinde taşıyıcı uzuvları sabit tutacak koordinatlar hesaplanmıştır. Bu ayak konumları sistem ağırlık merkezi hesaplanarak kontrol edilmiş, özgün algoritma ile tasarım modellenmiştir.

Taşıyıcı ayağın, ağırlık merkezi izdüşümünde bulunarak diğer ayağın serbest bir şekilde hareket edebilir olmasıyla yürüme hareketi özelinde hareketleri incelenmiştir. Sistemin yürüme hareketi esnasında denge durumunu sürekli korurken aynı zamanda adım atmasına izin verecek bir $F(\text{hareket})$ fonksiyonu oluşturulmuş, oluşturulan fonksiyonun çıktı değerleri sistem ayak konumlarına doğrudan girdi olarak verilerek sistemin davranışları incelenmiştir.

Sistemin ağırlık merkezine göre ayak taban konumu denklemler ile çözülmüştür. Ağırlık merkezi izdüşümü ayak tabanı içerisinde kaldığı müddetçe ayaklar sistemi taşıyacaktır. Ağırlık merkezinin uzayda ki konumu sistemi meydana getiren elemanların ağırlıkları ve sistem toplam kütesine bağlıdır. Sistem içerisinde ki elemanlardan birinin eksilmesi ya da ağırlık merkezi konumunun değişmesi ile sistemin toplam ağırlık merkezi izdüşümü konumu değişecektir ayrıca isteme ilave edilebilecek herhangi bir uzvun, ya da sistemin taşıyacağı ilave bir yükün ağırlık merkezinin hesaplanması yoluyla sisteme etkisi olacaktır.

Çalışma literatürde üzerine çalışılmış birçok yürüme hareketi tanımı ile benzeşmiş, hareketin denge odaklı yaklaşımıyla ileri seviyede ifade edilmiştir.

İki ayak üzerinde denge konumundan, tek ayak üzerinde denge konumuna geçiş aşamaları incelendiğinde bu hareketin dengesinin tek bir eksende olamayacağı görülmüş, örnek değerler ile sonuçlar ifade edilmiştir. Tek ayak denge konumunda iken, diğer ayağın yerden yukarıya hareketi model üzerinde çözümlenerek, Gx-Gy değişimi incelenmiştir. Ayak uzununun Z ekseninde ki hareketi esnasında diz ekleminden kırılarak gerçekleşen bu hareket X-Y eksenlerinde ağırlık merkezi değişimlerine neden olmuştur. Elde edilen model ile bu değişimin nicel sonuçları hesaplanmıştır.

Bir ayak denge konumunda iken diğer ayağın yerden belirli bir yükseklikte, X-Y düzleminde dairesel hareketi incelenerek, sistemi taşıyan ayağın sistemin diğer unsurlarının hareketine göre konum değişimi incelenmiştir.

Kas giriş model yapıları bağlantı noktaları, anatomik yapıyla örtüşmüş ve ideal kas bağlantı noktalarının eklem mafsallara yaklaştıkça yük taşıma kabiliyetleri artmış ancak hareket, çalışma uzayında azalmalar meydana gelmiştir. Kas model sayısı, eyleyici, arttıktıkça motorlara binen yük azalacak ve insansı bir sistem tasarımı gerçekleşecektir. Bu neticesinde çok kısa aralıklarda bulunan kas doku modellerinin, çok az bir uzayıp kısalması ile güçlü ve hareket kabiliyeti yüksek bir tasarım ortaya çıkmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Hikmet İMAMOĞLU ve Prof. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yöntem seçimi, modelleme ve algoritma, uygulama (verilerin işlenmesi), verilerin analizi ve yorumlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve makale ana hatların oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesine birlikte katkı sağlamışlardır, HİKMET İMAMOĞLU ilgili çalışmanın tam sorumluluk kısmında da katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1]. Soga E., Inoue S., Takanishi A., Yamaguchi. J., Development of a Bipedal Humanoid Robot, International Conference on Robotics Automation, Detroit, Michigan, 1999.
- [2]. Erbatur K., Seven U., Taşkiran E., Koca Ö., Ters Sarkaç Modeli ve Salınan Bacak Telafisi ile Oluşturulan Yürüyen Robot Referans Yörüngeleri, Sabancı Üniversitesi 2021.
- [3]. Çatalkaya M., Akay O.E., İnsan Adım Yörünge Eğrilerinin 2R Manipülatör Kullanarak Elde Edilmesi, Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences 21(3):267-271, 2018.
- [4]. Kaneko K., Harada K., Kanehiro F., Miyamori G., Akachi K., Humanoid Robot, HRP-3 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, 2008.
- [5]. İmamoğlu H., Bağımsız Hareket Kabiliyetine Sahip Robotik Yürüme Sistemi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 2023.
- [6]. Husty M.L., An algorithm for solving the direct kinematics of general Stewart-Gough platforms, Mechanism and Machine Theory, 31(4), Mayıs, 365-379,1996.
- [7]. Tez T., İki Ayaklı Yürüyen Robot Dinamiğinin Deneysel ve Teorik Araştırılması, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış), 2017.
- [8]. Gerçek A., İki Ayaklı Yürüyen Robot Tasarımı ve Prototip İmalatı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2012.
- [9]. İmamoğlu, H., & Bağdatlı, S. M., Mühendislik Problemlerinin Matlab Simulink Programı Desteğiyle Matematiksel Modellenmesi. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1(33), 1-15, 2022.
- [10]. Kim J.Y., Park W., Oh J.H., Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 48(4):457-484, 2007.
- [11]. Nguyen V.X., Experimental System for The Optimization of The Parallel Manipulator Control, Journal of Computer Science and Cybernetics, 31(2) Ağustos, 83–95, 2015.
- [12]. Rahman N., Akhlaq A., Dynamic analysis and vibration control of a multi-body system using MSC Adams, Latin American Journal of Solids and Structures, 12(8):1505-1524, India, 2015.
- [13]. Şeker A., Talmaç M.A., Sarıkaya İ., Yürüme Biyomekaniği, TOTBİD Dergisi, 13:314–324, 2014.
- [14]. Şen M.A., Kalyancu M., Dört Ayaklı Robotların Modellenmesi, Kontrolü ve Engebeli Yüzeylerde Yürüyüşü Üzerine Bir Literatür Araştırması, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, c.9, s.1, 250-279, 2021.
- [15]. Tuna, A., Inclusive Education for Young Children with Autism Spectrum Disorder: Use of Humanoid Robots and Virtual Agents to Alleviate Symptoms and Improve Skills, and A Pilot Study. Journal of Learning and Teaching in Digital Age 7(2), 274-282, 2022.
- [16]. Avcı, S., Günümüz Sanat Eğitiminde Sanat Anatomisi Dersi, Yedi Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi. 20, 25-37, 2018.
- [17]. Breganon, R., Montezuma, M. A. F., Souza, M. M., Lemes, R. C., Belo, E. M., Optimal H Infinity Controller Applied to a Stewart Platform, International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 5(7), 51-59, 2018.
- [18]. Alam, M. N., Akhlaq A., Rahman N., Dynamic analysis and vibration control of a multi-body system using MSC Adams, Latin American Journal of Solids and Structures, 12(8), 1505-1524 2015.