T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI

BAĞIMSIZ HAREKET KABİLİYETİNE SAHİP ROBOTİK YÜRÜME SİSTEMİ

Hikmet İMAMOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI



MANİSA–2023

HİKMET İMAMOĞLU	**BAĞIMSIZ HAREKET KABİLİYETİNE SAHİP ROBOTİK YÜRÜME SİSTEMİ**	**2023**

TEZ ONAYI

Hikmet İMAMOĞLU tarafından hazırlanan **"Bağımsız Hareket Kabiliyetine Sahip Robotik Yürüme Sistemi"** adlı tez çalışması 11/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS** olarak savunulmuş ve **oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

Danışman	**Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI** Manisa Celal Bayar Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL** Manisa Celal Bayar Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Barış Oğuz GÜRSES** Ege Üniversitesi	.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Hikmet İMAMOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ II
ŞEKİLLER DİZİNİ III
TABLOLAR DİZİNİ IV
TEŞEKKÜR V
ÖZET VI
ABSTRACT VII
1. GİRİŞ 8
1.1. Amaç 9
2. GENEL BİLGİLER 10
2.1. Yürüme Hareketinin Dinamiği 14
2.1.1. Mekanik Hareket Kabiliyeti 18
2.1.2. Mekanik Denge Sistemi 19
3. İNSANSI ROBOT PROJESİ 22
3.1. Manipilatör Kavramı 22
3.1.1. Seri Manipilatörler 23
3.1.2. Paralel Manipilatörler 23
3.2. İnsansı Robot 24
3.2.1. Robotik Yürüme Sistemi 26
4. MATERYAL 27
4.1. Bağımsız Hareket Kabiliyeti 28
4.1.1. Taşıyıcı Unsurlar ve Mafsallar 28
4.1.2. Gerekli Hareketler ve Tahrik unsurları 29
4.2. Mekanik Sistem 31
4.2.1. Noktalar ve Konumları 34
4.2.2. Bacak Uzuvlarının Eksenlerle Yaptığı Açılar 36
4.2.3. Çalışma Uzayı Analizi 39
4.2.4. Eyleyici (Motor) Açıları 43
4.2.5. Denge Konumunda Kalabilmek İçin 48
4.2.5.1. Devrilmeye Karşı Moment Dengeleri 52
4.2.6. Kuvvet Analizleri 57
4.2.6.1. Eyleyicilere Etkiyen Kuvvetler 67
4.2.7. Yürüme Haraketi Fonksiyonları 69
4.2.8. Sistem Denetimi ve Algoritma 71
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 72
5.1. Tek Ayak Denge Duruna Geçiş ve Diğer Ayağın Yerden Kaldırılması 74
5.2. Tek Ayak Denge Durumunda, Ağırlık Merkezindeki Değişim 76
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 77
7. KAYNAKLAR 79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Açısal ivme $[rad/s^2]$
α_A	A motoru açısı
α_B	B motoru açısı
α_C	C motoru açısı
α_D	D motoru açısı
α_E	E motoru açısı
α_F	F motoru açısı
λ	Uzayda serbestlik derecesi
γ	Birim hacim başına ağırlık (özgül ağırlık)
θ	Uzuvların yatayda ileri-geri mesafe değişimine izin veren açı
β	Uzuvlar arasında ki açı
ω	Uzuvların yatayda içeri-dışarı mesafe değişimine izin veren açı
σ	Bacağın alt kısmının yatay ile yaptığı açı
a	x ekseninde fark mesafesi
b	z ekseninde fark mesafesi
d	Y ekseninde fark mesafesi
fi	Mafsal serbestlik derecesi
g	Yerçekimi ivmesi m/s^2
j	Mafsal sayısı
l	Uzuv sayısı
B,D,F	Radyal motor merkezleri
P,R,Q	Radyal motor rotor uzunlukları
M_m	Mafsal merkezi
Z	Bacak uzunluğu
ST	Bacak üst parçası
TU	Bacak alt parçası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yürüme Hareketi Mekanik İncelemesi 16
Şekil 2.2. Deneysel Yürüme Eğrisi 17
Şekil 2.3. Ağırlık Merkezi 19
Şekil 3.1. Manipülatör Örnekleri 22
Şekil 3.2. İnsansı Robot Deneysel Çalışmalarından Örnekler 27
Şekil 4.1. İnsansı Gövde Yapısının Modellemesi 27
Şekil 4.2. İnsan Gövde Yapısı Üzerinde Anatomik Düzlemler 31
Şekil 4.3. Yürüme Sistemi Üzerinde Eksenel Fark Mesafeleri 30
Şekil 4.4. Kas-İskelet Modeli Yaklaşımı 31
Şekil 4.5. Mekanizma Kinematik İcelemesi 32
Şekil 4.6. Yürüme Esnasında Salınım 35
Şekil 4.7. Mekanizma Kinematik İncelemesi 34
Şekil 4.8. Bacakların Eksenler ile Yaptığı Açılar 38
Şekil 4.9. Farklı Yarıçaplarda Torus Geometrisi Eksen Kesitleri 40
Şekil 4.10. Tüm Çalışma Uzayı 41
Şekil 4.11. Mekanizma Çalışma Uzayı 42
Şekil 4.12. Radyal Motor Açı Değerleri 43
Şekil 4.13. β Açı Değişimi ile Bacaklar Arasında ki Açı Değişimi 46
Şekil 4.14. Sistem Ağırlık Merkezi Bileşenleri 48
Şekil 4.15. Ağırlık Bileşenlerinin Uzayda Konumları 49
Şekil 4.16. Sistem Denge Merkezi Noktası ve Ağırlık Merkezi Değişimi 51
Şekil 4.17. Devrilmeye Karşı Momentum 52
Şekil 4.18. İki Ayak Üzerinde Denge Durumu 54
Şekil 4.19. Tek Ayak Üzerinde Denge Durumu 55
Şekil 4.20. Sistem Denge Pozisyonu Değişimi 58
Şekil 4.21. Her Bir Ayağa Etkiyen Tüm Kuvvetler 57
Şekil 4.22. Ayaklara Etkiyen Kuvvetlerin Uzayda Vektör Bileşenleri 58
Şekil 4.23. TU Uzvunda ki Tüm Kuvvetler 59
Şekil 4.24. TU Uzvuna Etkiyen Kuvvetler 64
Şekil 4.25. ST Uzvuna Etkiyen Tüm Kuvvetler 65
Şekil 4.26. I noktasından B ve D ye Etkiyen Kuvvetler 67
Şekil 4.27. Diz Motoruna Etkiyen Kuvvet 68
Şekil 5.1. Adımlama Yürüme Fonksiyonu 73
Şekil 5.2. Ağırlık Merkezi Diğer Ayağa Göre Değişimi 76
Şekil 5.3. Ağırlık Merkezinin Diğer Ayak Konumu ile Değişimi 77
Şekil 5.4. Ağırlık Merkezi Konum Değişimi 76

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Ağırlık Merkezi Bulunabileceği Durumlar 30
Tablo 4.2 Sistem Noktalarının Bileşen Koordinatları 35
Tablo 4.3 Diz motoru Bağlantı Noktaları 47
Tablo 5.1. Örnek Adım Parametreleri 72
Tablo 5.2 Model 1 Parametreleri 74
Tablo 5.3 Model 2 Parametreleri 76

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Süleyman Murat Bağdatlı ’ya, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Hikmet İMAMOĞLU
Manisa, 2023

ÖZET

Yüksek Lisans

Bağımsız Hareket Kabiliyetine Sahip Robotik Yürüme Sistemi

Hikmet İMAMOĞLU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Süleyman Murat Bağdatlı

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

2023, 86 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

The Robotic Walking System With Independent Mobility

Hikmet İMAMOĞLU

Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI

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

2023, 86 pages

1. GİRİŞ

Dünya coğrafyasında, tarihin her döneminde etkin ve öncü bir konuma sahip olan milletimizin insanlık adına yüklendiği sorumluluk gereği; ülkemizin, Türklüğün asaletine inançlı gençliğimizin ve bilim insanlarımızın, üretim ve teknoloji geliştirme mecburiyeti her geçen gün artmaktadır. Yerli ve milli imkanlarla gerçekleştirilecek, gelişecek teknolojilere uyum sağlayabilecek yapıda makinalar, ülkemizin hedefleri açısından önem arz etmektedir. Bu konuda ülkemize hizmet etmek üzere araştırmacı ve geliştirmeci mühendislere önemli görevler yüklenmektedir.

Özellikle sanayi devriminden sonra makineleşmenin ve beraberinde ki tüm teknolojik gelişmelerin kahramanları yine mühendisler olmuştur. Günümüzde insan anatomisini inceleyen cihazlar bile mühendislerin tasarımı ve uygulamalarıyla ortaya çıkmıştır. "Mühendislik" anabilimi olmadan hiçbir bilim insanının herhangi bir sonuca ulaşması mümkün değildir. Tüm bu kavramlar birleştirildiğinde mühendis; tasarlayan, meydana getiren, işleten ve süreç içerisinde ortaya çıkan tüm problemleri çözen insandır.

Herhangi bir düşüncenin hayal edilebilmesi, projelendirilebilmesi uygulamaya alınması ve sürecin sorunsuz şekilde işletilebilmesi için matematiksel modelleme önemli bir araçtır. Bir mühendis yüklendiği tüm görevlerin her aşamasında oluşturduğu modellerin çözümleri için basit ya da karmaşık hesaplamalar yapar. Bu hesaplamaları yaparken basit bir hesap makinasından faydalandığı gibi günümüz şartlarında gelişen teknoloji ile birlikte bir takım bilgisayar programlarından da faydalanabilmektedir. Bilgisayar programları kullanmak, bir mühendis için ortaya çıkabilecek muhtemel sonuçların henüz proje aşamasındayken bile öngörülebilir olmasını sağlaması açısından önemlidir.

Dijital Çağın başlamasıyla, yeni nesil teknolojilerin önem kazandığı, yapay-zekâ desteğiyle bağımsız olarak karar verebilen ve hareket edebilen, tek başına üzerine aldığı herhangi bir işi tamamlayabilen makinaların önemi kuşku götürmez bir şekilde artmıştır. Endüstri 5.0 gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve dijital çağın etkileriyle birlikte toplumlar teknolojiye daha kolay uyum sağlamaktadır.

İnsan fiziksel ve mekanik tasarım açısından en kusursuz sistemdir. İnsan düşünce sisteminin ve mantık yapısının bir makinanın iş yapabilme kabiliyetleri ile birleşmesinden ortaya çıkacak sonucun muhteşemliği tartışılamaz. İnsan formunda bir makinanın insanlık için gerekli tüm çalışmaları belirli bir kontrol ve denetim ile yapabileceği öngörülebilir.

Gelişmiş bir İnsansı Robot Projesi; savunma sanayi, uzay sanayi, arama kurtarma faaliyetleri, toplum sağlığı ve genel olarak endüstri alanlarında kullanılabilecek yapıda; nihai olarak iki ayak, gövde ve iki kol unsurları ile serbest olarak hareket edebilen, insan gövdesi hareketlerini taklit yeteneğine sahip, gelişmiş teknolojiler tarafından ortaya konulmuş örneklerine muadil seviyede, otonom, mobil bir sistem olarak tasarlanabilecektir.

1.1. Amaç

İnsan düşünce sisteminin ve mantık yapısının bir makinanın iş yapabilme kabiliyetleri ile birleşmesinden ortaya çıkacak sonucun muhteşemliği tartışılamaz. Bir makinaya, 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.

Bu mekanizmanın istenilen hareket fonksiyonlarını gerçekleştirebilmesi için mekanizma kinematik analizlerinin tamamlanması ve uygulaması gerekmektedir. Ülkemizde daha önce yapılmış olan akademik ve diğer tüm çalışmalarda konunun, "bütünün bir parçası" ile sınırlandırıldığı gözlemlenmiştir.

Yürütülecek çalışmada amaç; ortaya çıkarılacak android hareket sisteminin, tamamlanmış bir insansı robota entegre edilebilmesinin sağlanması olacaktır. Hedef; sadece hareket edebilen bir çift bacak sistemi oluşturmanın ötesinde, gerçek anlamda robotik bir sistem tasarlayarak tamamlanabilir olmasını sağlamaktır.

2. GENEL BİLGİLER

Kültürel değişim ve teknolojik gelişim sonucunda anlamları zaman içerisinde değişen, kapsam ve nitelikleri bakımından yeniden tanıma ihtiyaç duyan bazı tanımlamaları amaçlanan çalışma içerisinde tekrar gözden geçirmek çağımızda önemli bir ihtiyaçtır, bu sebeple bazı ifadeleri baştan netleştirmek elzemdir.

Mühendis olarak tanımlanan kişi için; Mühendislik kelimesi kök olarak "hendese" kelimesinden gelmektedir. Hendese kelimesi ise Osmanlıca sözlüklerde çizgisel, yüzeysel ve hacimsel olarak bu üç boyutun özelliklerini ve ölçülerini inceleyen matematik kolu olarak tanımlanmıştır. Bu kökten türeyen mühendis kelimesi; Hendese bilen. Geometri bilen ve tatbik eden kimse anlamına gelmektedir. Burada mühendis olarak nitelendirilen insan karşılaştığı problemlere çözüm üretebilen insandır.

Orta çağ sonuna kadar özellikle İslami bilimlerle beraber, en küçük tasarımlardan, uzayın derinliklerinde ki en büyük keşiflere kadar, tüm bilimsel araştırmalar mühendislerin konusu olmuştur. Özellikle sanayi devriminden sonra makineleşmenin ve beraberinde ki tüm teknolojik gelişmelerin kahramanları yine mühendisler olmuştur. Günümüzde insan anatomisini inceleyen cihazlar bile mühendislerin tasarımı ve uygulamalarıyla ortaya çıkmıştır. "Mühendislik" anabilimi olmadan hiçbir bilim insanının herhangi bir sonuca ulaşması mümkün değildir. Tüm bu kavramlar birleştirildiğinde mühendis; tasarlayan, meydana getiren, işleten ve süreç içerisinde ortaya çıkan tüm problemleri çözen insandır.

Bir amacı gerçekleştirmek üzere tek bir birim olarak hareket etmek üzere düzenlenmiş, etkileşimli, uyumlu ve ilişkili fiziksel elemanlar düzeneğine sistem denir. Sistem tanımı yapısı gereği; amaç uğruna bir girdi ve amaç uğruna bir çıktıya ihtiyaç duyar [1]. Sistem kavramı, mekanik bir amaç uğruna etki kuvveti ile tepki kuvveti arasında ki bağıntıya neden olabilecek bir mekanizmalar bütünü olabileceği gibi, matematiksel bir fonksiyondan, elektronik bir işlem üzere meydana getirilmiş bir devre kartı da olabilmektedir.

Teknolojideki hızlı gelişmeler ve uzmanlaşma otomasyon kavramını ortaya çıkardı. Uzmanlaşma ve otomasyon, bir yandan verimlilik açısından iyileşme taleplerini karşılarken bir yandan da sorunların, sistemlerin ve işlevlerin giderek daha küçük parçalara ayrılmasına sebep oldu. Bununla birlikte, sorunların birbirlerinden soyutlanmaları ve sanki birbirlerinden ilişkisiz ve bağımsızmış gibi bir anlayışın ve yaklaşım alışkanlığının doğması sonucunu getirdi.

Geliştirilmek istenen sistem, yeni ve örneği olmayan bir sistem olabileceği gibi mevcut bir sistemin iyileştirilmesi ya da düzenlenmesini de amaçlayabilir. Geliştirilecek sistem gerçekçi ve ulaşılabilir bir amaca dönük olarak anlaşılabilir ve ölçülebilir olmalıdır [2]. Sistemin planlaması ve genel tasarımı oluşturulduktan sonra sistem elemanları arasında ve gerek duyulursa sistemin beraber çalışacağı diğer sistemlerle ilişkileri hakkında matematiksel modelleme oluşturulur.

Fiziksel bir sistemin matematiksel modellemesi mühendislik alanının başlıca yorumlama yöntemidir. Herhangi bir sistemi matematiksel olarak modellediğimizde doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler karşımıza çıkacaktır. Modeller gerçekliğin sadeleştirilmiş durumlarıdır. Bir sistemin dinamik karakteristiğinin matematiksel tanımına matematiksel model denir.

Dinamik sistemin çözümlenmesinde ilk ve en önemli adım, sisteme ait uygun bir matematiksel modelin elde edilmesi kısmıdır. Modellemede genellikle çok karmaşık bir mühendislik sisteminin uygun kabullerle ve pek çok durumlarda idealize edilmiş elemanlardan oluşmuş olarak tasarlanan bir fiziksel modeli elde edilir. Fiziksel model tasarlandıktan sonra da temel fiziksel yasalar kullanılarak elemanların davranışlarını tanımlayan ve genellikle doğrusal diferansiyel denklemler şeklinde bir matematiksel model elde edilir.

Sistemi meydana getiren elemanların her birini ya da farklı sistemlerin aralarında ki ilişkileri matematiksel fonksiyonlar ile ifade etmeye matematiksel modelleme denir. Sistemi oluşturan bütün elemanlar için gerekli, kinematik denklemler ve serbest cisim diyagramları elde edilerek matematiksel modelleme oluşturulur. Genelde bir problemin çözümünde genel bir görüş elde etmek üzere başlangıçta sistemin basitleştirilmiş bir modelini tasarlamak daha uygun olabilir. Gerekli görüldüğü taktirde daha karmaşık bir çözümleme için daha ayrıntılı bir matematiksel model üzerinde çalışma yürütülebilir.

Mekanik bir sistem olarak nitelenen makina, tabiatta mevcut mekanik kuvvetlerin belirli bir hareket ile birlikte iş yapmasını sağlayabilen, kuvvete karşı direnç gösterebilen cisimlerin birleştirilmesi ile oluşturulan bir sistemdir. Mühendislik mekaniğinin ilk kısmı, duran veya sabit hızla hareket eden cisimlerin denge durumunu ele alan statiğe ayrılmıştır. İkinci kısmı ise ivmeli hareket eden cisimleri ele alan dinamiğe ayrılmıştır.

Kinematik; hareketi, sebep ve tesirlerini göz önüne almadan inceler. Kinematik, hareketin ve hareketin türevlerini içeren, hız, ivme ve jerkin anlaşılmasıyla kavranabilir. Zaman ve mekâna bağlı ifadeler içeren matematiksel denklemlerden faydalanılır. Hareket bir cismin sürekli, bir noktadan diğer bir noktaya olan yer değiştirmesidir.

Hareket denklemi, fiziksel sistemin davranışını, sistem hareketinin zamanı ve fonksiyonu olarak tanımlar. Klasik mekanikte, fonksiyonlar öklid uzayında tanımlanmıştır ama görelilikte öklid uzayı, eğilmiş uzay ile tanımlanmıştır. Eğer sistemin dinamiği biliniyor ise, denklemler dinamiğin hareketini izah eden diferansiyel denklemlerin çözümleri olacaktır.

Mekanizma, kuvvet ve hareket iletimi için kullanılabilen rijit cisimlerin rijit mafsallarla birleştirildiği sistem olarak tanımlanabilir. Mekanizmalar genel amaçlarla bir araya getirilmiş elemanlar bütünüdür. Gerçekte rijit cisim olarak nitelenebilen bir şey yoktur, ancak yapısal bir bütünlük olarak sistemlerin çözümlenebilmesi için rijit cisim kabulü yapılır buna göre, mekanizma; bir hareketi aktarmak ya da dönüştürmek amacıyla birbirine bağlanmış katı cisimler topluluğudur, bu kabul ile gerçekleştirilen çalışmalar mekanik olarak incelemelerdir. Mekanik incelemeler 2 temel esasta yapılır.

Hareketlerin modellenebilmesi Mekaniğin ortaya çıkış amacıdır. Dinamik; hareketleri inceler, yapılan hareketin nasıl yapıldığı konusunda fikir verir. Gerekli kinematik incelemeler yapılır, hesaplamalar ve analizler sonucunda bir sonraki hareket için üzerine çalışılır.

Bir amaç uğruna bir iş yapabilmek için her zaman enerji ihtiyaç duyulur. Bu enerji dışarıdan da temin edilebileceği gibi bir yapısal tasarım içerisinde gizli atalet kuvvetleri ile de meydana gelebilir. En ideal tasarımlarda sistem potansiyel iş yapabilme enerjisini kendi içerisinde bulundurabilen sistemlerdir. Mekanik bu potansiyel enerjiyi bir amaç uğruna kullanabilmeyi inceler.

Yapısal tasarımlarda bu potansiyel enerjinin nerede nasıl depolandığı ve farklı hareket kabiliyetleri üzerine verdiği tepkilerde incelenmek zorundadır. Sistem kavramı problemlerin modellenmesi için matematiksel ve fiziksel argümanlar içeren ifadelerle ölçülebilir ve çözülebilir duruma getirildiğinde sistemler modellenmiş, sonuçlar yorumlanabilecektir. İnsan gövde yapısı gelişmiş bir sistem yapısıdır mekanik ve dinamik açıdan incelenebilmektedir.

2.1. Yürüme Hareketinin Dinamiği

Canlıların temel ihtiyaçlarından biri olarak hareket edebilmek yeteneğini, iki ayak uzvu ile gerçekleştirebilmek gelişmiş canlılara ait bir özelliktir [3]. Yürümek eylemi, bilinçli ya da bilinçsiz olarak yapılabilen, canlının bir yerden başka bir yere gidebilmesi için gerçekleşen bir eylemdir [4]. Bu süreç (yürüme eylemi) birtakım etkenlere göre değişebilmektedir. Enerji, Güç, Deformasyon, Yaşlılık, Sinir Sistemi Sağlığı, Merkezi Sinir Sistemi, Fiziksel kısıtlar, Toplam Ağırlık, Ruh Hali, Duygusal Durum Gibi etkenler yürüme hareketini biçimsel olarak değiştirir [5]. Bu bağlamda, incelenen yürüme hareketi, sayılan etkenlere bağlı olmaksızın, dengeli ve zamandan bağımsız nizami bir hareketler bütünüdür.

İki ayak üzerinde yürüme hareketi, dinamik bakımdan incelendiğinde, sistem dengesi ve sistem hareket kabiliyeti şeklinde iki temel yaklaşım ile mümkündür [6]. Sistem dengesi iki ayak uzvu üzerinde hareket edecek platformun stabil bir pozisyonda kalması, ayak uzuvlarının hareketleri bileşkesi ile de bu platformun ötelenmesi ile mümkün olacaktır. Sistemin öteleme hareketi bu sistemi ayakta ve dengede tutabilen ayak uzuvlarının hareketleri ile mümkündür.

Yürüme hareketi, belirli uzuvların kendi hareketlerini periyodik olarak tekrarlamasıyla meydana gelir. Ortaya çıkan hareket “adım” olarak adlandırılır. Yürüme hareketi adımların tekrarlanmasıyla oluşur [7]. Belirli konum değişimlerinin belirli zaman aralıklarında tekrarlanması ile sistem dengesi bozulmadan cisim ağırlık merkezi ötelenmiş, dönmüş olabilmektedir [8]. Bu konuda literatürde yapılan bazı çalışmalarda, canlılarda yürüme hareketinin modellenmesi incelenmiş, farklı tipte eğri uydurma yöntemleri ile yürüme hareketinin matematiksel bir formda modellenebileceği görülmüştür [9].

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 modellenebilir ve konum değişimleri incelenebilir [10]. Yürüme eylemi, Şekil 2.1.' de gösterildiği gibi incelendiğinde, denge ve yer değişimi şeklinde modellenmesi ile mümkündür.

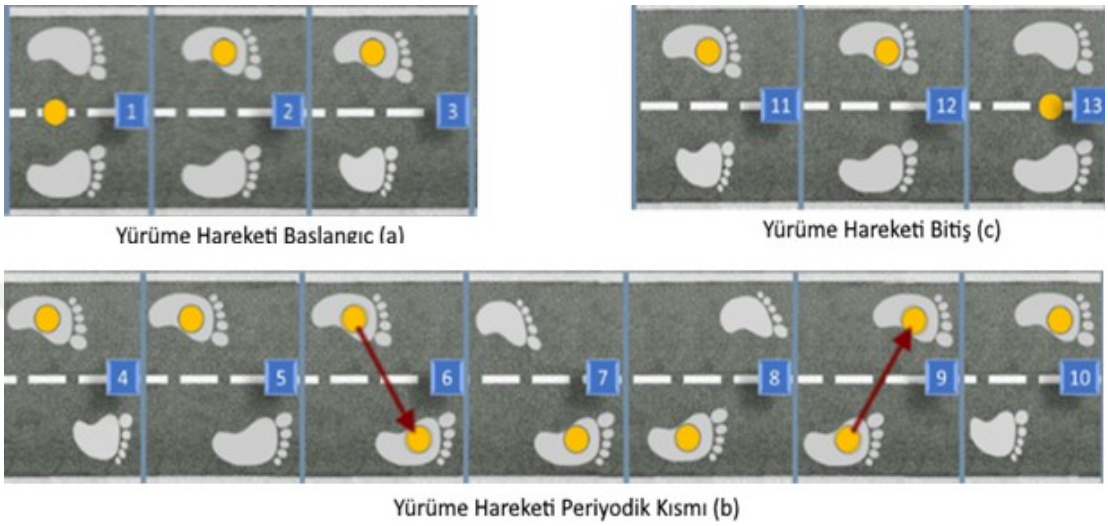
İki ayak üzerinde yürüme hareketini modellemek için adımlama hareketini aşamalara bölerek mekanik açıdan incelemek gereklidir. Şekil 2.1.a. Yürüme hareketinin başlangıcını ifade etmektedir. İlk durumda iki ayak uzvu üzerinde ayakta duran bir sistem için sistemin ağırlık merkezi izdüşümü yere temas eden ayak uzuvları arasında olacaktır.

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 [11].

Şekil 2.1.b 'de gösterilen yürüme hareketinin periyodik kısmını göstermektedir. Taşıyıcı ayak uzvu sistem ağırlığını taşırken, diğer ayak uzvu sistemin bir sonra ki konumuna ulaşmak üzere hedeflediği koordinat bileşenlerine göre hareketini gerçekleştirecektir [12].

İki ayak uzvu da yere temas ediyorken, sistemin dengede kalabilmesi için ağırlık merkezi izdüşümünün iki ayak uzvu arasında ki doğrultu üzerinde hareket ederek diğer ayak noktasına ulaşması gerekir [13]. Ağırlık merkezi diğer ayak noktasına ulaşınca, sistemin ağırlığını başlangıç konumundan farklı bir noktada bulunan diğer ayak taşımaya başlamış olacaktır. Geride kalan ayak uzvu yeni konumuna gitmek üzere hedeflenen koordinata ötelenir.

Harekete devam edilip edilmeyeceği bu aşamada sorgulanarak, Şekil 2.1.c.' de gösterildiği gibi eğer adımlama işlemi bitecekse geride kalan ayak, taşıyıcı ayak ile yatay eksende paralel duruma gelir. Sistem ağırlık merkezi izdüşümünü bir ayaktan, iki ayak arasında ki (orta nokta) konumuna getirir. Eğer yürüme eylemi devam edecek ise adımlama hareketi Şekil 2.1.b' deki gibi tekrarlanır.



Şekil 2.1. Yürüme Hareketi Mekanik İncelemesi

Vücut kütle yapısal tasarımı açısından insan vücudunu farklı bileşen ve uzuvlardan meydana gelen bir sistem olarak modellediğimizde, bu yapısal tasarımın hareketi, sistemi oluşturan noktaların bir araya gelmesiyle ifade edilebilecek bir ağırlık merkezi noktası olarak modellenebilir. Bu ağırlık merkezinin uzayda konum değişim fonksiyonlarından biri ile yürüme hareketi modellenebilecektir.

Yürüme hareketi belirli uzuvların periyodik bir yer değişimi hareketini tekrarlamasıdır. Belirli konum değişimlerinin belirli zaman aralıklarında tekrarlanması ile sistem dengesi bozulmadan cisim ağırlık merkezi ötelenmiş, dönmüş olabilmektedir. Bu konuda literatürde yapılan bazı çalışmalarda, Şekil 2.2. 'de gösterilen deneysel yürüme hareketinin modellenmesi incelenmiş, farklı tipte eğri uydurma yöntemleri ile yürüme hareketinin matematiksel bir formda modellenebileceği görülmüştür [14,15].



Şekil 2.2. Deneysel Yürüme Eğrisi

Sistemi meydana getiren noktaların yürüme esnasında çizdiği yörüngeler video formatına alınarak incelendiğinde periyodik olarak yürüme bir yörünge izlediği tespit edilmiştir. İki ayak üzerinde yürüme eyleminin gerçekleşmesi için, ayak uzuvları zamana ve mekâna bağıl durumda tek ayak üzerinde denge şartını sağlamalıdır, iki ayaklı bir sistem için, yürüme hareket fonksiyonları elde edildiğinde bu sürekli fonksiyonu matematiksel modellenebilir ve konum değişimleri incelenebilecektir [16,17].

İnsan tasarımı yapısal olarak incelendiğinde bu sistemin denge ve hareket kabiliyetleri bakımından davranışları, bütünü oluşturan her bir parçanın sisteme etkisi ile mümkündür. Başka bir deyişle sistemi oluşturan her bir parça sisteme bir etki doğurmaktadır. Bu etkilerin bileşke davranışı sistemin davranışı olarak nitelenebilmektedir.

2.1.1. Mekanik Hareket Kabiliyeti

Mekanik olarak hareket kabiliyeti uzayda bir takım nokta çiftlerinin yer değiştirmesi olarak modellenebilmektedir. Bu nokta çiftleri birleştirildiğinde bir insan gövde yapısını meydana getirebileceği gibi farklı nokta kümeleri farklı modellemeleri meydana getirebilmektedir. İki ayak uzvu üzerinde harekete imkân verilebilen bir gövde yapısal tasarımında bu gövde üzerinde bulunan her ayak uzvunu meydana getiren noktalar fiziksel olarak bir yük olarak nitelenebilir.

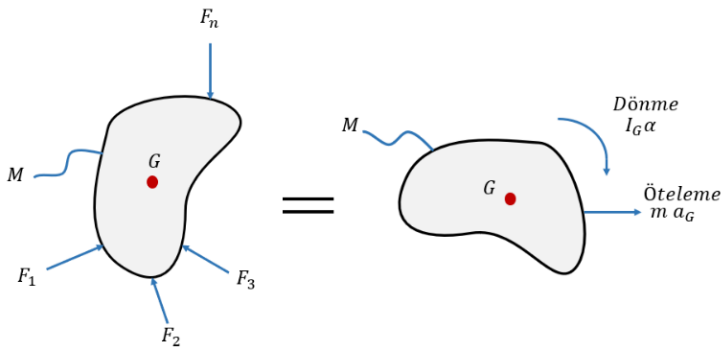
Statik olarak denge koşulunu meydana getiren her ayak tabanı uzvu bu yükleri birlikte taşır. Yürüme hareketi, iki bacak uzvu ve üzerinde bulunan gövde yapısının birlikteliği ile meydana gelen sistemin ağırlık merkezinin periyodik olarak ayak uzuvları üzerine getirilerek gerçekleştirilen harekettir. Ağırlık merkezinin yer değişimi, uzayda bulunan herhangi bir noktanın yer değişimi ile açıklanabilmektedir.

Eksenlerde ki bu konum değişimlerinden x ekseninde ki konum a ve y ekseninde ki konum d, üst bacak uzvunun kalça eklem bağlantısı ile gerçekleşmektedir. Üst bacak ve alt bacak, diz mafsalı ile birleştirilirse, kalça bağlantı noktası ile ayak tabanı arasında ki z mesafesinde ki uzayıp kısalma, z ekseni üzerdeki konum değeri b, ile modellenebilmektedir [18,19].

Bütün bir sistemi tek başına taşıyabilecek olan diz mekanizması yürüme mekanizması içerisinde ki en kritik tasarımlardan biridir. A, b, d mesafelerinin yer değişimleri ile sisteme bir anlık konum tanımı yapılabilirken, bu mesafelerin değişimi ile de hareket verilmesi mümkün olacaktır.

2.1.2. Mekanik Denge Sistemi

Mekanik denge durumu; hem ivmeli cismin ötelenmesini önlemek için cisme etkiyen kuvvetlerin dengesini, hem de cismin dönmesini önlemek için cisme etkiyen momentlerin dengesini gerektirir. Şekil 2.3. 'de gösterilen bir cisme etkiyen çeşitli yükler olduğunda, bu yükler bileşkesi, cisim ağırlık merkezi üzerinde etkiyen a_G kütle merkezinin çizgisel ivmesi $[m/s^2]$, öteleme), I_G kütle merkezine göre atalet momenti $[Kgm^2]$ ve α açısal ivme $[rad/s^2$ biçimde tanımlanabilir [20].



Şekil 2.3. Ağırlık Merkezi

Mekanik olarak "denge" bir parçacığın, katı cisimin ya da bir dinamik sisteminin momentumunun korunmuş olduğu durumdur. Denklem 2.1. cisme etkiyen tüm kuvvetlerin meydana getireceği bileşke ötelemeyi, Denklem 2.2 cisme etkiyen tüm kuvvetlerin meydana getireceği bileşke dönmeyi ifade etmektedir. Daha genel olarak, cisme etkiyen kuvvetler toplamı Denklem 2.3 'da gösterildiği gibi olmalıdır. Bu durum daha genel bir ifade ile, Denklem 2.4. 'de gösterildiği gibi tüm kuvvetler toplamı sıfır durumu ile mümkün olacaktır.

$$\sum F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = m\ a_G \qquad (2.1)$$

$$\sum M_G = I_G\ \alpha \qquad (2.2)$$

$$F_i + f_i = 0 \qquad (2.3)$$

$$\sum F + \sum f = 0 \qquad (2.4)$$

Cisim üzerinde, noktasal parçacık diferansiyel eleman üzerinden alınan keyfi bir noktaya göre bir moment meydana getirir. Bu moment Denklem 2.5. de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$r_i \, x \, (F_i + f_i) = r_i \, x \, F_i + r_i \, x \, f_i = 0 \qquad (2.5)$$

Benzer durumda diğer parçacıklar üzerinde ki momentler toplamı diferansiyel eleman üzerine etkiyen toplam momenti ifade eder.

$$\sum r_i \, x \, F_i + \sum r_i \, x \, f_i = 0 \qquad (2.6)$$

Bu koşullar altında noktasal parçacık üzerine etkiyen kuvvet ve momentler toplamı; $\sum M = 0$ durumu sağlanmalıdır. Bu durumun sağlanması cismin uzayda bir hacmi olduğu için, ancak $\sum F = 0$ ile mümkündür. Bu durum, diferansiyel elemanın denge durumunu ifade edecektir [21]. Cisme etkiyen tüm kuvvetler ve tüm kuvvetlerin oluşturduğu tüm momentler toplamı sıfır eşitliği ile skaler olarak denklemler elde edilir.

Diferansiyel elemanın uzay bölgesi içerisinde n parçacıklı sistemini ele aldığımızda, parçacıkların ağırlıkları, yerini belirli bir uygulama noktası olan tek bir bileşke ağırlığın alabileceği, bir paralel kuvvetler sistemi oluşturur. Bu noktaya sistemin G ağırlık merkezi adı verilir. Bu ilkeler, bileşke ağırlığın, n tane parçacığın toplam ağırlığına eşit olmasını gerektirir. $W_R = \sum W$ Bütün parçacıkların ağırlıklarının x, y ve z eksenlerine göre toplam momentleri, bileşke ağırlığın bu eksenlere göre momentine eşittir. X bileşeni için, Denklem 2.7., Y bileşeni için, Denklem 2.8., Z bileşeni için Denklem 2.9. biçiminde olacaktır.

$$W_R = (x_1 - x)W_1 + (x - x_2)W_2 + \cdots + (\, x - x_n)W_n \qquad (2.7)$$

$$W_R = (y_1 - y)W_1 + (y - y_2)W_2 + \cdots + (\, y - y_n)W_n \qquad (2.8)$$

$$W_R = (z_1 - z)W_1 + (z - z_2)W_2 + \cdots + (\, z - z_n)W_n \qquad (2.9)$$

Cisim üzerinde seçilecek bir nokta ile cisme etkiyen tüm kuvvetleri karşılayabilmektedir. Bu noktanın X bileşeni Denklem 2.10, Y bileşeni Denklem 2.11, Z bileşeni Denklem 2.12 ile bulunabilir. Burada $\check{x}, \check{y}, \check{z}$; sistemde ki her bir noktanın koordinatlarını gösterir. W_R ; sistemde ki her bir parçanın ağırlığıdır. g yerçekimi ivmesi ve her parçacık için sabit olmak üzere $W = m\ g$ dir.

$$x = \frac{\sum \check{x}\, W}{\sum W} = \frac{\sum x\, m}{\sum m} \qquad (2.10)$$

$$y = \frac{\sum \check{y}\, W}{\sum W} = \frac{\sum y\, m}{\sum m} \qquad (2.11)$$

$$z = \frac{\sum \check{z}\, W}{\sum W} = \frac{\sum z\, m}{\sum m} \qquad (2.12)$$

Kuvvet etkisi altındaki maddenin hakareti, yani dinamik ile ilgili problemleri incelemek için kütle merkezi adı verilen noktanın konumunu belirlemek gerekir. x, y, z de yer alan her bir parçacığın bir dW diferansiyel ağırlığa sahip olduğu düşünüldüğünde, γ Cismin, birim hacmi başına ağırlık (özgül ağırlık) olmak üzere; $dW = \gamma\, dV$ biçiminde düzenlenebilir. Bu noktanın X bileşeni Denklem 2.13, Y bileşeni Denklem 2.14, Z bileşeni Denklem 2.15 ile bulunabilir.

$$\bar{x} = \frac{\int \tilde{x}\, dW}{\int d\, W} = \frac{\int \tilde{x}\, \gamma\, dV}{\int \gamma\, dV} \qquad (2.13)$$

$$\bar{y} = \frac{\int \tilde{y}\, dW}{\int d\, W} = \frac{\int \tilde{y}\, \gamma\, dV}{\int \gamma\, dV} \qquad (2.14)$$

$$\bar{z} = \frac{\int \tilde{z}\, dW}{\int d\, W} = \frac{\int \tilde{z}\, \gamma\, dV}{\int \gamma\, dV} \qquad (2.15)$$

Diferansiyel eleman üzerinden alınan tüm bu noktaların uzayda bir insan gövde yapısı ifade ettiğini düşündüğümüzde, yapısal olarak insan gövde yapısını betimleyecek uzuvların her bir parçacık ağırlıkları toplamının sistem üzerinde ki bir noktaya göre momentlerini dengeleyecek nokta sistem için ağırlık noktası olarak ifade edilebilmektedir. Bu katı modellemede katı cismin her bir noktasına etkiyen, noktanın uzayda ki konumu ve yer çekimi ivmesinden kaynaklanan kuvvetlerin bileşkesi ağırlık merkezinin yer düzleminde ki noktasına etkiyecektir.

3. İNSANSI ROBOT PROJESİ

Robot İnstitute of America tarafından 1979 yılında yapılan tanıma göre; Robot, programlanabilen; maddeleri, parçaları, aletleri, önceden tanımlanmış hareketlerle yapılacak işe göre taşıyan veya işleyen çok fonksiyonlu makinelerdir. Güncel sözlüklerde ise robotlar; elektronik ve mekanik birimlerden oluşan, algılama yeteneğine sahip olan ve programlanabilen cihazlardır [22,23]. Bu cihazlar başka bir tanımla canlıların işlevlerini ve davranışlarını taklit edebilen, fiziksel yeteneklere ve yapay zekâya sahip, disiplinler arası öğeler içeren mühendislik ürünleridir [24]. Robotik, robotların tasarımı, üretimi ve kullanımı ile ilgilenen çok disiplinli bir bilim dalıdır.

3.1.Manipülatör Kavramı

Robotikte manipülasyon terimi nesnelerin bir amaç doğrultusunda yerinden alınması, taşınması, montajı, yerleştirilmesi ve çeşitli takımlar ile işlenmesini ifade etmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirebilen mekanizmalar ise manipülatör olarak adlandırılır. Şekil 3.1' de gösterildiği gibi manipülatörlerin, kinematik zincir yapılarına göre farklı tipleri bulunur.



a) Seri Manipülatör b) Paralel Manipülatör

Şekil 3.1 Manipülatör Örnekleri

3.1.1. Seri Manipülatörler

Seri Manipülatörler: Basit kinematik zincirdir, çünkü sadece taban ve uç uzuvlarında bir olmak üzere, diğer uzuvlarında iki bağlantı derecesine sahiptirler. Bu yapıda bir zincir en az iki kinematik zincir uç elemanına bağlanır. Kinematik zincirdeki eyleyici sayısı uç elemanının serbestlik derecesine eşittir.

3.1.2. Paralel Manipülatörler

Paralel Manipülatörler: birer kapalı-çevrim kinematik zincirdir. Paralel manipülatörlerin genel tanımı daha geniştir ve uç elemanının kontrol edilen serbestlik derecesinden daha fazla sayıda eyleyici içeren mekanizmaları da kapsar [25]. Bu tanımlara göre; bir paralel robot n serbestlik derecesine ve bir sabit tabana sahip, en az iki bağımsız kinematik zincir ile birbirine bağlıdır.

3.2. İnsansı Robot

Tasarımı, insan gövde yapısına benzetilerek geliştirilen robotlardır. Genel olarak insansı robotlar gövde, kol ve bacak unsurlarına sahiptir. Bazı insansı robotlar, sadece bel üstü veya bel altı gibi insan vücudunun yalnızca bir kısmı model alınarak yapılmış olabilir. Görünüm ve özellik olarak, bilhassa insanlara benzemeleri için yapılmış robotlara "android" adı verilir.

İnsan gövde yapısının mekanik bir sistem olarak modellenebilmesi için sistemi meydana getiren her bir eleman, insan gövdesindeki en yakın karşılıklarına göre tasarlanması ve doğru bir algoritma ile çalıştırılması gereklidir [26]. İnsan gövde yapısının taşıyıcı iskelet sistemi, android sistemin taşıyıcı uzuvları olarak karşımıza çıkacaktır. Benzer şekilde android sistemin taşıyıcı uzuvlara istenilen pozisyon durumlarını sağlayan, gerçekleşmesi için belirli kısıtlar bulunduran eyleyicileri, insan kas sistemine karşılık gelir. Eyleyicilerin meydana getirdiği kısıtlar sistemi tek bir nokta üzerinde sabit durmaya itecektir.

Hareket kabiliyeti bakımından incelendiğinde, hava da uçabilmek, su da yüzebilmek ve karada yürümek ve sürünmek teknik olarak gerçekleşebilen eylemlerdir. İnsanoğlu bu eylemleri birtakım mekanizmalar ile sistemsel hale getirmiş ve bazı makinalar tasarlayarak ortaya koymuştur. Dünya da en yaygın tercih genellikle tekerlekli taşıtlar olsa da herhangi bir düzgün zemin ihtiyacından dolayı yollara muhtaçtır. Ani konum değişimi merdivenler ve zıplama kabiliyetlerinden mahrum olan bu sistem ulaşımda tercih edilse de bir araç ile gidemediğimiz her noktada yürümenin önemi kendi değerini ortaya sunmaktadır.

Dijital Çağ olarak tanımlanan, yeni nesil teknolojilerin önem kazandığı, yapay-zekâ destekli, bağımsız olarak karar verebilen ve hareket edebilen, tek başına üzerine aldığı herhangi bir işi tamamlayabilen makinaların önemi kuşku götürmez bir şekilde artmıştır.

Çağın gerek ve koşulları çerçevesinde tasarlanabilecek “android” (insana benzer, insansı) bir mekanik sistemin en önemli parçalarından birisi olan yürüme hareketi kabiliyeti; literatürde birçok çalışma ile hayat bulmuş ancak farklı ve kısıtlı yaklaşımlar sebebiyle neticelenmiş bir çalışma gözlemlenmemiştir. Şekil 3.2. ‘de İnsansı robot çalışmalarından örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.2 İnsansı Robot Deneysel Çalışmalarından Örnekler

Robotik sistemlerde ki gelişmeler, teknolojinin gelişmesine muhtaç olduğu gibi, sağladığı fayda ve kolaylıklar bakımından teknoloji açısından birçok kurum/kuruluş tarafından önemle üzerinde durulmuştur. Bu tür kompakt bir sistem üzerine çalışmalar birtakım Algoritmalar gelişmesine neden olmuş, geliştirilen algoritmaların uyarlanabilmesi için bir takım Elektronik tasarımları ortaya çıkarmıştır. Görüntü işleme ve karar verebilme yetenekleri üzerine ciddi çalışmalar yapılırken, yürüme eylemini gerçekleştirecek Ayak-Bacak tasarımları büyük bir değişime uğramamıştır.

Robot ve özellikle insansı robot konuları, mekanik ve dinamik pek çok karmaşık çalışma ile gerçekleşebilir olacaktır [27]. Sensörler ve algoritmalar aracılığıyla bu sorunların üstesinden gelinmeye çalışılsa da denge korunumu konusunda işin gerçeğinde bir matematik, bir dinamik vardır. Sistemlere hız kazandırılmak istenilirken, sensör verileri okumak, işlemek, cevap üretmek ve uygulamak ile gecikme süreleri ve genlikleri artmaktadır.

3.2.1. Robotik Yürüme Sistemi

İnsan gövdesi özelinde yürüme sistemi incelendiğinde; birçok farklı yapıdaki kas dokunun belirli frekanslarda uzayıp-kısalma (salınım) hareketi olarak tanımlanabilmektedir. İnsan gövde yapısı, taşıyıcı uzuvlar olarak iskelet sisteminden faydalanırken, hareket organları olarak kas dokulardan faydalanmaktadır. Kas doku, sinir sisteminden aldığı belirli sinyalleri, kimyasal tepkimeler ile işleyerek, kasılma ve gevşeme yoluyla mekanik işe dönüştüren özelleşmiş bir dokudur [28].

Yürüme, belirli uzuvların periyodik olarak yer değişimi hareketinin tekrarlanmasının sonucudur. Belirli konum değişimlerinin belirli zaman aralıklarında tekrarlanması ile sistem dengesi bozulmadan cisim ağırlık merkezi ötelenmiş, dönmüş olabilmektedir. İnsan gövde yapısı, mekanik bir sistem olarak incelendiğinde birçok farklı durumda gerçekleştirilen hareketlerin uygulanabilmesi için ağırlık merkezinin konumu sürekli olarak değiştirir [29].

İnsan yapısal tasarımı, bu dengeleme işlemleri esnasında vücudunun tamamını kullanabilmektedir. Sistemi meydana getiren parçaların her birinin bir ağırlığı ve sistem ağırlığına oranlarınca sistem ağırlık merkezi konumlarına etkileri vardır, bu etkiler ayakların yere uyguladığı kuvvetlerin şiddetini ve doğrultusunu değiştirebilir [30]. Her bir uzvun geometrik bir şekli ve fiziksel birtakım özellikleri olduğu göz önüne alındığında, bu sistemi oluşturacak her bir elemanın ağırlıkları sistemin ağırlığını oluşturacaktır.

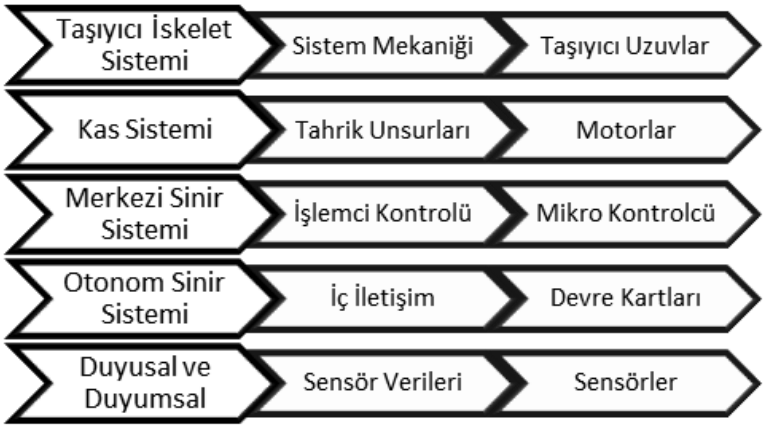
İnsansı yürüme hareketlerinin incelenmesi ve hareketlerinin kinematik analizlerinin yapılarak mekanizma için konum değişimlerini ifade edecek fonksiyonlar ile ifade edilmesi gerekmektedir [31]. Yürüme hareketinin bir fonksiyon biçimine dönüştürülmesi, bu fonksiyonun sisteme uygulanabilmesi için çalışma uzayının tanımlanması ve mekanizmanın gerekli konumlara, gerekli zamanda ulaşması gereklidir [32]. Bu yürüme fonksiyonları üzerinden ayakların belirli zamanlarda belirli konumlarda bulunması ile yürüme işlemi gerçekleşecektir.

4. MATERYAL

Herhangi bir model tasarımı ya da uygulaması yapılmadan önce, amaç doğrultusunda incelenen düzenin hayal edilmesi esastır. Geliştirilmek istenen sistem, yeni ve örneği olmayan bir sistem olabileceği gibi mevcut bir sistemin iyileştirilmesi ya da düzenlenmesini de amaçlayabilir [33].

Geliştirilecek sistem gerçekçi ve ulaşılabilir bir amaca dönük olarak anlaşılabilir ve ölçülebilir olmalıdır. Sistemin planlaması ve genel tasarımı oluşturulduktan sonra sistem elemanları arasında ve gerek duyulursa sistemin beraber çalışacağı diğer sistemlerle ilişkileri hakkında matematiksel modelleme oluşturulur [34]. Matematiksel modelleme genel olarak çok karmaşık matematiksel fonksiyonlardan meydana gelmektedir.

"Bağımsız Hareket Kabiliyetine Sahip Robotik Yürüme Sistemi" Tasarım ve analizlerinde İnsan gövde yapısı hakkında bugüne dek yapılmış araştırılmalar incelenmiş, araştırma sonuçlarında gerekli görülen sistem elemanları uygulanabilir ve uyarlanabilir bir biçimde ele alınmış, sistem içerisinde davranışları hakkında matematiksel modellemeler kurulmuş ve çözülmüş, çözüm sonuçları uzuv parçalarına işlenebilmek üzere bilgisayar programları aracılığıyla dijital ortama aktarılmıştır. Şekil 4.1' de gösterilen; insan gövde yapısının, mekanik bir sisteme modellemesidir.



Şekil 4.1 İnsansı Gövde Yapısının Modellemesi

4.1.Bağımsız Hareket Kabiliyeti

Bağımsız hareket kabiliyeti, bir cismin dışarıdan üçüncül bir kuvvet etkisi altında kalmadan hareket edebilmesi olarak tanımlanmaktadır. Canlılar bir yerden bir yere gidebilmek için hedef rotayı kendileri içgüdüsel olarak belirler, potansiyel güce kendileri sahiptir. Sistemsel açıdan "Bağımsızlık Kavramı" herhangi bir operatörün her işlem için girdi ve talimat sağlamasına gerek kalmadan otomatik olarak çalışmak üzere tasarlanmış ve programlanmış yazılım ve donanımın bir kombinasyonudur [35].

Mekanik Tasarım aşamasında bu tür sistemler iş yapacak unsurların enerjisini ve iş esnasında harcayacağı enerjinin kaynağını da bulundurması gerekmektedir. Potansiyel güç kaynağında, sistemin harcayacağı gücün yanında, sistemi kontrol edecek denetim elemanlarını ve sistemin hareketlerini programlayan ünitelerin de enerji ihtiyaçlarını temin etmelidir.

Bağımsız hareket kabiliyetine sahip biçimde tasarlanan sistem, hedef konuma ulaşabilmek için izleyeceği yol ve ara işlemleri kendi kendine devreye alabilecektir. Bu tür sistemler, süreçlerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesine ve sorunların ortaya çıktıkça belirlenmesine olanak tanıyabilecektir.

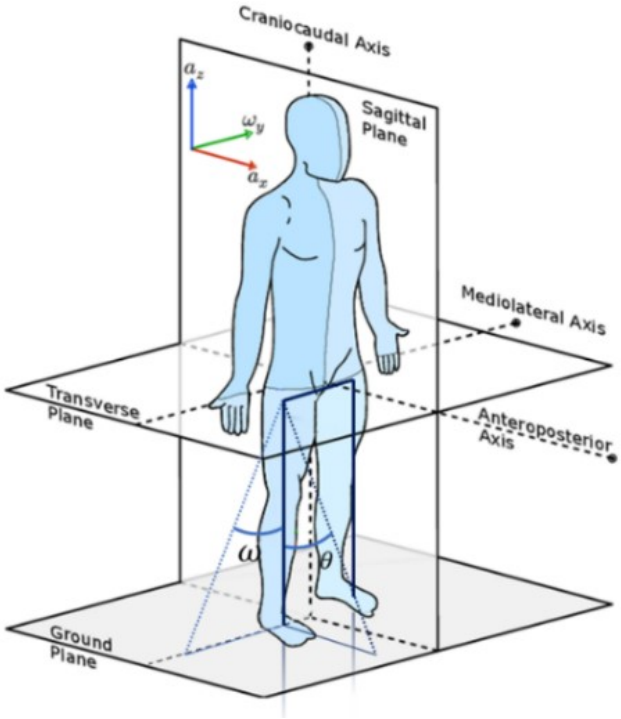
4.1.1. Taşıyıcı Unsurlar ve Mafsallar

Kemikler, insan gövde yapısını fiziksel olarak taşıyan, istenilen pozisyonda durabilmesine imkân veren, rijit yapılardır. Kemiklerden meydana gelen taşıyıcı unsurların, insansı bir sistem üzerinde karşılıkları taşıyıcı uzuvlardır. Kemikler, kuvvet taşıyabilecek mekanik yapıda, kirişler olarak modellenebilmektedir.

İnsan gövde yapısında taşıyıcı unsurlar incelendiğinde birçok serbestlik derecesine sahip eklemler devinimsel olarak gelişmiştir. Eklemler, kemikler arasındaki fonksiyonel bağlantıyı sağlayan yapılardır. Eklemler, bağlantı elemanlarından mafsallar olarak modellenebilmektedir. Kalça ile bacak arasında bulunan pelvis mekanik açıdan Universal Mafsal ile tanımlanabilir.

4.1.2. Gerekli Hareketler ve Tahrik unsurları

İnsansı sistemler, kavramsal olarak anlaşılacağı üzere gerek hareket gerek mantık gerek ise düşünce yönünden insanı taklit etmektedir. İnsansı bir makinenin hareket aksamı, her türlü ortam koşullarında, hem bir makinenin sahip olabileceği her türlü avantaja, hem de iyi bir "insan taklit yeteneğine" sahip olmalıdır. İnsan gövde yapısı üzerinde Şekil 4.2 'de gösterilen anatomik eksenler ifade edilebilmektedir. Yürüme eylemi esnasında Bacak uzuvlarının şekil üzerinde gösterilen ω ve θ açı değerlerini sağlamaları yürüme hareketinin uygulanması için gereklidir.



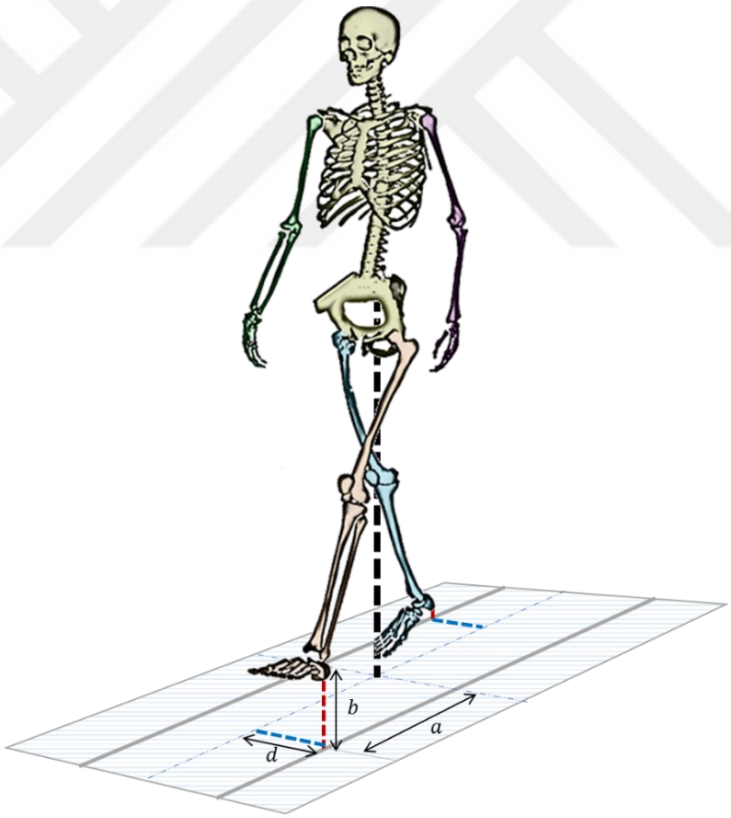
Şekil 4.2 İnsan Gövde Yapısı Üzerinde Anatomik Düzlemler

Taşıyıcı uzuvların anatomik eksenler ile açı değişimlerini insan gövde yapısı üzerinde kas dokular ile gerçekleştirmektedir. İnsan gövde yapısı taşıyıcı unsuru iskelet sistemini robotik yürüme sistemi olarak modellediğimizde, ağırlık merkezi ve ayaklar arasında ki doğrultu üzerinde kalmasıyla mümkün olacaktır. Yürüme hareketi esnasında ağırlık merkezinin bulunabileceği farklı durumlar Tablo 4.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 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

Sistem ağırlık merkezi noktası, ayakların yere temas noktalarının oluşturduğu doğrultu üzerinde kaldığı müddetçe, insansı sistem denge şartını sağlayacaktır. Denge durumu=0 olduğunda iki ayak üzerinde denge durumunu; Denge durumu=1 olduğunda, Sağ ayak üzerinde Denge durumunu; Denge durumu=2 olduğunda, Sol ayak üzerinde denge durumunda olduğu durumu ifade etmektedir. Şekil 4.3' de yürüme sistemi üzerinde eksenel fark mesafeleri gösterilmektedir.

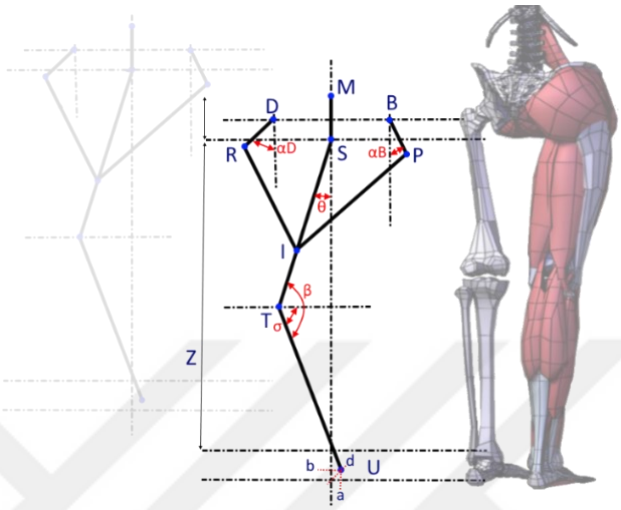


Şekil 4.3 Yürüme Sistemi Üzerinde Eksenel Fark Mesafeleri

Bir ayak denge durumunda iken, diğer ayağın denge merkezine eksenel fark değerleri a,d,b mesafeleri ile ölçülebilmektedir.

4.2. Mekanik Sistem

İnsan gövde yapısal tasarımı mekanik bir sistem olarak incelendiğinde Şekil 4.4‘ de gösterilen Kas-İskelet Modeli yaklaşımı ile modellenebilmektedir.

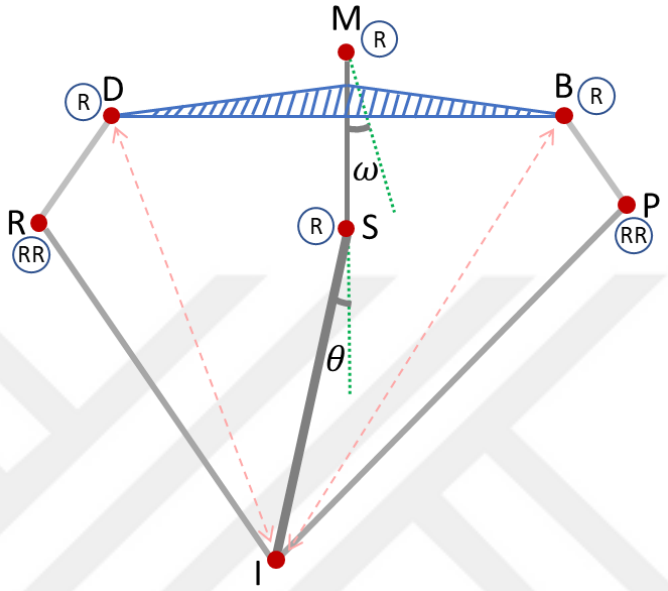


Şekil 4.4 Kas-İskelet Modeli Yaklaşımı

Şekilde gösterilen M noktası insan kalça uzvunun merkezi pozisyonunda bulunan bir noktayı ifade ettiğinde, S noktası bacağın ileri-geri hareketine imkân verecek mafsal merkezi, |ST| uzvu bacağın üst kısmını, T noktası diz eklemini (mafsalını), |TU| bacağın alt kısmını, U noktası ayağın yer ile temas noktasını ifade etmektedir. B ve D noktaları Bacağın hareketini sağlayacak kasların kalça üzerinde ki bağlantı noktaları olmak üzere, I noktası Kasların bacağın üst kısmında bir bağlantı noktasıdır.

B ve D noktalarından I noktasına doğru, R ve P merkezli Radyal değişimler ile, kas modellerinin uzayıp-kısalması modellenebilmektedir. Bu uzaklık değişimi ile ilgili kinematik denklemler çözüldüğünde x ekseninde y ekseninde ve bu eksenlerdeki değişimlere bağıl olarak z ekseninde bir konum değişimi sağlanacaktır. X ekseni ayağın adım atması için gerekli yatay konum değişimini, Y ekseni ayağın adım atma işlemi sırasında platformun dengeleme eksenini belirleyecektir. Burada 2 eyleyici ile 2 eksende istenilen konum değişimi sağlarken Z ekseninde bağıl bir değişim ortaya çıkacaktır. Bu bağıl değişimi ilave bir eyleyici ile tatbik edebilir olduğumuzda ayakları istenilen konumlara getirebilecek bir kinematik zincir elde edilecektir.

Kinematik zincir ile ortaya çıkacak mekanizmanın belirli oranlar ile değiştirilmesiyle herhangi bir kayıp hareket kabiliyet kaybı olmayacaktır. Mekanizmaların serbestlik derecesi, mekanizmada bulunan mafsalların serbestlik derecesi, mafsal sayısı, uzuv sayısını içeren bağlantı ile bulunabilir. Şekil 4.5. ‘ de Mekanizma Kinematik Zinciri ifade etmektedir.



Şekil 4.5 Mekanizma Kinematik Zincir

Bir mekanizmanın serbestlik derecesi, mekanizmada bulunan tüm uzuvların konumunu belirlemek için gerekli olan parametre sayısıdır. Mekanizmaların serbestlik derecesi, uzuv sayısına, mafsal sayısına ve mafsal serbestlik derecesine bağlıdır, uzuv boyutuna bağlı değildir. Kas-İskelet modeli yaklaşımında mekanizmanın hareketini sağlayacak açı değişimleri, kasların uzayıp kısalmasını ifade etmek üzere, radyal motorlardan meydana gelen mekanizmanın uzaklık değişimi |BI| ve |DI| ile modellenmektedir.

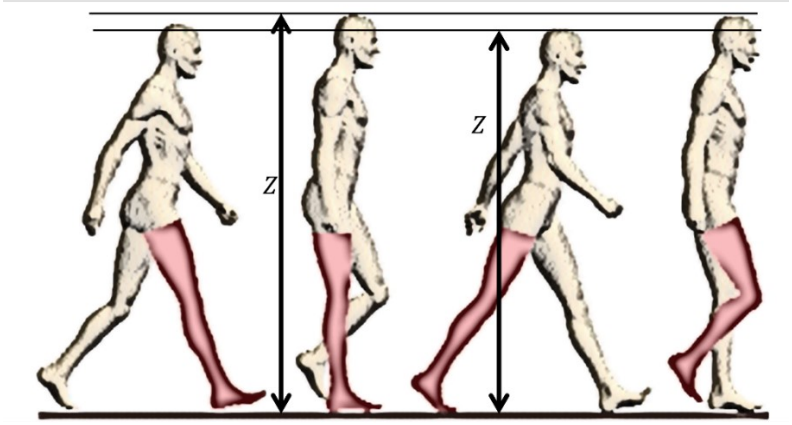
Bu uzaklık değişimi ile ilgili kinematik denklemler çözüldüğünde x ekseninde y ekseninde ve bu eksenlerdeki değişimlere bağıl olarak z ekseninde bir konum değişimi sağlanacaktır. X ekseni ayağın adım atması için gerekli yatay konum değişimini, Y ekseni ayağın adım atma işlemi sırasında platformun dengeleme, yanal eksenini belirleyecektir. Burada 2 eyleyici ile 2 eksende istenilen konum değişimi sağlarken Z ekseninde (dikey) bağıl bir değişim ortaya çıkacaktır.

İnsansı robotlarda Kas-İskelet Modeli yaklaşımında önerilen mekanizma kinematik Zincir Modelinde gösterilmektedir. Bu mekanizmanın kinematik analizi yapılmadan önce serbestlik derecesi hesaplanmalıdır. Genel olarak mekanizmaların serbestlik derecesi formülü Denklem 6 ‘da gösterilmiştir. Burada çalışma alanı uzay olduğu için serbestlik derecesini ifade eden λ=6 olarak alınmıştır. Mekanizma da toplam uzuv sayısı l=6 olarak tanımlanabilir. Mekanizma üzerinde j=9 mafsal bulunmaktadır.

$$S.D. = \lambda(l-j-1) + \sum_{i=1}^{j} fi \qquad (4.1)$$

Gerekli işlemler yapıldığında önerilen mekanizmanın serbestlik derecesi 2 olarak bulunur. Her bir bacak uzvu 2 serbestlik derecesine sahip olacaktır. Z ekseninde konum değişimi için ilave bir eyleyici ile 2+1=3 Serbestlik derecesi ve 2 ayak olacak şekilde, 2x3=6 serbestlik derecesi ile gereken konum değişimleri elde edilecektir.

Yürüme esnasında ayak kalça arasında, aralarındaki dikey mesafe harekete bağlı olarak değişir [36] Bu değişime salınım adı verilir. Salınım genliği yürüme esnasında taşıyıcı uzuvların uzayda ki konumlarını değiştirir [37]. Taşıyıcı uzuvları bu konumda tutacak kas modelleri yürüme esnasında harcanacak enerjiyi etkiler. Şekil 4.6 ‘da salınım genliğinin optimize olduğu Z kalça yükseklik mesafesi tanımlanmıştır.



Şekil 4.6 Yürüme Esnasında Salınım

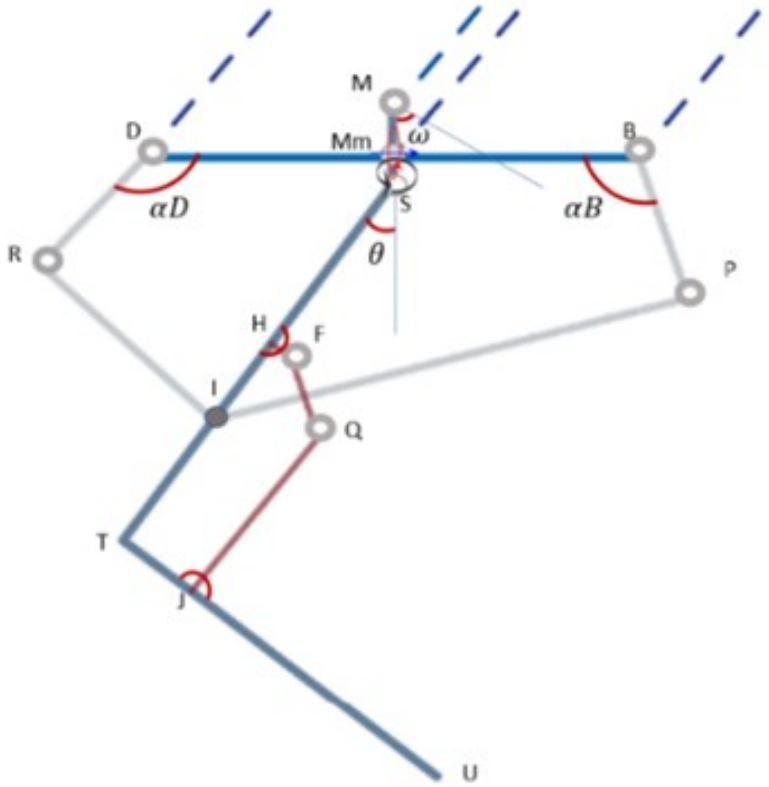
Bu bağıl değişimi ilave bir eyleyici ile tatbik edebilir olduğumuzda ayakları istenilen konuma getirebilecek bir kinematik zincir elde edilecektir.

4.2.1. Noktalar ve Konumları

Uzayda noktaların konumu; öklid uzayında noktalar arası mesafeler ve açı değişimleri ile kinematik analiz gerçekleştirilebilir.

M Noktasında bacağın (ω) içeri-dışarı hareketine imkân veren eklem mafsal bulunur.
M_m Noktasında bacağın (θ) ileri-geri hareketine imkân veren eklem mafsal bulunur.
ST Bacağın üst kısmını ifade eden kiriş.
TU Bacağın alt kısmını ifade eden kiriş.
B, D, F Kasların uzayıp-kısalmasını temsil eden radyal motor merkezleri
P, R, Q Kasların uzayıp-kısalmasını temsil eden radyal motor rotorları.
$\alpha B, \alpha D, \alpha F$ Kasların uzayıp-kısalmasını temsil eden radyal motorların açıları
H, I, J Kasları temsil eden kirişlerin, Taşyıcı uzuvlara bağlantı noktaları

Olmak üzere; Şekil 4.12. ‘de mekanizma gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Mekanizma Kinematik İncelemesi

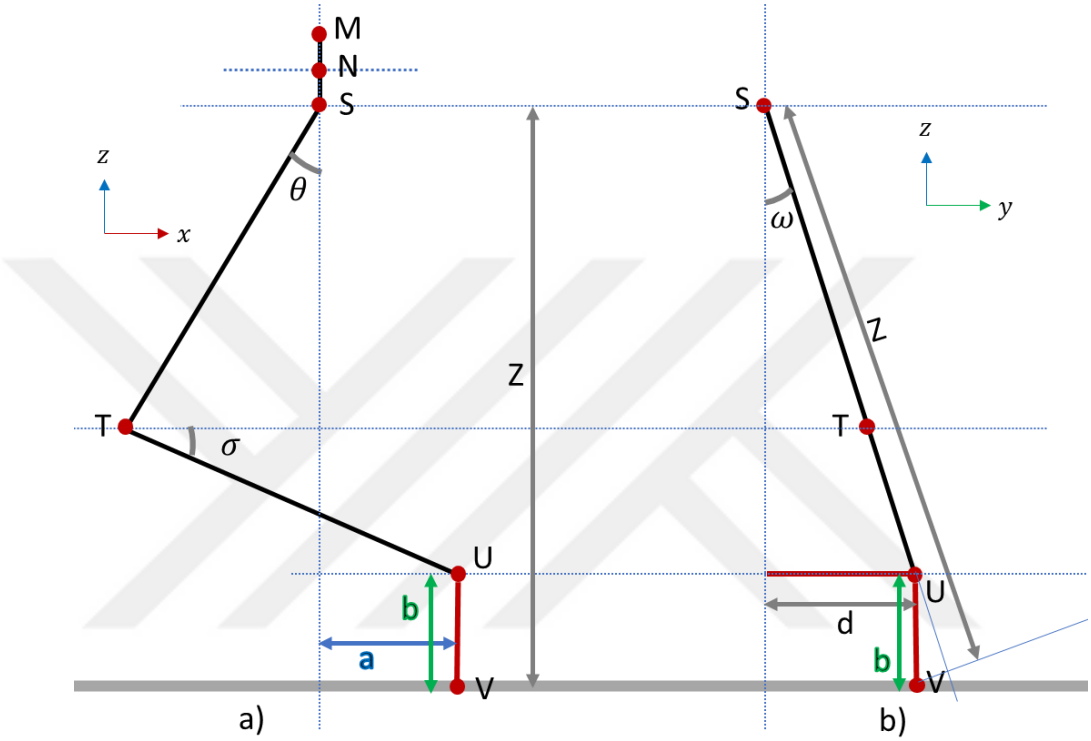
Tablo 4.2 ‘de mekanizma üzerinde ki noktaların x,y,z bileşenleri gösterilmiştir. Noktaların uzayda konumları orijine göre uzaklıkları ile tanımlanabilir.

Tablo 4.2. Sistem Noktalarının Bileşen Koordinatları

	X	**Y**	**Z**
M	0	0	0
Mm	0	0	$-\lvert MmM\rvert$
B	$\lvert BMm\rvert$	$-\lvert B_y\rvert$	$-\lvert MmM\rvert$
D	$-\lvert DMm\rvert$	$-\lvert Dy\rvert$	$-\lvert MmM\rvert$
P	$\lvert BM\rvert$ $+\lvert BP\rvert\ sin\alpha B$	$-\lvert By\rvert$	$-\lvert MmM\rvert$ $-\lvert BP\rvert\cos\alpha B$
R	$-\lvert DM\rvert$ $+\lvert DR\rvert\ sin\alpha D$	$-\lvert Dy\rvert$	$-\lvert MmM\rvert$ $-\lvert DR\rvert\cos\alpha D$
S	0	$\lvert MS\rvert\sin\omega$	$-\lvert MS\rvert\cos\omega$
I	$\lvert SI\rvert\sin\theta$	$(\lvert MS\rvert$ $+\lvert SI\rvert\cos\theta)sin\omega$	$-(\lvert MS\rvert$ $+\lvert SI\rvert\cos\theta)\ cos\ \omega$
T	$\lvert SI\rvert\sin\theta$	$\lvert MS\rvert\sin\omega$ $+(\lvert ST\rvert\cos\theta)\sin\omega$	$-\lvert MS\rvert\cos\omega$ $-(\lvert ST\rvert\ cos\ \theta)\ cos\ \omega$
U	$\lvert SI\rvert\sin\theta$ $+\lvert TU\rvert\cos\sigma$	$\lvert MS\rvert\sin\omega$ $+(\lvert ST\rvert\cos\theta)\sin\omega$ $+(\lvert TU\rvert\ sin\ \sigma)\ sin\ \omega$	$(-\lvert MS\rvert\cos\omega$ $-(\lvert ST\rvert\ cos\ \theta)\ cos\ \omega)$ $-(\lvert TU\rvert\ cos\ \omega)\ sin\ \sigma$

4.2.2. Bacak Uzuvlarının Eksenlerle Yaptığı Açılar

Sistem kinematik olarak ele alındığında; M noktası (0,0,0) kabul edilirse, ω açı değişimi, ayak içeri-dışarı pozisyonuna göre farklı duruşlar meydana getirecektir. Şekil 4.8.a ‘ da z-x düzleminde, Şekil 4.8.b de z-y düzleminde görülmektedir.



Şekil 4. 8 Bacakların Eksenler ile Yaptığı Açılar

Ayak taban noktası U, M noktasına göre konumu Tablo 4.1 de gösterildiği gibi bilinmektedir, buna göre Fark a değeri Denklem 4.2 ‘ de ki gibi, b değeri Denklem 4.3 ‘ de ki gibi, d değeri Denklem 4.4 ‘ de ki gibi ifade edilebilir.

$$a = |ST|\ \sin(\theta) + |UT|\ \cos(\sigma) \tag{4.2}$$

$$b = Z - [|ST|\cos(\theta) + |UT|\sin(\sigma)\ ] \tag{4.3}$$

$$d = [|MS| + |ST|\ \cos(\theta) + |UT|\ \sin(\sigma)]\sin(\omega) \tag{4.4}$$

Bacaklar arasında σ açısı alt bacağın yatayla yaptığı açı olmak üzere;

$\beta = 90 + \sigma - \theta$ biçiminde ifade edilebilir.

ω açı değeri d ye ve σ ya bağlı biçimde Denklem 4.5 gibi ifade edilir.

$$\omega = \text{asin}\left(\frac{d}{|MS| + |ST|\ \cos(\theta) + |UT|\sin(\sigma)}\right) \quad (4.5)$$

Fark a değerine göre bulunan σ açısı |UT| ve |ST| sabit olduğu için; Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 gibi ifade edilebilir.

$$|UT|\cos(\sigma) = a - |ST|\sin(\theta) \quad (4.6)$$

$$|UT|\sin(\sigma) = Z - |ST|\cos(\theta) - b \quad (4.7)$$

Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 birleştirilerek çözüldüğünde Denklem 4.9. halini alır.

$$\begin{aligned} |UT|^2 &= (a - |ST|\sin(\theta))^2 + (Z - b - |ST|\cos(\theta))^2 \\ &= a^2 + |ST|^2\ \sin^2\theta - 2a\,|ST|\sin(\theta) + (Z-b)^2 \\ &+ |ST|^2\cos^2(\theta) - 2(Z-b)\,|ST|\cos(\theta) \\ &= a^2 + |ST|^2 + (Z-b)^2 - 2\,|ST|\,[a\sin(\theta) \\ &+ (Z-b)\cos(\theta) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$a\sin(\theta)\,(Z-b)\cos\,(\theta) = \frac{a^2 + |ST|^2 + (Z-b)^2 - |UT|^2}{2|ST|} \quad (4.9)$$

Buna göre θ açısı; a,|ST|,Z,|TU|,b ye bağlı olarak Denklem 4.10 elde edilir.

$$\theta = \text{asin}\frac{\frac{a^2 + |ST|^2 + (Z-b)^2 - |UT|^2}{2|ST|}}{\sqrt{a^2 + (Z-b)^2}} + \text{atan}\frac{b-Z}{a} \quad (4.10)$$

Fark a değerine bulunan σ açısı |UT| ve |ST| sabit olduğu için; Denklem 4.11 ve Denklem 4.12 gibi ifade edilebilir.

$$|ST|\sin(\theta) = a - |UT|\cos(\sigma) \quad (4.11)$$

$$|ST|\cos(\theta) = Z - b - |UT|\sin(\sigma)\ \beta = 90 + \sigma - \theta \quad (4.12)$$

Denklem 4.11 ve Denklem 4.12 birleştirilerek çözüldüğünde Denklem 4.13 halini alır.

$$\begin{aligned} |ST|^2 &= (a - |UT|\cos(\sigma))^2 + (Z - b - |UT|\sin(\sigma))^2 \\ &= a^2 + |UT|^2\ \cos^2\sigma - 2a\,|UT|\cos(\sigma) + (Z-b)^2 \\ &+ |UT|^2\sin^2(\sigma) - 2(Z-b)\,|UT|\sin(\sigma) \\ &= a^2 + |UT|^2 + (Z-b)^2 - 2\,|UT|\,[(Z-b)\sin(\sigma) \\ &+ a\cos(\sigma) \end{aligned} \tag{4.13}$$

Denklem 4.13 düzenlendiğinde Denklem 4.14 halini alacaktır.

$$(Z-b)\sin\ (\sigma) + a\cos(\sigma)\ = \frac{a^2 + |UT|^2 + (Z-b)^2 - |ST|^2}{2|UT|} \tag{4.14}$$

Buna göre σ açısı; a,|ST|,Z,|TU|,b ye bağlı olarak Denklem 4.10 elde edilir.

$$\sigma\ = \text{asin}\frac{\dfrac{a^2 + |UT|^2 + (Z-b)^2 - |ST|^2}{2|UT|}}{\sqrt{a^2 + (Z-b)^2}} + \text{atan}\frac{a}{b-Z} \tag{4.15}$$

4.2.3. Çalışma Uzayı Analizi

Mekanizmanın çalışma uzayı fiziksel kısıtlar barındıran birtakım geometriler ile modellenebilir. Uzayda farklı noktalar, geometrik denklemler ile matematiksel eşitlikler biçimine dönüştürülebilir. Farklı geometrik denklemlerin eşitlenerek, matematiksel ifadeler çözüldüğünde bu noktaların konumunu verecek eşitlikler hesaplanabilir olacaktır. |ST| uzvuna istenilen hareketi sağlayacak olan B ve D radyal eyleyicileri arasındaki parçanın, uzaydaki konumu incelendiğinde, merkezi bir daire üzerinde hareket eden bir kürenin geometrisi biçimindedir. Kalça eklemi, Universal Mafsal olarak seçildiğinde ise hareket eksenleri birbirine dik olacağından, |ST| üzerinde seçilecek herhangi bir noktanın uzayda ki konumu "Torus" geometrisinin üzerinde de olacaktır.

Bacakların boyu sabit kalmak üzere; mafsal açılarına bağlı olarak a,b,d mesafeleri tanımlanmıştır. Buna göre; P (x1, y1, z1) merkezli r yarıçaplı küre formülü Denklem 4.16 gibidir.

$$(x - x1)^2 + (y - y1)^2 + (z - z1)^2 = r^2 \qquad (4.16)$$

Bu kürenin merkezi P ve boyu PI olarak tanımlanırsa; Denklem 4.18 elde edilir.

$$(x - |BM| + |BP|\, sin\alpha B)^2 + (y - (-B_Y)^2 + (z - (-|MmM| - |BP|\, cos\, \alpha B))^2 = PI^2 \qquad (4.17)$$

Denklem 4.16 ' da ifade edilen küre geometrik denklemi; kürenin merkezi P ve boyu PI olarak tanımlanırsa; Denklem 4.20 elde edilir.

$$(x - (-|DM| + |DR|\, sin\alpha D))^2 + (y - (-D_Y)^2 + (z - (-|MmM| - |DR|\, cos\, \alpha D))^2 = RI^2 \qquad (4.18)$$

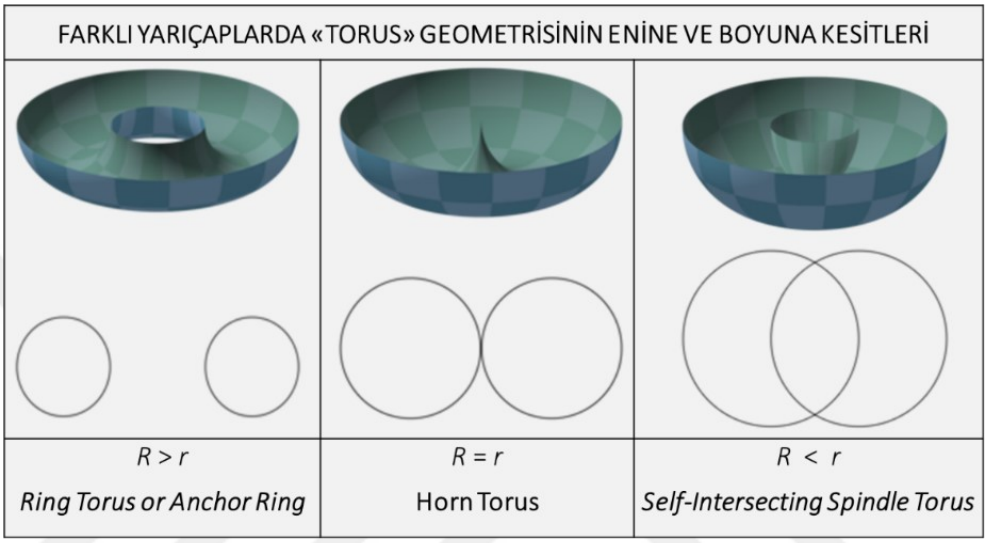
M ve S merkezli Torus (simit) geometrisinin denklemi, Denklem 4.22' deki gibidir.

$$x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - r^2 = 4R^2(x^2 + y^2) \qquad (4.19)$$

$R = |MS|$ Olarak ve $r = |SK|$ olarak düzenlendiğinde Denklem 4.23 halini alır.

$$x^2 + y^2 + z^2 + |MS|^2 - SK^2 = 4\,MS^2(z^2 + y^2) \qquad (4.20)$$

$R < r$ Olacağından elma içerisinde limon geometrisi oluşacaktır. Şekil 4.9 'da gösterilen R ve r farklı durumlarda Torus Geometrisinin Enine ve Boyuna kesitleridir.



Şekil 4. 9 Farklı Yarıçaplarda Torus Geometrisi Eksen Kesitleri

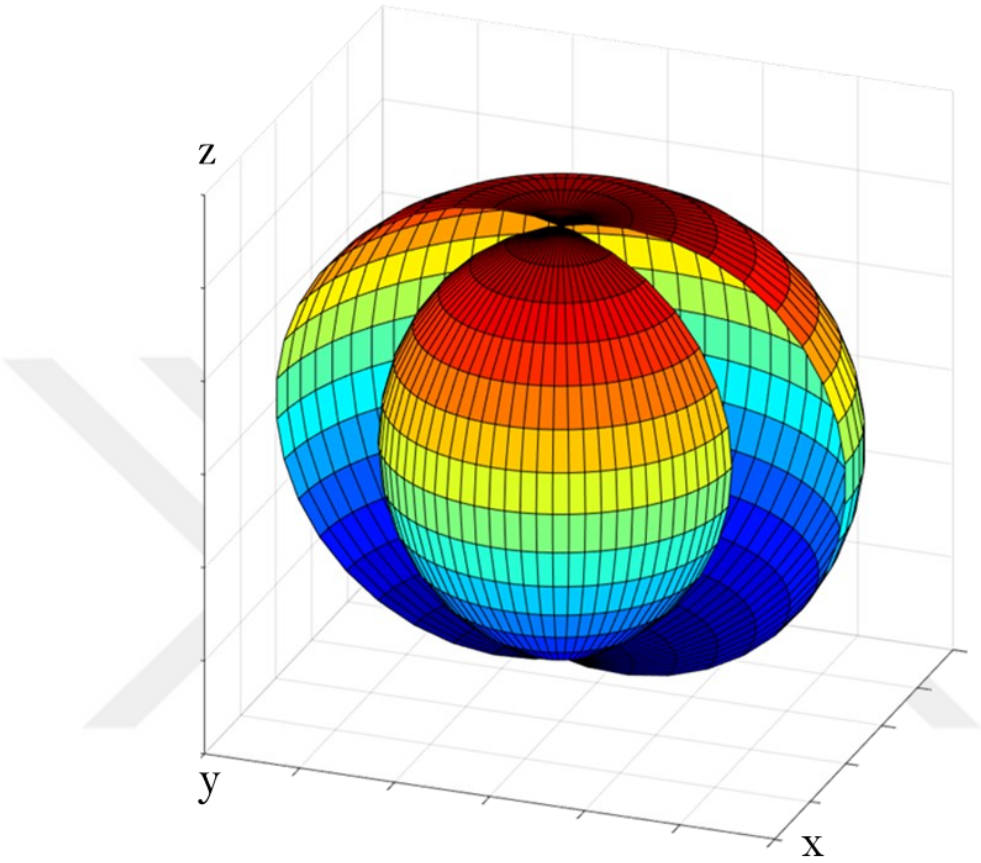
$\forall\, K\,(x, y, z) \in$ Ç.$K.olmak$ üzere; Bu denklemin kökleri çözüldüğünde;

$$I(x, y, z) = \begin{cases} x\,(\theta\,, \omega) = (R + r\cos\theta)\cos\omega \\ y\,(\theta\,, \omega) = (R + r\cos\theta)\sin\omega \\ z\,(\theta\,, \omega) = r\sin\theta \end{cases} \qquad (4.21)$$

Kökleri gelmektedir. Bu ifadeleri sistem koordinat düzlemine göre uyarladığımızda;

$$I\,(x, y, z\,) = \begin{cases} I_X = |SI|\sin\theta \\ I_y = (\,|MS| + |SI|\cos\theta\,)\sin\omega \\ I_Z = -(\,|MS| + |SI|\cos\theta\,)\cos\omega \end{cases} \qquad (4.22)$$

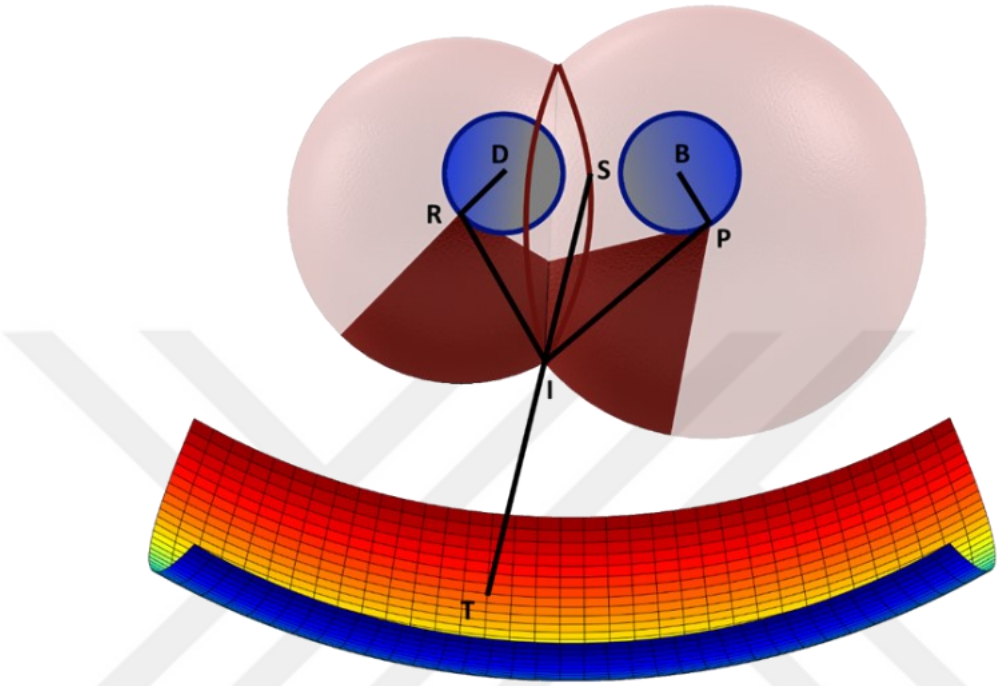
Denklem 4.25 ‘ in bileşenleri x, y, z değerleri sayısal olarak 0’dan 2 pi ye Matlab Programı üzerinde; çözüldüğünde elde edilen Şekil 4.10‘ te Tüm çalışma uzayı gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Tüm Çalışma Uzayı

|ST| parçası üzerinde herhangi bir noktanın çalışma uzayı, Torus geometrisinin bir bölümü olarak ulaşılmaktadır. I(x,y,z) noktasını sağlayan değerler, Denklem 4.25 ’te gösterilen eşitlik için çözüm değerleri alarak ifade edilen nokta şartını sağlamaktadır.

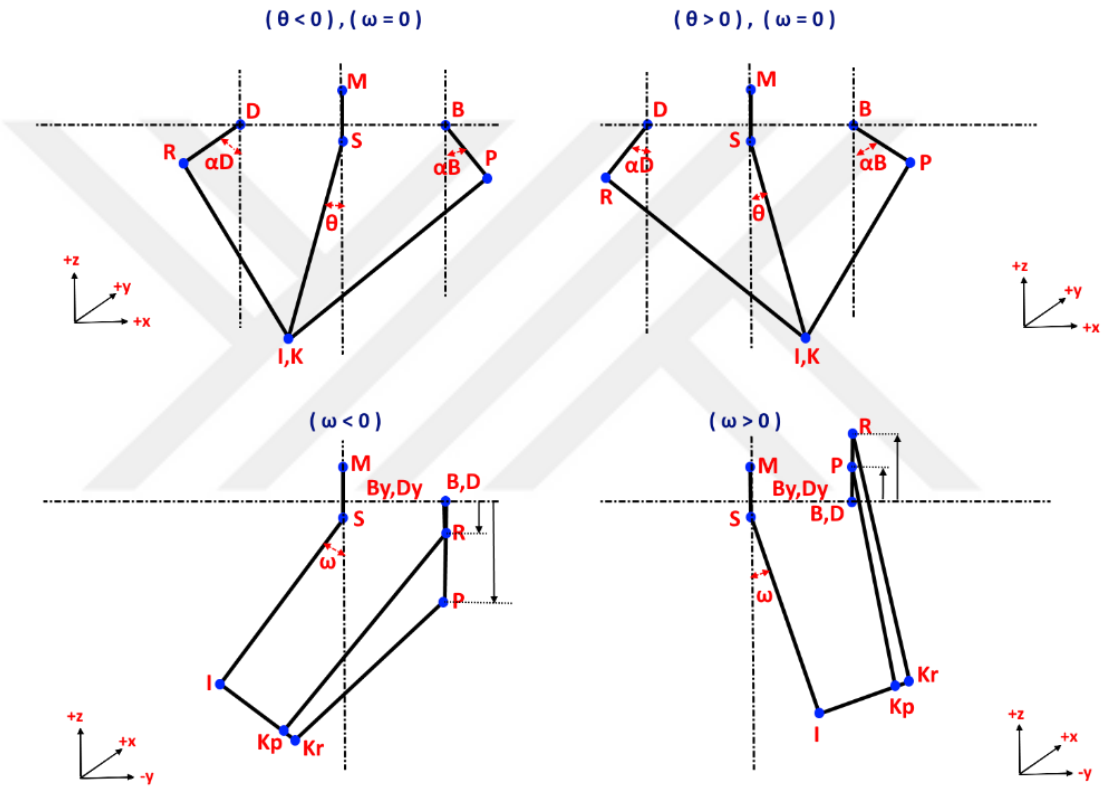
Fiziksel kısıtlar sonucunda Elde edilen geometrinin yürüme hareket modelinde çalışacağı +45,-45 derece için modellemesi yapıldığında, kalça ekleminde bulunan motorların hareketine göre üst bacak Şekil 4.11 ‘deki gibi bir çalışma uzayında çalışacaktır. Bu çalışma uzayı Torus geometrisinin bir bölümünü temsil etmektedir.



Şekil 4.11 Mekanizma Çalışma Uzayı

4.2.4. Eyleyici (Motor) Açıları

θ ve ω açı değerleri ile hareket edebilen bacak üst kısmı, I noktasından tahrik ile bu hareketini gerçekleştirecektir. I noktasında iki farklı motordan gelen kas modeli kirişler, fiziksel şartlar gereği aynı nokta üzerinde bağlanamazlar. Bu durumda BP kirişi I noktasına bağlantısı K_p, DR kirişi I noktasına bağlantısı K_r kadar sapma ile meydana gelecektir. Şekil 4.12' de bacağın hareketini sağlayacak motor açı değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Radyal Motor Açı Değerleri

Tasarım modelde kasların noktasal olarak, çakışık olduğu durum modellenmiştir. Ancak fiziksel geometride durum farklıdır, mafsal mekanik bağlantıları ancak geometrik bir fark ile bağlanabilir. Bu nedenle sisteme bir I_k parametresi eklenerek iki motor açı değeri arasındaki simetrikliğin önüne geçilmiştir.

Buna göre; PK boyu sabit bir uzaklık olduğuna göre, uzayda iki nokta arası mesafe formülü ile tanımlanabilecektir.

$$
\begin{aligned}
|PK|^2 = {} & [|SI|\,sin\,\theta - |MB| - |BP|\,sin\,\alpha B]^2 \\
& + [(|MS| + |SI|\cos\theta)\sin\omega - I_P\cos\omega + B_Y]^2 \\
& + [-(|MS| + |SI|\cos\theta)\cos\omega - I_P\sin\omega + MmM \\
& + |BP|\cos\alpha B]^2
\end{aligned}
\tag{4.23}
$$

Denklem 4.23 düzenlendiğinde, Denklem 4.24 halini alacaktır.

$$
\begin{aligned}
|PK|^2 - \Big[& (|SI|sin\theta - |MB|)^2 \\
& + \big((|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,sin\,\omega - I_P\,cos\,\omega + By\big)^2 \\
& + (-(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega - I_P\,sin\,\omega + MmM)^2 \\
& + BP^2\Big] \\
& = (|SI|\sin\theta - |MB|\sin\alpha B \\
& - (-(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega \\
& - I_P\,sin\,\omega + MmM)\cos\alpha B)\,(-2|BP|)
\end{aligned}
\tag{4.24}
$$

Burada denklem üzerinde birtakım tanımlamalar yapıldığında; A ifadesi Denklem 4.25, B ifadesi Denklem 4.26, C ifadesi Denklem 4.27 olarak ifade edilebilir.

$$A = |SI|sin\theta - |MB| \tag{4.25}$$

$$B = -(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega - I_P\,sin\,\omega + MmM \tag{4.26}$$

$$C = \frac{|PK|^2 - \left[A^2 + \left((|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,sin\,\omega - I_P\,cos\,\omega + By\right)^2 + B^2 + BP^2\right]}{-2|BP|} \tag{4.27}$$

Buna göre B motor açısı, A,B,C biçiminde Denklem 4.28 ' deki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha B = \text{asin}\frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \text{atan}\frac{B}{A} \tag{4.28}$$

Buna göre; RK boyu sabit bir uzaklık olduğuna göre, uzayda iki nokta arası mesafe formülü ile tanımlanabilecektir.

$$
\begin{aligned}
|RK|^2 = {} & [|SI|\,sin\,\theta + |MD| - |DR|\,sin\,\alpha D]^2 \\
& + [(|MS| + |SI|\cos\theta)\sin\omega - I_R\cos\omega + D_Y]^2 \\
& + [-(|MS| + |SI|\cos\theta)\cos\omega - I_R\sin\omega + MmM \\
& + |DR|\cos\alpha D]^2
\end{aligned}
\tag{4.29}
$$

Denklem 4.29 düzenlenirse, denklem 4.30 biçimini alacaktır.

$$
\begin{aligned}
|RK|^2 - \Big[& (|SI|sin\theta + |MD|)^2 \\
& + \big((|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,sin\,\omega - I_R\,cos\,\omega + Dy\big)^2 \\
& + (-(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega - I_R\,sin\,\omega + MmM)^2 \\
& + DR^2\Big] \\
& = (|SI|\sin\theta - |MD|\sin\alpha D \\
& - (-(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega \\
& - I_R\,sin\,\omega + MmM)\cos\alpha D)\,(-2|DR|)
\end{aligned}
\tag{4.30}
$$

Burada denklem üzerinde birtakım tanımlamalar yapıldığında; D ifadesi Denklem 4.31, E ifadesi Denklem 4.32, F ifadesi Denklem 4.33 olarak ifade edilebilir.

$$D = |SI|sin\theta - |MD| \tag{4.31}$$

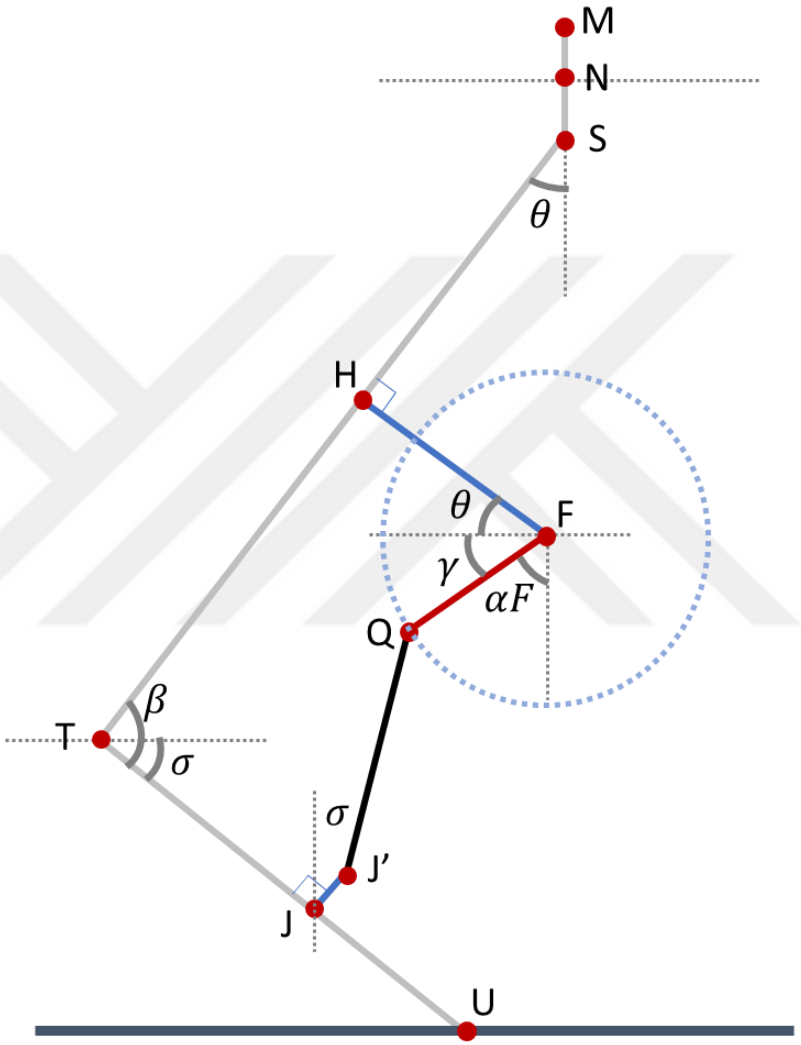
$$E = -(|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,cos\,\omega - I_R\,sin\,\omega + MmM \tag{4.32}$$

$$F = \frac{|RK|^2 - \left[D^2 + \left((|MS| + |SI|\,cos\,\theta)\,sin\,\omega - I_R\,cos\,\omega + Dy\right)^2 + E^2 + DR^2\right]}{-2|DR|} \tag{4.33}$$

Buna göre B motor açısı, A,B,C biçiminde Denklem 4.34 gibi ifade edilebilir.

$$\alpha D = \text{asin}\frac{F}{\sqrt{D^2 + E^2}} + \text{atan}\frac{E}{D} \tag{4.34}$$

Üst bacak ve alt bacak modelleri arasında ki açıyı β ile ifade edebiliriz. σ ise kalça eklemi ve alt bacak arasında kalan açı tanımlıdır. Buna göre tasarımın Şekil 4.13 'de gösterilen SCD. z mesafesinin θ ile ilişkili kısımları üst bacak ile elde edilmiştir. Diz modelinin A,B,D değerlerine göre SCD. D boyunda ki mesafe yalnız ω açısından geldiği için diz motoru 2 boyutlu bir denklem kümesidir.



Şekil 4.13 *β* Açı Değişimi ile Bacaklar Arasında ki Açı Değişimi

Diz motoru F noktasında, Q yarıçaplı radyal motor olarak seçilmiştir. Buna göre SCD. Üzerinde gösterilen, Q ve J' noktalarının konumları Tablo 4.3' te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Diz Motoru Bağlantı Noktaları

	X	Y	Z
Q	$\|SH\|\ sin\theta$ $+ \|HF\|cos\theta$ $- \|QF\|\cos\gamma$	$[-\|MS\| - \|SH\|\cos\theta$ $+ \|HF\|\sin\theta$ $+ \|QF\|\sin\gamma]\sin\omega$	$[-\|MS\| - \|SH\|\cos\theta$ $+ \|HF\|\sin\theta$ $+ \|QF\|\sin\gamma]\cos\omega$
J'	$[\|ST\|\sin\theta$ $+ \|TJ'\|\cos\overline{\sigma}]$	$[-\|MS\| - \|ST\|\cos\theta$ $+ \|TJ'\|\ sin\,\overline{\sigma}]\sin\omega$	$[-\|MS\| - \|ST\|\cos\theta$ $+ \|TJ'\|\ sin\,\overline{\sigma}]\cos\omega$

QJ' boyu sabit bir uzaklık olduğuna göre, uzayda iki nokta arası mesafe formülü ile tanımlanabilecektir.

$$|QJ'|^2 = (Q_x - J'_x)^2 + \left(Q_y - J'_y\right)^2 + (Q_z - J'_z)^2 \tag{4.35}$$

$$\begin{aligned} |QJ'|^2 = [\ & |SH|\ sin\theta + |HF|cos\theta - |QF|\,cos\,\gamma - \ |ST|\,sin\,\theta \\ & - |TJ'|\,cos\,\overline{\sigma}\ ]^2 \\ & + \left[\sin\omega\ [-|MS| - |SH|\,cos\,\theta + |HF|\,sin\,\theta + |QF|\,sin\,\gamma\right. \\ & \left. + |MS| + |ST|\,cos\,\theta - |TJ'|\,sin\,\overline{\sigma}]\right]^2 \\ & + [\left[cos\,\omega\ [-|MS| - |SH|\,cos\,\theta + |HF|\,sin\,\theta + |QF|\,sin\,\gamma\right. \\ & \left. + |MS| + |ST|\,cos\,\theta - |TJ'|\,sin\,\overline{\sigma}]\right]^2] \end{aligned} \tag{4.36}$$

Burada denklem üzerinde birtakım tanımlamalar yapıldığında; A ifadesi Denklem 4.29, B ifadesi Denklem 4.30, C ifadesi Denklem 4.31 olarak ifade edilebilir.

$$A = |SH|\ sin\theta + |HF|cos\theta - \ |ST|\,sin\,\theta - |TJ'|\,cos\,\overline{\sigma} \tag{4.37}$$

$$B = -|SH|\cos\theta + |HF|\ sin\theta + \ |ST|\,cos\,\theta - |TJ'|\,sin\,\overline{\sigma} \tag{4.38}$$

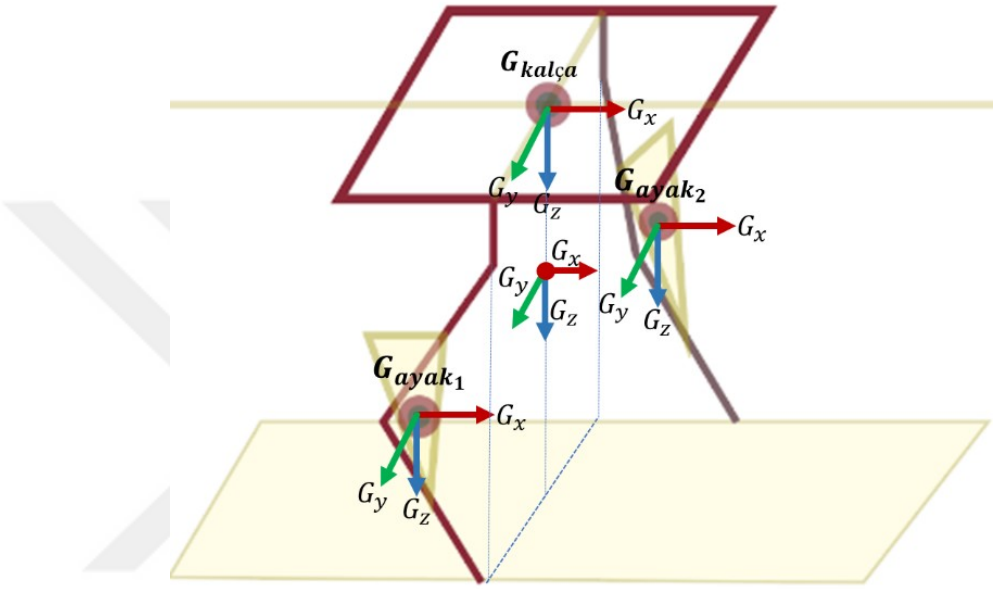
$$\begin{aligned} |QJ'|^2 &= (A - |QF|\,cos\,\gamma)^2 + (B + |QF|\,sin\,\gamma)^2 \\ &= A^2 + |QF|^2 + B^2 + 2|QF|(B\,sin\,\gamma - A\,cos\,\gamma) \end{aligned} \tag{4.39}$$

$$\frac{|QJ'|^2 - A^2 - |QF|^2 - B^2}{2|QF|} = (B\sin\gamma - A\cos\gamma) \tag{4.40}$$

$$\gamma = ain\ \frac{\dfrac{|QJ'|^2 - A^2 - |QF|^2 - B^2}{2|QF|}}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \operatorname{atan}\frac{A}{B} \tag{4.41}$$

4.2.5. Denge Konumunda Kalabilmek İçin

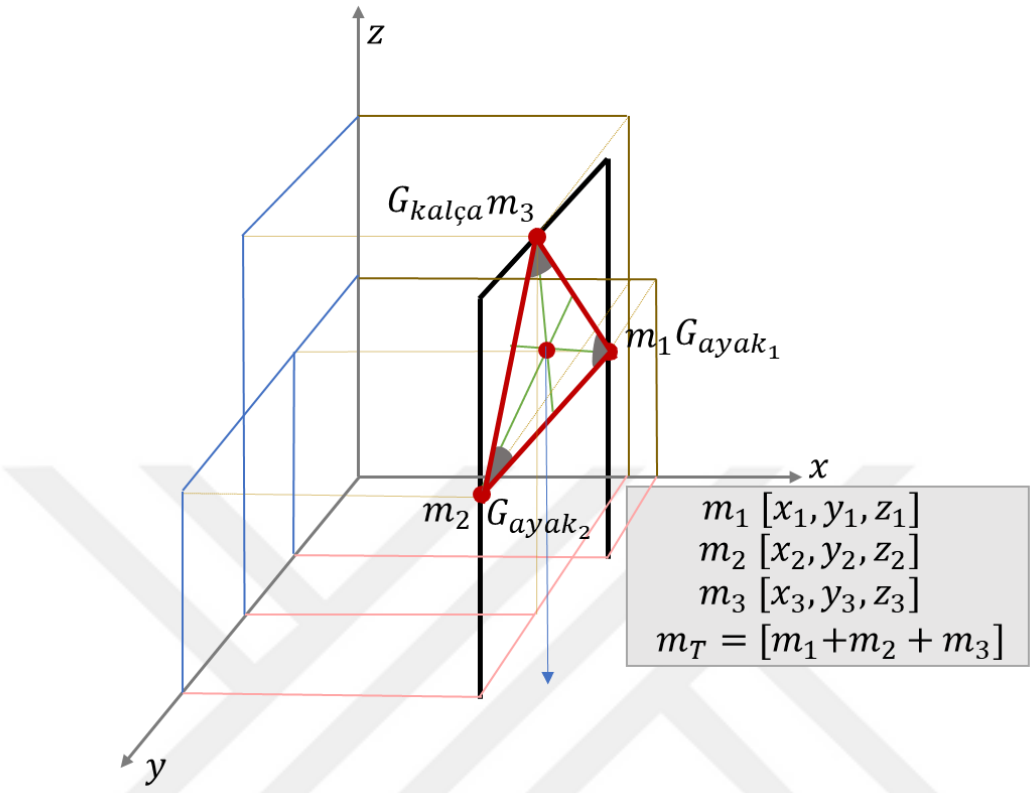
Sistemin dengede durabilmesi için ağırlık merkezi koordinatları hesaplanabilir. Ağırlık merkezi cisim üzerinde seçilecek noktalara etkiyen ağırlık kuvvetlerinin bileşkesi olarak bulunabilir. Her bir ayak 3 parça olacak şekilde iki bacak ve her bacak tekrar 3 parçadan meydana gelecek biçimde düşünülerek, ağırlık merkezi Şekil 4.14 'de gösterildiği gibi tanımlanabilir.



Şekil 4.14 Sistem Ağırlık Merkezi Bileşenleri

Sistem ağırlık merkezi taşıyıcı uzuvlar (ayak tabanı) içerisinde kalması gereklidir. Denge merkezi tayini için SCD. Ele alındığında, Üst bacak, Alt bacak, bağlantılar için gerekli elemanlar bütünün kütleleri oranında hesaplanmasıyla sistem ağırlık merkezi tayin edilebilir. Ancak sistem özelinde ağırlıkların büyük kısmını oluşturan motorlar ve taşıyıcı uzuv görevi gören bacak uzuvları ağırlık merkezleri baz almak yeterli olacaktır.

Şekil 4.15 ‘ de sistem oluşturan $G_{kalça}$, G_{ayak1} ve G_{ayak2} noktalarında bulunan ağırlıkların hesaplanmasıyla sistem ağırlık merkezi hesaplanabilecektir.



Şekil 4.15 Ağırlık Bileşenlerinin Uzayda Konumları

Ağırlık merkezi X bileşeni için Denklem 4.42 gibi ifade edilebilir.

$$G_{1x} = \frac{m_1}{m_T} G_{Ayak1X} + \frac{m_2}{m_T} G_{ayak2X} + \frac{m_3}{m_T} G_{KalçaX} \qquad (4.42)$$

Denklem 4.43 düzenlendiğinde Denklem 4.44 halini alır.

$$G_{1x} = \frac{m_1}{m_T}[-|S_1G_1| \sin\theta_1] + \frac{m_2}{m_T}[-|S_1S_{11}| \sin\theta_1 - |S_{11}\,S_{13}| \cos\theta_1] + \frac{m_3}{m_T}[-sin\,\theta_1\,|S_1T_1| + |T_1G_3| \sin\sigma_1] \qquad (4.43)$$

$$G_{2x} = \frac{m_1}{m_T}[-|S_2G_2| \sin\theta_2] + \frac{m_2}{m_T}[-|S_2S_{21}| \sin\theta_2 - |S_{21}\,S_{23}| \cos\theta_2] + \frac{m_3}{m_T}[-sin\,\theta_2\,|S_2T_2| + |T_2G_3| \sin\sigma_2] \qquad (4.44)$$

Ağırlık merkezi y bileşeni için Denklem 4.45 gibi ifade edilebilir.

$$G_{1y} = \frac{m_1}{m_T} G_{Ayak1Y} + \frac{m_2}{m_T} G_{ayak2Y} + \frac{m_3}{m_T} G_{KalçaY} \qquad (4.45)$$

Denklem 4.46 düzenlendiğinde Denklem 4.47 halini alır.

$$\begin{aligned} G_{1y} = \frac{m_1}{m_T}[\sin\omega_1 \,|MS_1| + |S_1G_1|\cos\theta_1] \\ + \frac{m_2}{m_T}[\sin\omega_1 \,|MS_1| + |S_1S_{11}|\cos\theta_1 - |S_1S_{13}| \\ + |S_1S_{13}|\ \sin\theta_1] + \frac{m_3}{m_T}[-\sin\theta_1 \,|S_1T_1| + |T_1G_3|\sin\sigma_1]\sin\omega \end{aligned} \qquad (4.46)$$

$$\begin{aligned} G_{2y} = \frac{m_1}{m_T}[\sin\omega_2 \,|MS_2| + |S_2G_2|\cos\theta_2] \\ + \frac{m_2}{m_T}[\sin\omega_2 \,|MS_2| + |S_2S_{21}|\cos\theta_2 - |S_2S_{23}| \\ + |S_2S_{23}|\ \sin\theta_2] \\ + \frac{m_3}{m_T}[-\sin\theta_2 \,|S_2T_2| + |T_2G_3|\sin\sigma_2]\sin\omega_2 \end{aligned} \qquad (4.47)$$

Ağırlık merkezi z bileşeni için Denklem 4.48 gibi ifade edilebilir.

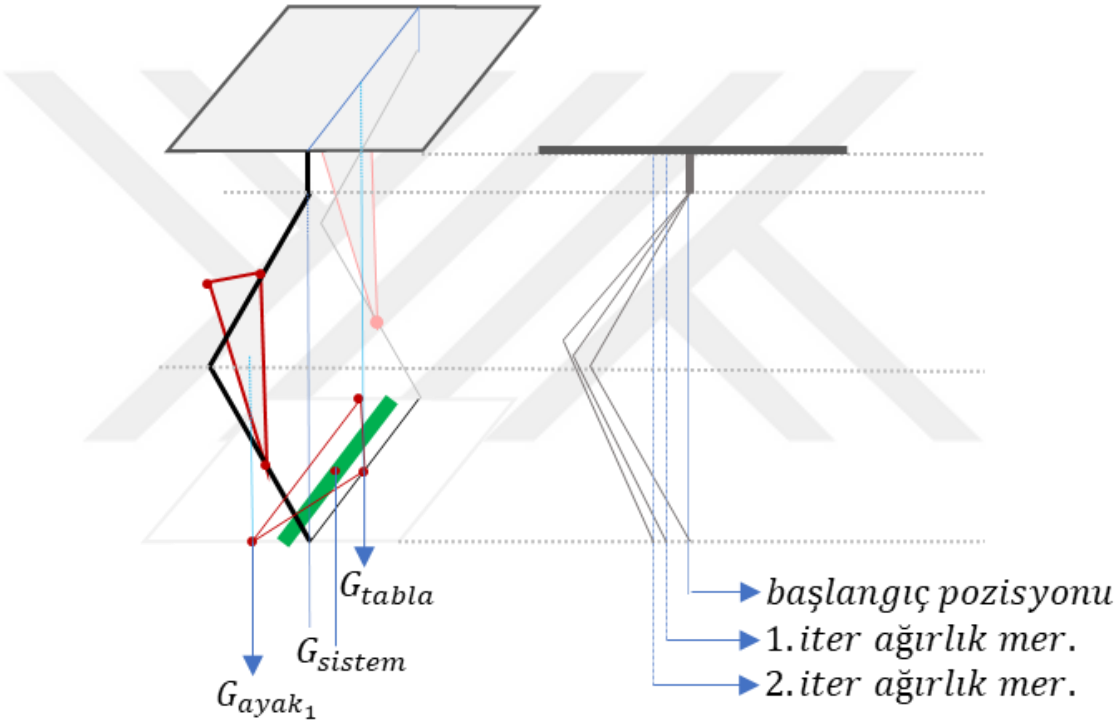
$$G_{2z} = \frac{m_1}{m_T} G_{Ayak1Z} + \frac{m_2}{m_T} G_{ayak2Z} + \frac{m_3}{m_T} G_{KalçaZ} \qquad (4.48)$$

Denklem 4.49 düzenlendiğinde Denklem 4.50 halini alır.

$$\begin{aligned} G_{1z} = \frac{m_1}{m_T}[-\ |MS_1| + |S_1G_1|\cos\theta_1]\cos\omega_1 \\ + \frac{m_2}{m_T}[-\ |MS_1| + |S_1S_{11}|\cos\theta_1 - |S_1S_{11}|\sin\theta_1] \\ + \frac{m_3}{m_T}[-|MS_1| + |S_1T_1|cos\ \theta_1\ + |T_1G_3|\sin\sigma_1]\cos\omega \end{aligned} \qquad (4.49)$$

$$\begin{aligned} G_{2z} = \frac{m_1}{m_T}[-\ |MS_2| + |S_2G_1|\cos\theta_2]\cos\omega_2 \\ + \frac{m_2}{m_T}[-\ |MS_2| + |S_2S_{21}|\cos\theta_2 - |S_2S_{21}|\sin\theta_2] \\ + \frac{m_3}{m_T}[-|MS_2| + |S_2T_2|cos\ \theta_2\ + |T_2G_3|\sin\sigma_2]\cos\omega_2 \end{aligned} \qquad (4.50)$$

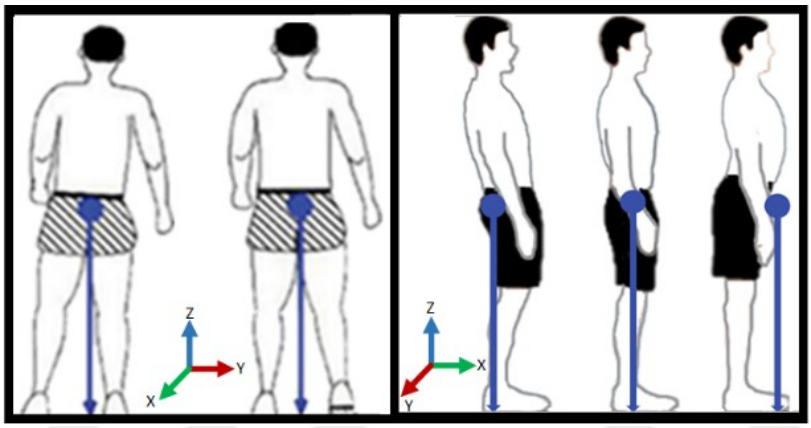
Ağırlık merkezi ayakların pozisyonlarına göre belirlenebilir. Ayakların ilk pozisyonları ayakların kalça eklemi ile yatayda aynı doğrultuda olduğu pozisyon olarak tanımlanmıştır. Ayaklar ilk pozisyonda iken hesaplanan ağırlık merkezi noktası bu doğrultuda olmaya bilir. G(x,y,z) noktasının x bileşenine ayaklar ulaştığı anda, ağırlık merkezi ayakların yeni pozisyonuna göre tekrar hesaplandığında ise, ayaklar ve ağırlık merkezi noktası arasında tekrar bir fark meydana gelebilir. Burada bir sayısal iterasyon işlemi uygulamak gerekir. Şekil 4.16 'de sistem denge durumuna ulaşana kadar ağırlık merkezinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.16 Sistem Denge Merkezi Noktası ve Ağırlık Merkezi Değişimi

4.2.5.1. Devrilmeye Karşı Moment Dengeleri

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. Sistemi oluşturan elemanların uzayda ki konumları ve sistemi oluşturan elemanlar kalça ekleminde bulunan tek bir ağırlık olarak modellendiğinde ise ayak konumları, ağırlık merkezi konumuna doğrudan etki etmektedir. Şekil 4.17.a 'da insan gövde yapısının, x ekseninde devrilmesi, Şekil 4.17.b 'de insan gövde yapısının, y ekseninde devrilmesi modellenmiştir.



a.) x ekseninde devrilme b) Y ekseninde devrilme

Şekil 4.17 Devrilmeye Karşı Momentum

Sistemi oluşturan elemanların sayısının arttırılması ile ağırlık merkezi konumu hassasiyeti arttırılmış olup, 2 eksende moment denklemleri ile de sistemi taşıyacak ayak uzvunun, uzayda ki konumu daha yüksek hassasiyet içerecektir. Teorik olarak iğne-uçlu ayak modeli mümkün olacaktır [38].

Sistemde ki eleman sayısının, fazla ve ağırlık merkezinden uzak olması durumunda ise sistem denge durumunda kalabilmek için genlikleri yüksek salınımlar yapmak zorunda kalacaktır. Genlikleri düşük ve salınımı az titreşimler ile denge pozisyonunu sürdürebilmek için ayak tabanın bir alan olarak seçilmesi denge korunumu açısından daha hızlı-kararlı bir durum olacaktır.

Ayaklara binen yükü hesaplayabilmek için, 2 eksende devrilme momentinin incelenmesi ve hesaplanarak tayin edilmesi gerekmektedir. X ekseninde toplam moment eşitliği yazıldığında; Denklem 4.51 de ifade edilir;

$$\sum M_{O_x} = -F_G G_y + \left[F_{U_{1,2}} OU_{1,2}\right] = 0 \qquad (4.51)$$

İki ayak üzerinde denge, iki durum barındırır. Ağırlık merkezi $G_y \neq 0$ durumunda sistem ağırlık merkezi iki ayak ortasında değildir. Bu durumda iki ayak eşit yükler taşımayacaklardır. Ağırlık merkezi konumunun ayaklar arasında $|OU_2| = |OU_1| + G_y$ kadar fark olması durumunda; Denklem 4.52 'de ifade edilen ayaklara etkiyen yük bu mesafe farkı oranlarınca paylaşılacaktır.

$$F_{U_1} = \frac{|OU_1| + G_y}{|OU_2| - G_y} F_{U_2} \qquad (4.52)$$

Ağırlık merkezi $G_y = 0$ durumunda sistem ağırlık merkezi iki ayak ortasındadır. Ağırlık merkezi konumunun $|OU_2| = |OU_1|$ ayaklar arasında olması durumunda; Denklem 4.53 'de gösterildiği gibi eşit olacaktır.

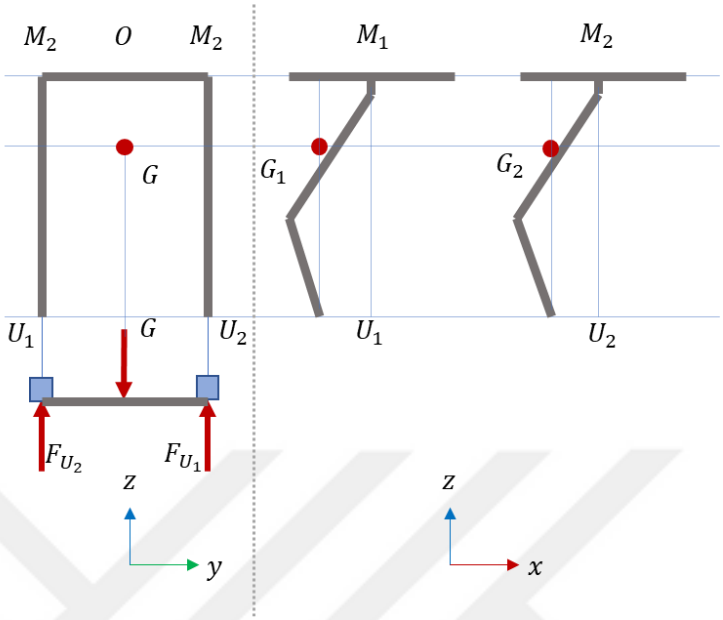
$$F_{U_1} = FU_2 = \frac{G}{2} \qquad (4.53)$$

Sistem ağırlığını iki ayak eşit biçimde taşıyacaklardır. En genel ifade ile X ekseninde devrilme moment eşitliği, Denklem 4.54 'da gösterildiği gibi olacaktır.

$$\sum M_{o_x} = -F_G - G_y + F_{U_2} OU_2 - F_{U_1} OU_1 = 0 \qquad (4.54)$$

X ekseninde devrilmeye karşı ise ağırlık merkezi izdüşümü ayak tabanı içerisinde kaldığı müddetçe sistem devrilmeyecektir ancak iğne uçlu ayak için bu konumlar; $FG_{U_{1,2}} = FU_{1,2} \rightarrow \left|U_{1,2}O\right| = G_x$ biçiminde olacaktır.

(ω=0) durumu iki ayak üzerinde denge durumunu ifade etmektedir. Şekil 4.18 iki ayak üzerinde denge durumunu ifade etmektedir.



Şekil 4.18 İki Ayak Üzerinde Denge Durumu

İki ayak üzerinde denge durumunda ayaklara etkiyecek kuvvetlerin hesaplanabilmesi için kalça orta noktasından (orijin) Y'ye göre moment alınırsa Denklem 4.55 elde edilir.

$$\sum M_{O_y} = 0 \rightarrow -G\,G_y + FU_2\,|OU_2| - FU_1\,|U_1O| = 0 \qquad (4.55)$$

Burada $|OU_2| = |U_1O|$ Olduğu bilindiğine göre ayaklara etkiyen kuvvet Denklem 4.56 biçiminde olacaktır.

$$\sum M_{O_y} = FU_2 = FU_1 = \frac{G}{2} \qquad (4.56)$$

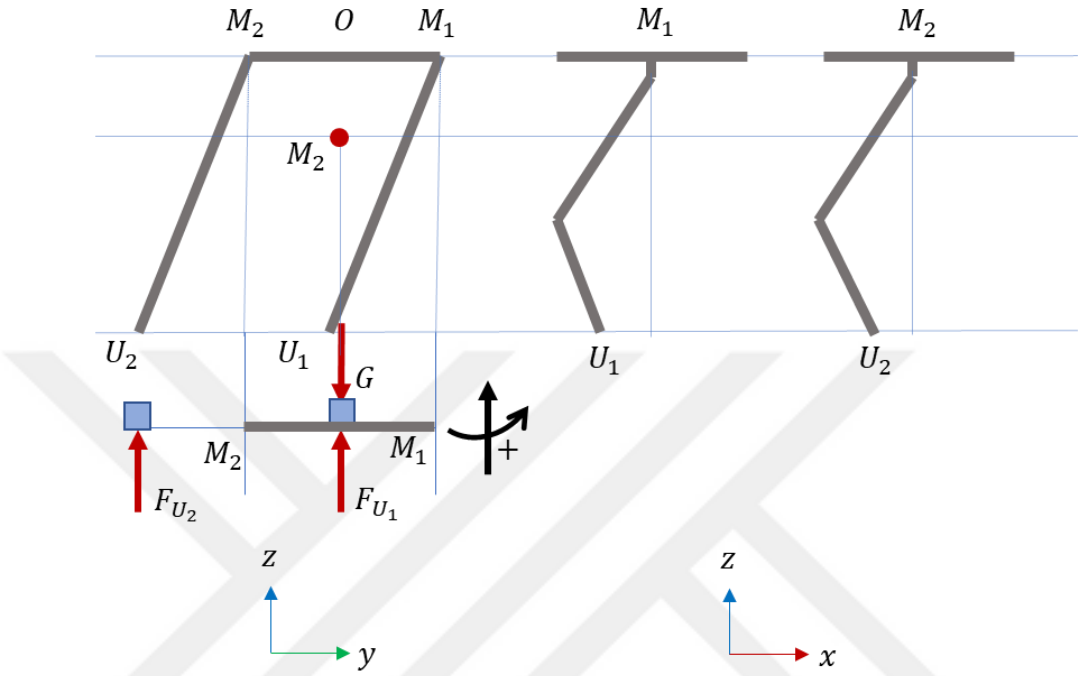
X ekseninde moment alınırsa; Denklem 4.57 elde edilir.

$$\sum M_{O_X} = 0 \rightarrow -FGU_1\,G_x + |U_1O|\,FU_1 = 0 \qquad (4.57)$$

$$FGU_1 = FU_1 \rightarrow |U_1O| = G_x \qquad (4.58)$$

Ayaklar X ekseni üzerinde; Gx noktasında bulunursa, X ekseninde devrilmeyecektir.

ω≠0 durumu; tek ayak üzerinde denge durumunu ya da bir ayağa diğer ayaktan daha fazla yük taşınması durumunu ifade etmektedir. Şekil 4.19 tek ayak üzerinde denge durumunu ifade etmektedir.



Şekil 4.19 Tek Ayak Üzerinde Denge Durumu

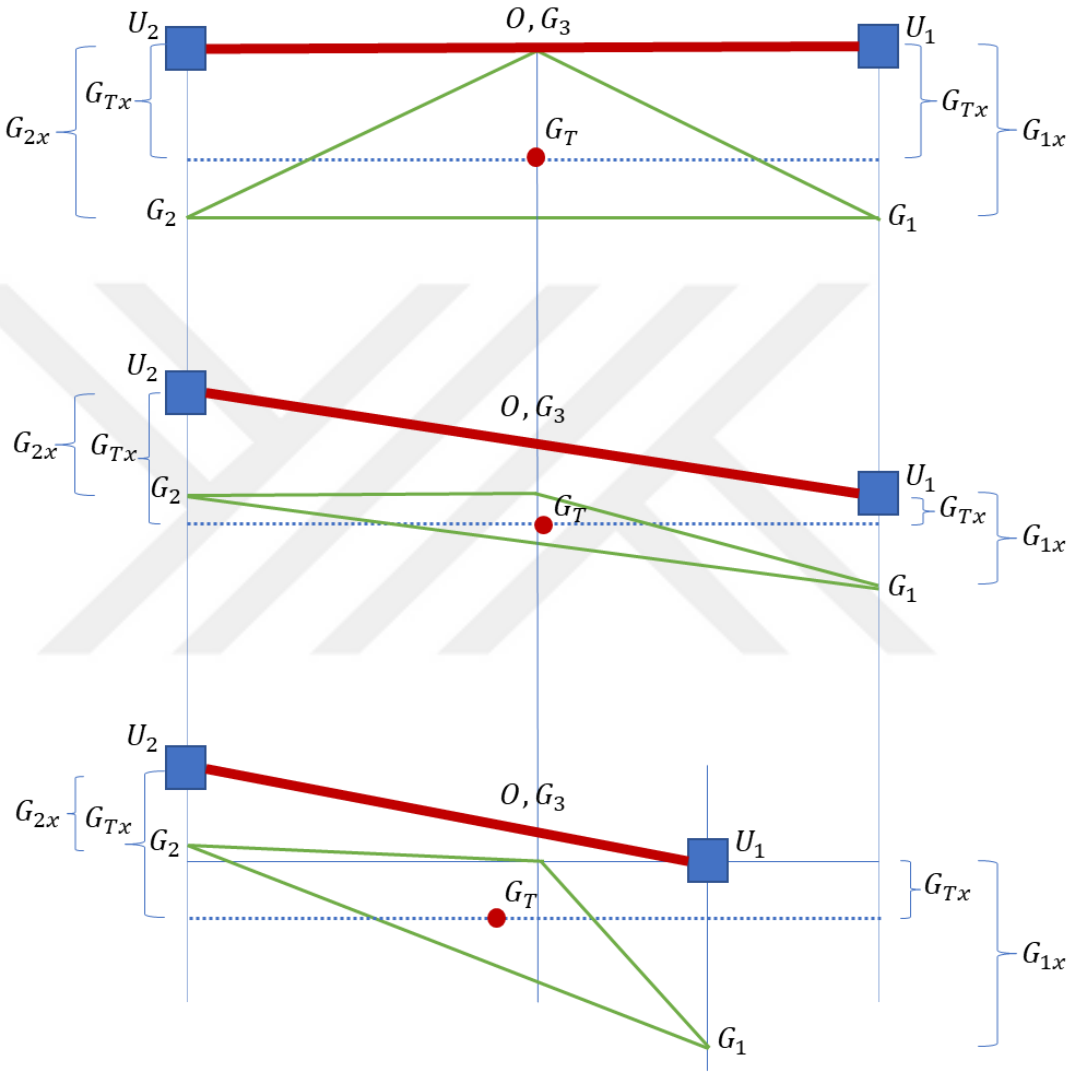
İki ayak üzerinde denge durumunda ayaklara etkiyecek kuvvetlerin hesaplanabilmesi için kalça orta noktasından (orijin) Y'ye göre moment alınırsa Denklem 4.59 elde edilir.

$$\sum M_{O_x} = 0 \rightarrow -G\,G_y + FU_2\,|OU_2| - FU_1\,|U_1O| = 0 \qquad (4.59)$$

$$\sum M_{O_x} = -F_G G_y + \left[F_{U_{1,2}} OU_{1,2}\right] = 0 \qquad (4.60)$$

İki ayak üzerinde denge, iki durum barındırır. Ağırlık merkezi $G_y \neq 0$ durumunda sistem ağırlık merkezi iki ayak ortasında değildir. Bu durumda iki ayak eşit yükler taşımayacaklardır. Ağırlık merkezi konumunun ayaklar arasında $|OU_2| = |OU_1| + G_y$ kadar fark olması durumunda; ayaklara etkiyen kuvvetler $F_{U_1} = \frac{|OU_1|+G_y}{|OU_2|-G_y}\,F_{U_2}$ biçiminde olacaktır.

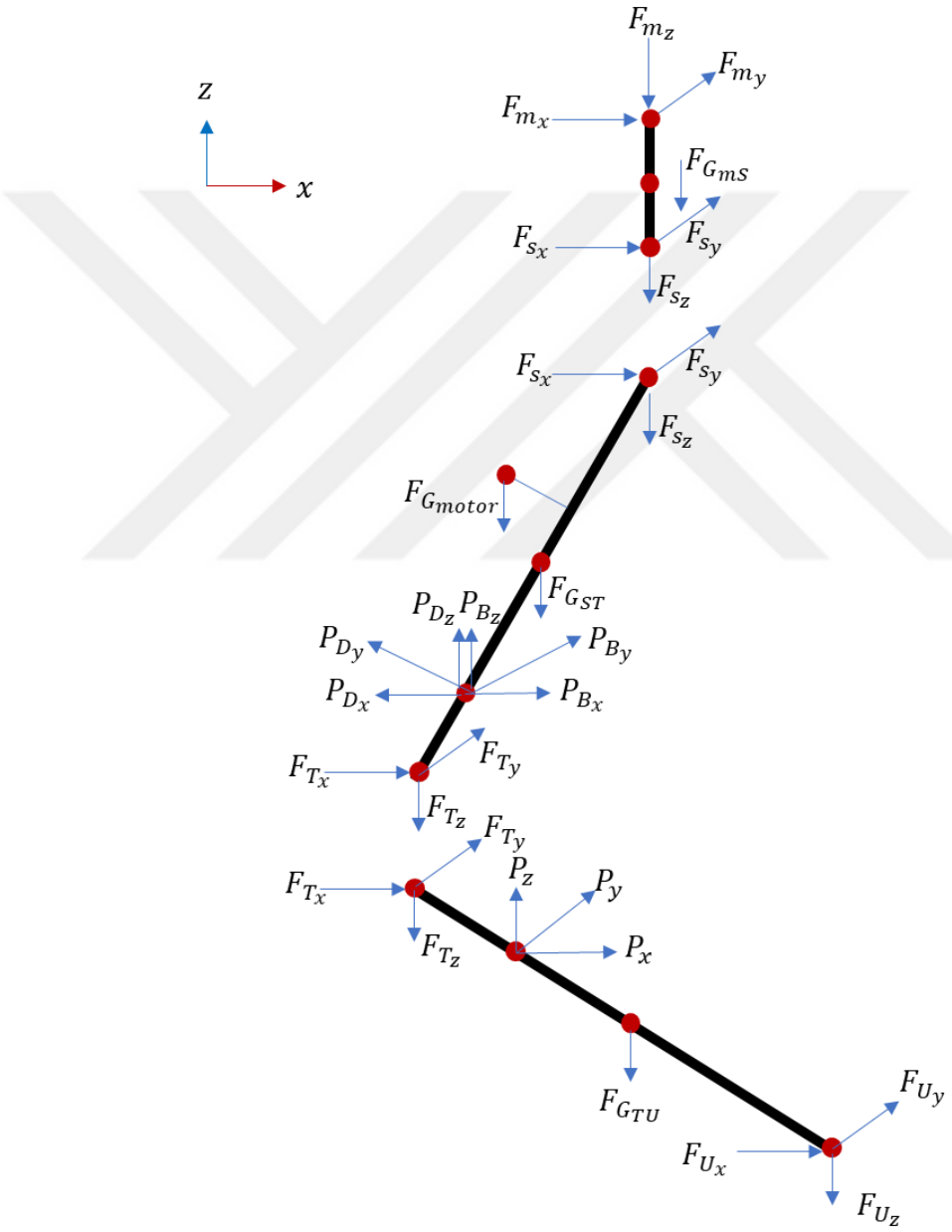
Sistem ağırlık merkezi ve ayaklar arasında Şekil 4.20 ‘deki gibi bir ilişki bulunmaktadır. Burada GT sistemin ağırlık merkezi noktasını; U1,U2 ayakların konumlarını, G1,G2,G3 sırasıyla sağ ayağın, sol ayağın ve kalça ekleminin ağırlıklarını ifade etmektedir.



Şekil 4.20 Sistem Denge Pozisyonu Değişimi

4.2.6. Kuvvet Analizleri

Sisteme etkiyen tüm kuvvetler, sistemin ağırlığından kaynaklanan kuvvetlerdir. Sistem ağırlık merkezi noktasında sisteme etkiyen bir düşey yerçekimi kuvveti olduğu duruma göre bu kuvvetler incelendiğinde; mafsallar tarafından iletilecek yükler Şekil 4.21 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Her Bir Ayağa Etkiyen Tüm Kuvvetler

Burada sisteme etki eden tüm kuvvetler ve momentler korunumu yasasınca ayrı ayrı sıfıra eşitlenerek çözülebilir.

$$+\uparrow \sum F_Z = 0 \rightarrow -F_{m_z} - F_{G_{ms}} - F_{s_z} = 0 \tag{4.61}$$

$$+\nearrow \sum F_y = 0 \rightarrow F_{m_y} + F_{S_y} = 0 = F_{m_y} = -F_{s_y} \tag{4.62}$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow F_{m_x} + F_{s_x} = 0 = F_{m_x} = -F_{s_x} \tag{4.63}$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{s_x} = 0 \rightarrow F_{m_y}(M_z - S_z) = 0 = F_{m_y} = 0 = -F_{s_y} \tag{4.64}$$

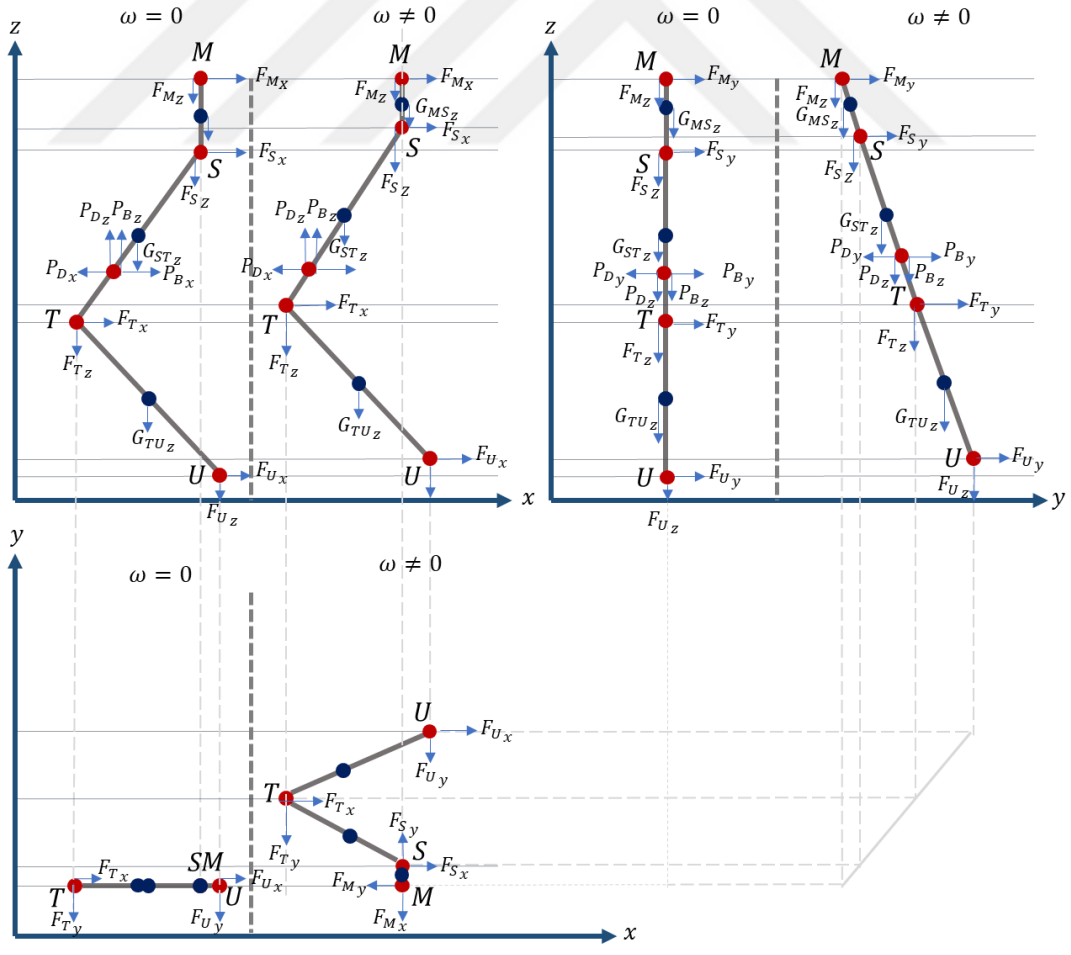
$$-\circlearrowleft \sum M_{s_y} = 0 \rightarrow F_{m_x}(M_x - S_x) = 0 = F_{m_x} = 0 = -F_{s_x} \tag{4.65}$$

Düzeltilir yerine yazılır.

$$+\uparrow \sum F_Z = 0 \rightarrow -F_{s_z} - F_{G_{motor}} - F_{G_{st}} + P_{D_z} + P_{B_z} - F_{T_z} = 0 \tag{4.66}$$

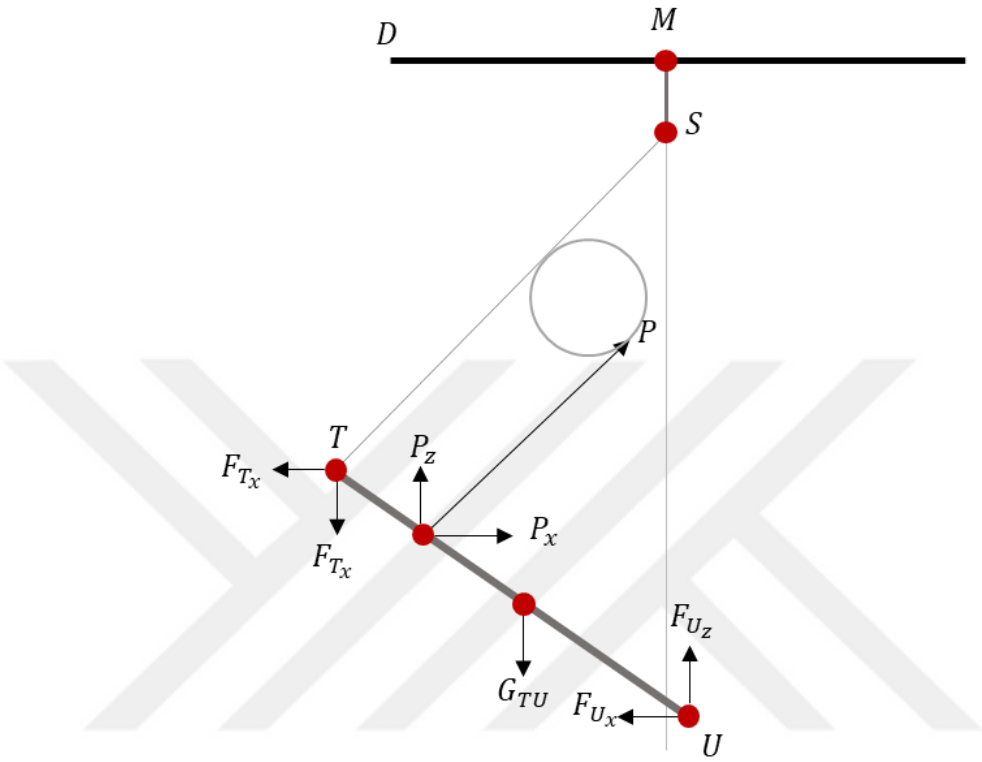
Burada; $P_{B_z} = -P_{D_z}$ ifadesi elde edilir.

Omega açısına bağlı olarak sistemin duruşu değişecektir.



Şekil 4.22 Ayaklara Etkiyen Kuvvetlerin Uzayda Vektör Bileşenleri

TU Uzvuna etkiyen tüm kuvvetler Şekil 4.23 ‘de gösterilmiştir. Sistem elamanlarının ağırlık kuvvetleri P noktasından bağlı kas model kirişleri ile taşınacak bir sistem tasarımı uygulanmıştır. Bu P noktasında ki kuvvetler ST uzvu üzerinde konumlandırılmış motorun gücünü belirleyecektir.



Şekil 4.23 TU Uzvunda ki Tüm Kuvvetler

Toplam kuvvetler sıfıra eşitlenerek, x ekseninde ki kuvvetler için Denklem 4.67, y eksenindeki kuvvetler için Denklem 4.68, z eksenindeki kuvvetler için Denklem 4.69 eşitlikleri yazılabilir.

$$+\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow F_{T_x} + F_{P_x} = 0 \qquad (4.67)$$

$$+\nearrow \sum F_y = 0 \qquad (4.68)$$

$$+\uparrow \sum F_Z = 0 \rightarrow -F_{T_z} + P_Z - G_{TU} + F_{U_Z} = 0 \qquad (4.69)$$

Bu kuvvetlerin oluşturduğu momentlerin bileşkesi sıfır, eşitlikleri ile Y’ ye göre T noktasında moment eşitliği Denklem 4.70 ile sağlanır.

$$-\circlearrowleft \sum M_{T_y} = 0 \rightarrow -P_X|PT|_Z + P_z|PT|_x + G_{TU}|GT|_x - F_{U_z}|UT|_x = 0 \qquad (4.70)$$

T noktasında y'ye göre moment korumu denklemi, Denklem 4.71' deki gibi ifade edilebilir.

$$-P_X|PT|_Z + P_z|PT|_x = F_{U_z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x \quad (4.71)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{T_y} = 0 \rightarrow +F_{T_x}|TJ|_z - F_{T_Z}|TJ|_x + G_{TU}|GJ|_x - U_z|UJ|_x = 0 \quad (4.72)$$

U noktasında y'ye göre moment korumu denklemi, Denklem 4.73 'deki gibi ifade edilebilir.

$$F_{T_x}|TJ|_Z - F_{T_z}|TJ|_x = F_{U_z}|UJ|_x - G_{TU}|GT|_x \quad (4.73)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{U_y} = 0 \rightarrow F_{T_x}|TU|_z - F_{T_Z}|TU|_x + P_x|JU|_Z - P_z|JU|_x - G_{TU}|GU|_X = 0 \quad (4.74)$$

G noktasında y'ye göre moment korumu denklemi, Denklem 4.8' deki gibi ifade edilebilir.

$$-\circlearrowleft \sum M_{G_y} = 0 \rightarrow F_{T_x}|TG|_z - F_{T_Z}|TG|_x + P_x|JG|_Z - P_z|JG|_x - F_{U_z}|UG|_x = 0 \quad (4.75)$$

Buradan P noktasında etkiyen kuvvet; Pz olarak bulunur.

$$P_z = \frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} - P_x\frac{|PT|_z}{|PT|_x} \quad (4.76)$$

Buradan T noktasında etkiyen kuvvet; Tz olarak bulunur.

$$F_{T_z} = \frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} + F_{T_x}\frac{|TJ|_z}{|TJ|_x} \quad (4.77)$$

TZ Denklem 4.85 denklemde yerine yazılır.

$$F_{T_x}|TU|_Z - \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} + F_{T_x}\frac{|TJ|_z}{|TJ|_x}\right)|TU|_x - P_x|JU|_Z - \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} - P_x\frac{|PT|_z}{|PT|_x}\right)|JU|_x = G_{TU}|GU|_x \quad (4.78)$$

TZ Denklem 4.86 denklemde yerine yazılır.

$$F_{T_x}|TG|_Z - \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} + F_{T_x}\frac{|TJ|_z}{|TJ|_x}\right)|TG|_x - P_x|JG|_Z - \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} - P_x\frac{|PT|_z}{|PT|_x}\right)|JG|_x = F_{U_z}|UG|_x \quad (4.79)$$

Eşitlik Düzenlenirse Denklem 4.91 elde edilir.

$$F_{T_x}|TU|_Z - \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x}\right)|TU|_x - F_{T_x}\frac{|TJ|_z - |TU|_x}{|TJ|_x} - P_x|JU|_Z - \frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x}|JU|_x + P_x\frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} = G_{TU}|GU|_x \quad (4.80)$$

$$G_{TU}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x}\right)|JU|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x}\right)|TU|_x = F_{T_x}\left(|TU|_z - \frac{|TJ|_z\,|TU|_x}{|TJ|_x}\right) + P_x\left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x}\right) \quad (4.81)$$

$$F_{U_z}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x}\right)|JG|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x}\right)|TG|_x = F_{T_x}\left(|TG|_z - \frac{|TJ|_z\,|TG|_x}{|TJ|_x}\right) + P_x\left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x}\right) \quad (4.82)$$

Burada tanımlar yapılabilir.

$$C = \left(G_{TU}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} \right) |JU|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} \right) |TU|_x \right)$$

$$D = \left(|TU|_z - \frac{|TJ|_z\,|TU|_x}{|TJ|_x} \right)$$

$$E = \left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} \right)$$

$$F = F_{U_z}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} \right) |JG|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} \right) |TG|_x$$

$$G = \left(|TG|_z - \frac{|TJ|_z\,|TG|_x}{|TJ|_x} \right)$$

$$H = \left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x} \right)$$

Denklem 4.92 H ile çarpılır,

$$\left(G_{TU}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} \right) |JU|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} \right) |TU|_x \right) \left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x} \right) = \left(|TU|_z - \frac{|TJ|_z\,|TU|_x}{|TJ|_x} \right) \left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x} \right) F_{T_x} - \left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} \right) \left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x} \right) P_x \quad (4.83)$$

Denklem 4.93 -E çarpılır.

$$\left(F_{U_z}|GU|_X + \left(\frac{F_{U_Z}|UT|_x - G_{TU}|GT|_x}{|PT|_x} \right) |JG|_x + \left(\frac{-F_{U_Z}|UJ|_x + G_{TU}|GJ|_x}{|TJ|_x} \right) |TG|_x \right) \left(- \left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} \right) \right) = - \left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} \right) \left(|TG|_z - \frac{|TJ|_z\,|TG|_x}{|TJ|_x} \right) F_{T_x} + \left(|JU|_Z - \frac{|PT|_z\,|JU|_x}{|PT|_x} \right) \left(|JG|_Z - \frac{|PT|_z\,|JG|_x}{|PT|_x} \right) P_x \quad (4.84)$$

Taraf tarafa toplanır. Buradan; Tx kuvveti.

$$F_{T_x} = \frac{HC - EF}{HD - EG} \quad (4.85)$$

$F_{Tx} = P_x + U_x$ olduğu bilindiğine göre

$$P_x(|JU|\cos\omega\sin\sigma + |JJ'|\cos\sigma\cos\omega) - F_{T_x}|TU|\cos\omega\sin\sigma = G_{TU}\frac{1}{2}|TU|\cos\omega\cos\sigma + F_{T_z}|TU|\cos\omega\cos\sigma \quad (4.86)$$

Burada

$$A = G_{TU}\frac{1}{2}|TU|\cos\omega\cos\sigma + F_{T_z}|TU|\cos\omega\cos\sigma$$

Tanımlanabilir.

$\cos\sigma$ ile çarpılır.

$$P_x(|TJ|\cos\omega\sin\sigma - |JJ'|\cos\omega\cos\sigma) + F_{U_x}|TU|\cos\omega\sin\sigma = G_{TU}\frac{1}{2}|TU|\cos\omega\cos\sigma + F_{U_z}|TU|\cos\omega\cos\sigma \quad (4.87)$$

Burada

$$B = G_{TU}\frac{1}{2}|TU|\cos\omega\cos\sigma + F_{U_z}|TU|\cos\omega\cos\sigma$$

Tanımlanabilir.

Denklem düzenlenir.

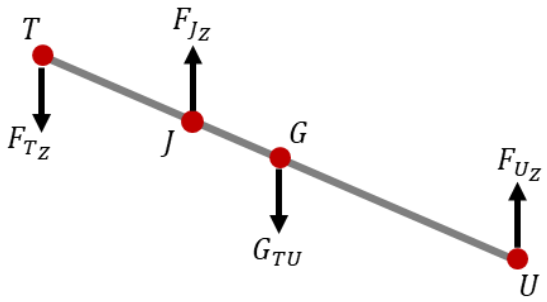
$$P_x(|JU|\cos\omega\sin\sigma + |JJ'|\cos\sigma\cos\omega - |TU|\cos\omega\sin\sigma + |TJ|\cos\omega\sin\sigma - |JJ'|\cos\omega\cos\sigma) = A + B \quad (4.88)$$

Buradan Ux kuvveti

$$F_{U_x} = \frac{B - P_x(|TJ|\cos\omega\sin\sigma - |JJ'|\cos\omega\cos\sigma)}{|TU|\cos\omega\sin\sigma} \quad (4.89)$$

Biçiminde elde edilir.

TU Uzvuna etkiyen kuvvetler



Şekil 4.24 TU Uzvuna Etkiyen Kuvvetler

Toplam moment denge uygulanır.

$$+\uparrow \sum F_Z = 0 \rightarrow -F_{T_z} + F_{J_z} - G_{TU} + F_{U_Z} = 0 \quad (4.90)$$

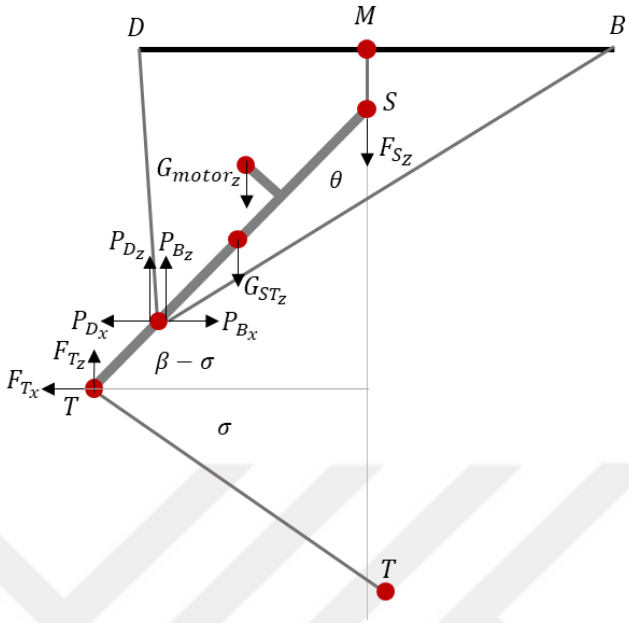
$$-\circlearrowleft \sum M_{T_y} = 0 \rightarrow -F_{J_z}|JT|_x + G_{TU}|GT|_x + F_{U_z}|UT|_x = 0 \quad (4.91)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{U_y} = 0 \rightarrow -F_{T_z}|TU|_x + F_{J_z}|JU|_x - G_{TU}|GU|_x = 0 \quad (4.92)$$

Bu eşitliklerden F_{T_Z} kuvveti Denklem 4.93 gibi elde edilir.

$$F_{T_z} = \frac{F_{J_z}|JU|_x - G_{TU}|GU|_x}{|TU|_x} \quad (4.93)$$

ST uzvuna etkiyen kuvvetler



Şekil 4.25 ST Uzvuna Etkiyen Tüm Kuvvetler

$$+\rightarrow \sum F_X = 0 \rightarrow F_{M_x} + F_{I_x} = 0 \rightarrow F_{M_x} = -F_{I_x} \quad (4.94)$$

$$+\nearrow \sum F_y = 0 \quad (4.95)$$

$$+\uparrow \sum F_Z = 0 \rightarrow -F_{M_z} + F_{I_z} - G_{ST} + F_{U_Z} = 0 \rightarrow F_{M_z} = F_{I_z} - G_{ST} + F_{U_z} \quad (4.96)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{M_y} = 0 \rightarrow F_{I_z}|IM|_x - F_{I_x}|IM|_z + G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x = 0 \rightarrow G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x = F_{I_x}|IM|_z - F_{I_z}|IM|x \quad (4.97)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{U_y} = 0 \rightarrow F_{M_x}|MU|_z + F_{M_z}|MU|_x + F_{I_x}|IU|_z + F_{I_z}|IU|_x - G_{ST}|GU|_x = 0 \quad (4.98)$$

$$-\circlearrowleft \sum M_{I_y} = 0 \rightarrow F_{M_z}|MI|_x + F_{M_x}|MI|_z - G_{ST}|GI|_x + F_{U_z}|UI|_x = 0 \quad (4.99)$$

$$\left(F_{I_z} - G_{ST} + F_{U_Z}\right)|MI|_x - F_{I_x}|MI|_z = G_{ST}|GI|_x - F_{U_z}|UI|_x \quad (4.100)$$

$$F_{I_x}|MI|_z - F_{I_z}|MI|_x = G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x \quad (4.101)$$

Denklem düzenlenir

$$F_{I_z}|MI|_x - F_{I_x}|MI|_z = G_{ST}|MI|_x - F_{U_z}|MI|_x + G_{ST}|GI|_x - F_{U_z}|UI|_x \quad (4.102)$$

$$-F_{I_x}|MU|_z + \left[F_{I_z} - G_{ST} + F_{U_z}\right]|MU|_x + F_{I_x}|IU|_z + F_{I_z}|IU|_x - G_{ST}|GU|_x = 0 \quad (4.103)$$

$$F_{I_x}(-|MU|_z + |IU|_z) + F_{I_z}(|MU|_x + |IU|_x) = G_{ST}|MU|_x - F_{U_z}|MU|_x + G_{ST}|GU|_x \quad (4.104)$$

$$F_{I_x}|IM|_z(|MU|_x + |IU|_x) - F_{I_z}|MI|_x(|MU|_x + |IU|_x) = (|MU|_x + |IU|_x)\, G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x \quad (4.105)$$

$$F_{I_x}(-|MU|_x + |IU|_z)|IM|_x + F_{I_z}(|MU|_x + |IU|_x)|IM|_x = |IM|_x\left(G_{ST}|MU|_x - F_{U_z}|MU|_x + G_{ST}|GU|_x\right) \quad (4.106)$$

İki eşitlik taraf tarafa toplandığında;

$$F_{I_x}\left(|IM|_z(|MU|_x + |IU|_x) + (|IM|_x|IU|_z - |MU|_z)\right) = (|MU|_x + |IU|_x)\left(G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x\right) + |IM|_x(G_{ST}|MU|_x - F_{U_z}|MU|_x + G_{ST}|GU|_x) \quad (4.107)$$

$$A = |IM|_z(|MU|_x + |IU|_x) \quad (4.108)$$

$$B = |IM|_x(|IM|_x|IU|_z - |MU|_z) \quad (4.109)$$

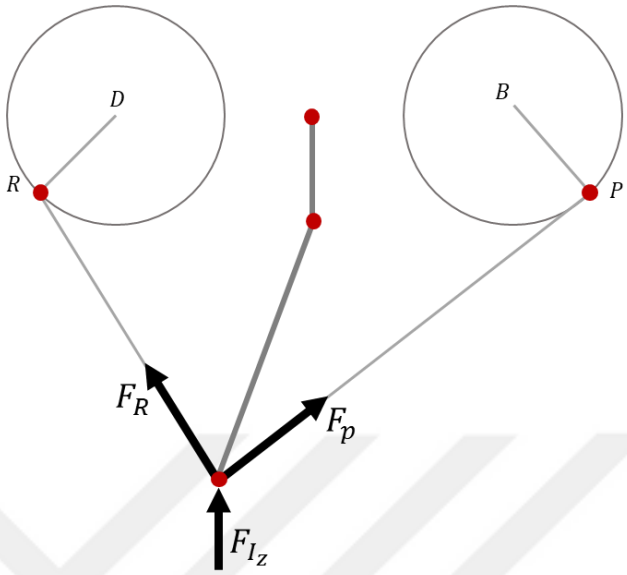
$$C = (|MU|_x + |IU|_x) \quad (4.110)$$

$$D = \left(G_{ST}|GM|_x + F_{U_z}|UM|_x\right) \quad (4.111)$$

$$E = |IM|_x(G_{ST}|MU|_x - F_{U_z}|MU|_x + G_{ST}|GU|_x) \quad (4.112)$$

$$F_{I_x} = \frac{CD + E}{A + B} \quad (4.113)$$

4.2.6.1. Eyleyicilere Etkiyen Kuvvetler

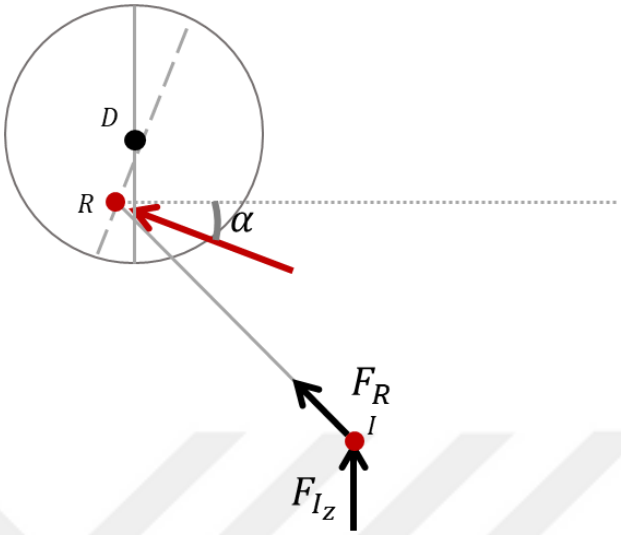


Şekil 4.26 I noktasından B ve D ye Etkiyen Kuvvetler

$$F_R = F_{I_z} \frac{|IR|}{2|IR|_z} \qquad (4.114)$$

$$F_P = F_{I_z} \frac{|IP|}{2|IP|_z} \qquad (4.115)$$

Diz motoruna binen yük



Şekil 4.27 Diz Motoruna Etkiyen Kuvvet

Diz radyal motorunda rotora etki eden kuvvetin dik bileşeni motora etkiyen efektif güç olacaktır.

Fr doğrultusu biliniyor.
Dr doğrultusu biliniyor.

Fr nin Dr ye dik olan bileşeninin şiddetinin hesaplanmasıyla bulunabilecektir.

4.2.7. Yürüme Hareketi Fonksiyonları

Kalça eklemi merkezinden geçtiği varsayılan anatomik eksenler referans aldığında, ayak tabanı yere temas noktaları üzerinden eksenlerden uzaklıklara a, b ve d mesafeleri tanımlanabilecektir, her bir ayak için uzayda ki noktaların konumları [x, y, z] olarak bilinmektedir.

Denge durumları Tablo 1 'de görüldüğü üzere; iki ayaklı bir sistemde 3 farklı şekildedir. İki ayak yere temas halinde ve ağırlık merkezi iki ayak arasında kalmak kaydıyla; sistemin yapabileceği 2 farklı hareket vardır ve bunlar sistemin sağa-sola sallan ve diz mafsallarının yardımıyla yukarı-aşağı çök-kalk şeklinde olacaktır. Sistemin çözülebilir denklemlerine bu işlemleri yaptırabilmek için sistemin hareket fonksiyonunu Denklem 4.138' da ki gibi tanımlayabiliriz.

$$F(hareket) = [a_{Sağ}, b_{sağ}, d_{sağ}, a_{sol},\ b_{sol}, d_{sol}] \qquad (4.116)$$

Başlangıç pozisyonu her iki ayak içinde ayrı ayrı 0 olduğu durumda F(hareket) = [0,0,0,0,0,0] ayakların kalça eklemi ile arasında Z mesafesi üzerinden b değerlerine pozitif sayı verilmesi ile F(hareket) = [0,b,0,0,b,0] ayaklar ile kalça eklemleri arasında ki yeni mesafe Z-b olacak şekilde bir hareket gerçekleşecektir.

Ayakların d değerlerine pozitif sayılar verilmesi ile F(hareket) = [0,0,d,0,0,d] kalça eklemi sağa-sola sallan hareketi yapacaktır. Eğer d mesafesi ağırlık merkezi y bileşenine eşit ise Denklem 4'de gösterildiği gibi sistem ağırlığını tek bir ayak taşıyacaktır.

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.

Sürekli bir biçimde modelleyebilmek için, trigonometrik bir fonksiyon olarak sinüs fonksiyonuna Denklem 4.139' deki gibi modelleyebiliriz. Bu fonksiyondaki değerleri adımlama için a, b, d değerleri için yerine yazıldığında, sinüs dalga formunun frekansı ve genliği tanımlanabilecektir.

$$f(x) = A\,sin(\beta x + \alpha) + B\,x + C \qquad (4.117)$$

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 doğrusal ya da sinüzoidal değerler ile hareketi gerçekleştirmesi gerekecektir.

Bu adımlama işlemlerini sürekli bir form olarak modelleyebilmek için, trigonometrik bir fonksiyon olarak sinüs fonksiyonuna 2. Dereceden bir eğri ile birlikte modellenebilecektir. Hareket kabiliyeti bakımından bu değerlerin sürekli değişimi yürüme hareketini bir fonksiyon olarak tanımlanabilir.

Yürüme Fonksiyonu: Yürümek işlemleri dizisi bir fonksiyon haline getirildiğinde, periyodik hareketin, istenilen bir anda konum değişkeni ölçülebilir. Bununla ilgili konum değişimlerini mekanik tasarıma uyarladığımızda, sistemdeki uzuvların belirli açı değerlerine hareketi için sürekli olarak bir trigonometrik fonksiyon önerilebilir.

İki ayak üzerinde yürüme eyleminin gerçekleşmesi için, ayak uzuvları zamana ve mekâna bağıl durumda tek ayak üzerinde denge şartını sağlamalıdır, iki ayaklı bir sistem için, yürüme hareket fonksiyonları elde edildiğinde bu sürekli fonksiyonu matematiksel olarak modelleyebilir ve konum değişimlerini inceleyebiliriz. Yürüme, belirli uzuvların periyodik olarak yer değişimi hareketinin tekrarlanmasının sonucudur. Belirli konum değişimlerinin belirli zaman aralıklarında tekrarlanması ile sistem dengesi bozulmadan cisim ağırlık merkezi ötelenmiş, dönmüş olabilmektedir.

4.2.8. Sistem Denetimi ve Algoritma

Tasarımı tamamlanmış olan insan gövdesini taklit edebilen, iki ayak üzerinde dengede hareket edebilen, robotik yürüme modeli, matematiksel hareket denklemleri, kinematik, konum, hız, ivme hesaplamaları eşitlikler biçimimde ifade edilebilmektedir. Eşitlikler sanal ortamda ilgili veri tabloları biçiminde oluşturulduğunda, denklemler herhangi bir bilgisayar dilinde programlanabilecek şekilde detaylı olarak hazırlanabilecektir. Mekanizma parametreleri ile denklemler çözülerek motor açı değerleri hesaplandığında, hesaplanan uzuv pozisyonlarında, ağırlık merkezi bulunarak ayak pozisyonları istenilen durumlarda, ağırlık merkezi izdüşümüne göre sayısal iterasyon sonucunda konumlandırılır.

Yürümek eyleminin modellenmiş uygulamasında denge durum şartları ile birlikte seçilecek mekanizma ölçülerinde, verilecek olan adım boyu, adım yüksekliği değerleri ile, sistemin yürüyeceği yol istenilen ölçüde programlanabilmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tablo 2' de verilen değerler için denge durum şartlarını uygulandığında ise ayakların konum değerleri Denklem 16 da gösterildiği gibi seri formda yazılacaktır. 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 Gy değerini sağlayacak "D" değerini sağlayarak denklemleri çözecektir.

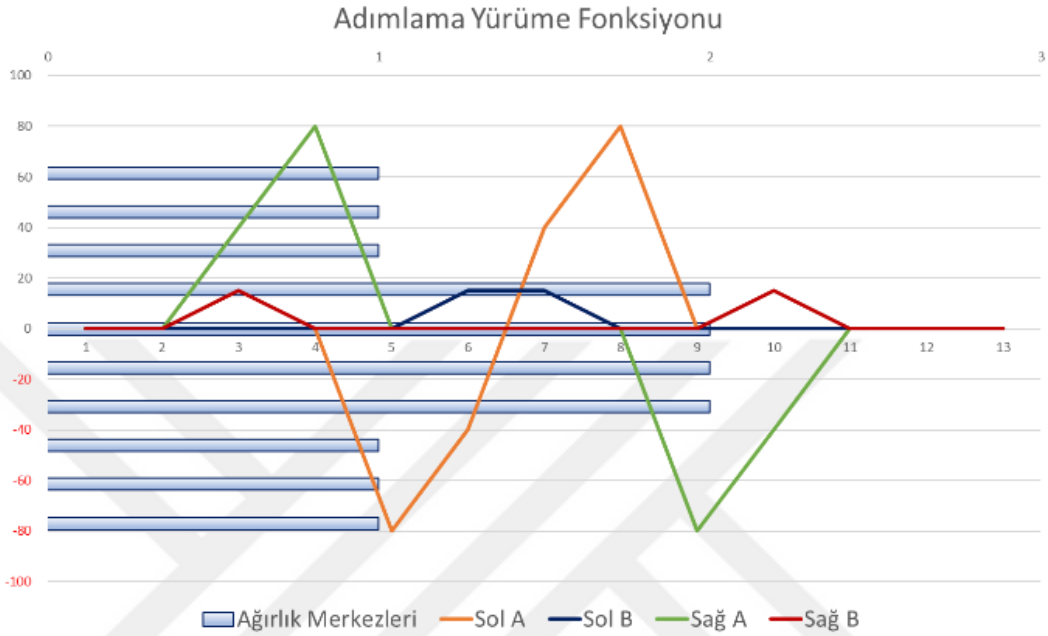
$F(Denge_{durum}) = [G_x \rightarrow f(a),\ G_y \rightarrow f(d)]$

Tablo 5.1 Örnek Adım Parametreleri

Sol Ayak			Sağ Ayak			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)	40	15	0	1
F(A)	0	F(D)	80	0	0	1
-80	0	0	F(A)	0	F(D)	2
-40	15	0	F(A)	0	F(D)	2
40	15	0	F(A)	0	F(D)	2
80	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

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. İncelenen hareketin yürüme grafiği Şekil 5.1 'daki gibi olacaktır.



Şekil 5.1 Adımlama Yürüme Fonksiyonu

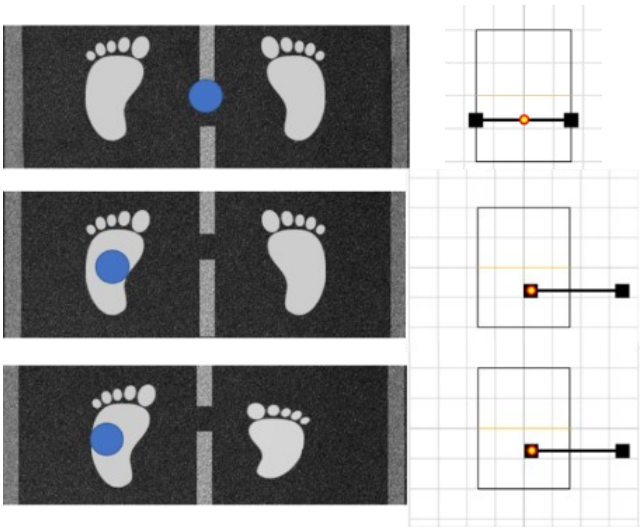
5.1.Tek Ayak Denge Duruna Geçiş ve Diğer Ayağın Yerden Kaldırılması

İki ayak yere temas halinde durumundan bir ayak üzerinde denge durumuna geçilmesiyle ağırlık merkezi izdüşümü taşıyıcı ayak uzvu 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 4.2 'de ifade edilen değerleri sisteme uygulayabiliriz.

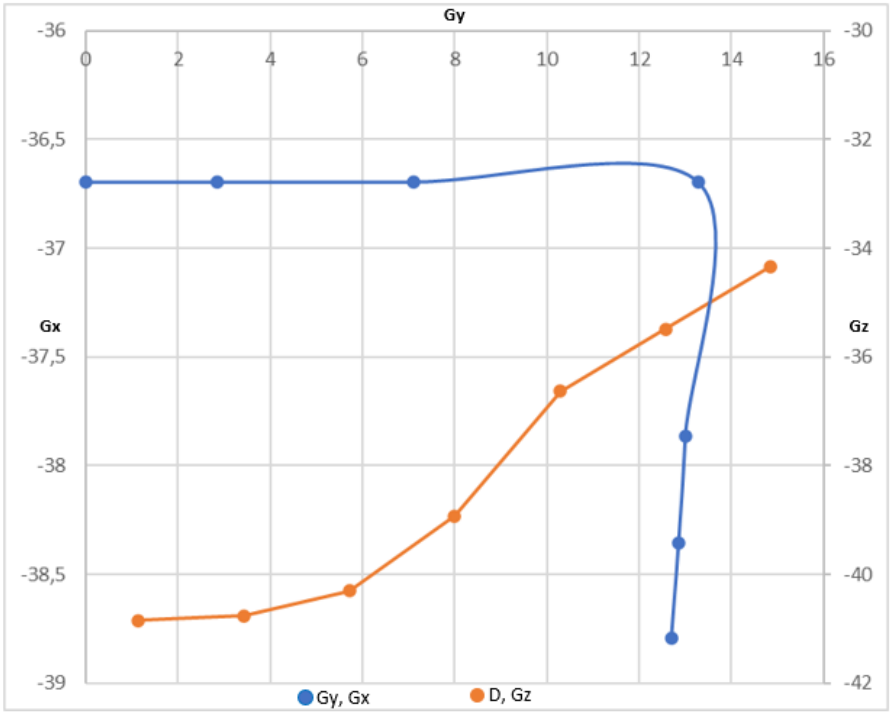
Tablo 4.2 Model 1 Parametreleri

Ağırlık Merkezi			Diğer Ayak Konum			Denge
Gx	Gy	Gz	A	B	D	Durum
-36,7	0,0	-40,9	-36,7	0,0	0,0	0
-36,7	2,8	-40,8	-36,7	0,0	*20*	-
-36,7	7,1	-40,3	-36,7	0,0	*50*	-
-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

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 4.2 'de gösterilen konum değerleri; Şekil 5.2 'da ki değerleri ifade etmektedir.



Şekil 5.2 Ağırlık Merkezinin Diğer Ayak Konumuna Göre Değişimi



Şekil 5.3 Ağırlık Merkezinin Diğer Ayak Konumu ile Değişimi

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 ekseni 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.

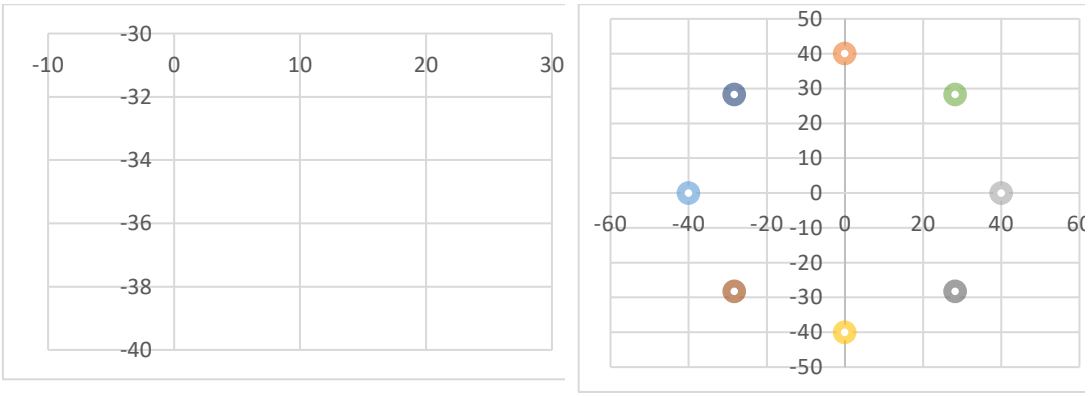
5.2. Tek Ayak Denge Durumunda, Ağırlık Merkezindeki Değişim

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

Tablo 5.3 Model 2 Parametreleri

AĞIRLIK MERKEZİ			DİĞER AYAK KONUM		
GX	GY	GZ	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

Z ekseninde B kadar yüksekte olan ayak, X ve Y eksenlerinde dairesel hareket ettirildiğinde. Konum değerleri Şekil 5.4 'deki gibi olacaktır. Şekil 18b de gösterilen diğer ayak dairesel hareketi süresince taşıyıcı ayak üzerinde ağırlık merkezi değişimi gereği meydana gelen hareket Şekil 5.4.a ' da ki gibidir.



a) Taşıyıcı Ayak Konum Değişimi b) Diğer Ayak Dairesel Hareketi Konumları

Şekil 5.4 Ağırlık Merkezi Konum Değişimi

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.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

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 çözülürken, 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 eklemini karşılamıştır. İki ayaklı bir model üzerinde taşıyıcı uzuvları sabit tutacak koordinatlar hesaplanmıştır. Bu ayak konumları sistem ağırlık merkezi hesaplanarak kontrol edilmiş, algoritma ile modellenmiş, taşıyıcı ayak, 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(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 kütlesine 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.

Şekil 13'te gösterilen adım grafiği ile yürüme hareketinin yapıtaşı olan adımlama işlemi için örnek ayak konum değerleri hesaplanmıştır, sonuçlar literatürde çalışılmış birçok yürüme hareketi tanımı ile benzeşmiş, hareketin denge odaklı yaklaşımıyla 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 çözülerek, Gx-Gy değişimi incelenmiştir. Ayak uzvunun Z ekseni üzerinde 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 kiriş 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, arttıkça 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.

7. KAYNAKLAR

[1] İmamoğlu, H., Bağdatlı, S. M., Mühendislik Problemlerinin Matlab Simulink Programı Desteğiyle Matematiksel Modellenmesi, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 2022, 1(33),1-15

[2] Arifoğlu, U., Kubat, C., Matlab ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa Yayınları, İstanbul, 2003, 702 s.

[3] Tatar, A.B., Dört Ayaklı Bir Robotun Dinamik Analizi ve Kontrolü, T.C. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elâzığ, 2015, 73s. (Yüksek Lisans Tezi).

[4] Yamaguchi. J., Soga E., Inoue S., Takanishi A., Development of a Bipedal Humanoid Robot Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking, International Conference on Robotics Automation, Mayıs, 1999, Detroit

[5] Vinh, N. X., Ha, L. Q., Lam, N. N., Quoc, L. H., Thanh, N. M., Experımental System For The Optımızatıon Of The Parallel Manıpulator Control, Journal of Computer Science and Cybernetics, 2015, 31(2), 83–95.

[6] Güleç, M. Ö., Ertuğrul, Ş., İnsansı Robot Kolu Tasarımı ve Yörünge Kontrolü. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül, 2014, Kocaeli

[7] Tez, T., İki Ayaklı Yürüyen Robot Dinamiğinin Deneysel ve Teorik Araştırılması, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 2017, 123s. (Doktora Tezi).

[8] Şen, M.A., Kalyancu, M., Dört Ayaklı Robotların Modellenmesi, Kontrolü ve Engebeli Yüzeylerde Yürüyüşü Üzerine Bir Literatür Araştırması, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2021, 9(1), 250-279.

[9] Özer, M., Stewart Platformu ile Üst Plaka Dengeleyici ve Açısal Teker Kontrollü Hibrit Araç Prototip Uygulaması, T.C. İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2019, 140s. (Yüksek Lisans Tezi)

[10] Çatalkaya, M., Akay, O.E., İnsan Adım Yörünge Eğrilerinin 2R Manipülatör Kullanarak Elde Edilmesi, Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences 2018, 21(3), 267-271.

[11] Bayhan, A.İ., Serebral Palside Yürüme Analizi, Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi, 2018, 17, 465–474

[12] Şeker, A., Talmaç, M.A., Sarıkaya, İ., Yürüme Biyomekaniği, Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi, 2014, 13, 314–324,

[13] Sunguray, C., Ürgün, S., Demirtaş, H., Güngör, S., Konum Kontrollü 6x6 Serbestlik Dereceli Stewart Platformu'nun Tasarımı Modellenmesi ve Simülasyonu, International Journal of Technological Sciences, 2014, 6(3), 44-61.

[14] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T., The Development of Honda Humanoid Robot, Internationdl ConlerenLe on Robotics Automation, 20-20 Mayıs, 1998, Leuven

[15] Vinh, N. X., Ha, L. Q., Lam, N. N., Quoc, L. H., Thanh, N. M., Experimental System for The Optimization of The Parallel Manipulator Control, Journal of Computer Science and Cybernetics, 2015, 31(2), 83–95.

[16] Seven, U., Taşkıran, E., Koca, Ö., Erbatur, K., Ters Sarkaç Modeli ve Salınan Bacak Telafisi ile Oluşturulan Yürüyen Robot Referans Yörüngeleri, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kasım, 2008, İstanbul

[17] Kim, J.Y., Park, W., Oh, J.H., Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2007, 48(4), 457-484.

[18] Huang, X., Liao, Q., Wei, S., Qiang, X., Huang, S., Forward Kinematics Of The 6-6 Stewart Platform With Planar Base And Platform Using Algebraic Elimination, International Conference on Automation and Logistics, 18-21 Ağustos, 2007, China

[19] Mendez, D. S., Gonza´lez, E. L., Montiel, M. A., Garcı´a, R. A., Adams-Matlab Co-Simulation For Kinematics, Dynamics, And Control Of The Stewart–Gough Platform, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 1(10), 1-10.

[20] Hibbeler, R.C., Mühendislik Mekaniği Statik, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2016, 592s.

[21] Beer, F.P., Johnston, R.J., Dewolf, J.T., Mazurek, D.F., Mechanics of Materials, Mc Graw Hill, New York, United States, 2015, 823s.

[22] Kaneko K., Harada K., Kanehiro F., Miyamori G., Akachi K., Humanoid Robot HRP-3, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 22-26 Ekim, 2008, Nice

[23] Kanda, T., Ishiguro, H., Ono, T., Imai, M., Nakatsu, R., Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot “Robovie”, International Conference on Robotics Automation, Mayıs,2002, Washington DC.

[24] Akdaş, D., Balıkesir Üniversitesi İkinci Nesil İnsansı Robotu “RoboTürk2”nin Ayak Tasarımı, Elektrik - Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 2016, Bursa

[25] Ünsal, A., Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 121s. (Yüksek Lisans Tezi)

[26] Park, W., Kim, J.Y., Lee, J., Oh, J.H., Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (Kaıst Humanoid Robot - 3: Hubo), International Conference on Humanoid Robots, 2005, Korea

[27] Gerçek A., İki Ayaklı Yürüyen Robot Tasarımı ve Prototip İmalatı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2012, 91s. (Yüksek Lisans Tezi).

[28] Demir H., Çalış M., Diz Artroplastisi Rehabilitasyonu, Erciyes Tıp Dergisi, 2002, 24(4), 194-201,

[29] 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, 2018, 5(7), 51-59.

[30] Avcı, S., Günümüz Sanat Eğitiminde Sanat Anatomisi Dersi, Yedi Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi. 2018, 20, 25-37.

[31] 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, 2015, 12(8), 1505-1524.

[32] 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 2022, 7(2), 274-282.

[33] Yüksel İ., Otomatik Kontrol, Dora Yayıncılık, Bursa, 2016, 250 s.

[34] Ogata, K., Modern Control Engineering, Pearson, New Jersey, 1990, 905s.

[35] Söylemez, E., Mekanizma Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2015, 467 s.

[36] Yılmaz S., İnsansı Robotlarda Yürüme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrolve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2013, 75s. (Yüksek Lisans Tezi).

[37] Şimşek D., Ertan H., Postural Kontrol ve Spor: Spor Branşlarına Yönelik Postural Sensör-Motor Stratejiler ve Postural Salınım, Spormetre Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi, 2011, 9(3), 81-90.

[38] Karakulak, O., Tek Bacaklı Zıplayan Bir Robotun Sıfır Moment Noktası ile Dengelenmesi, T.C. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 2015, 66s. (Yüksek Lisans Tezi).