



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması

A literature review on walking strategies of legged robots

Yazar(lar) (Author(s)): Veli BAKIRCIOĞLU¹, Mete KALYONCU²

ORCID¹: 0000-0002-1170-5327

ORCID²: 0000-0002-2214-7631

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bakırcioğlu V. ve Kalyoncu M., "Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 961-986, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.573673

Bacaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması

A Literature Review on Walking Strategies of Legged Robots

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ *Yürüyen robotlar alanında etki yaratan gelişmeler ve çalışmalar derlenmiştir. / The developments and studies is reviewed which made an impact in the field of walking robots.*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

The first linkage design used in early walking machines.	1850	Tchebyshev
The very first pioneering work on animal locomotion.	1872	Muybridge
The Plantigrade Machine – The world's first walking mechanism.	1878	Tchebyshev
The first important attempt to build a walking machine with independently controlled legs.	1940	Hutchinson
The first design concepts of walking machine that relates to the pantograph leg.	1960	Shigley
The Phony Pony – The first autonomous quadruped robot with simple digital logic controls.	1968	McGhee
The OSU Hexapod – The first walking hexapod robot with using digital computer.	1977	McGhee
The PANTOMECH mechanism and TITAN series quadruped robots that can climb stairs.	1980	Hirose
The first important attempt to build a walking robot based on the active balancing principle.	1980	Kato
The first experimental studies – Active balancing while hopping on one leg.	1980	Matsuoka
The first important attempt to build an active balancing robot walking in 3-D space.	1981	Miura
Introducing the 'virtual leg' concept for the first time.	1983	Sutherland
Introducing the 'three decomposition algorithm' – One-legged planar hopping machine.	1983	Raibert
The Humanoid Robot Project.	1986	Honda
The Adaptive Suspension Vehicle hexapod robot.	1987	McGhee
The first promising studies on active balancing quadruped based on virtual leg concept.	1989	Raibert
The first promising studies on dynamic walking quadruped robot based on central pattern generator.	2000	Kimura and Fukuoka
The BigDog Project – The quadruped robot that sets the current standards.	2005	Boston Dynamics
The HyQ Project – The closest quadruped robot to be used in real life.	2007	Semini
The StarETH robot – The first important study using series elastic actuators.	2013	Hutter
The ANYmal robot – The closest quadruped robot to be used in real life.	2016	Hutter

Şekil. Yürüyen robot literatüründeki kilometre taşları / **Figure.** Milestones in walking robot literature

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, yürüyen robotlar hakkında yürüme stratejilerine göre sınıflandırılmış ayrıntılı bir literatür taraması sunmaktır. / The aim of this study is to provide a detailed literature review about walking robots classified according to walking strategies.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bacaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar yürüme stratejisi olarak iki ana yaklaşım altında incelenmiştir; statik yürüme ve dinamik yürüme. / Studies on legged robots were reviewed under two main approaches as walking strategy; static walking and dynamic walking.

Özgünlük (Originality)

Yazarların tüm bilgisi dahilinde, dört ayaklı robotlar ve yürüme stratejileri hakkında kapsamlı bir derleme daha önce yapılmamıştır. / To the fullest knowledge of the authors, a comprehensive review of four-legged robots and walking strategies has not been made before.

Bulgular (Findings)

Diğer mobil robotlara üstünlüklerine rağmen, yürüyen robotlar üzerinde yapılan çalışmalar henüz deneysel ortamların ötesine geçememiştir. / Despite their superiority to other mobile robots, studies on walking robots have not yet gone beyond experimental environments.

Sonuç (Conclusion)

Yürüyen robotların tarihsel gelişim süreci ve dört ayaklı robotlar alanındaki son gelişmeler sunulmuştur. Bu çalışmanın, bacaklı robotlar alanındaki dört ayaklı yürüyüşün daha iyi anlaşılmasını ve aynı zamanda yürüyüş robotları ile ilgili gelecekteki çalışmalar için bir referans kaynağı olacağı öngörülmektedir. / The historical development process of walking robots and recent developments in the field of four-legged robots are presented. It is anticipated that this study will provide a better understanding of four-legged gait in the field of legged robots and also a reference for future studies on walking robots.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Bacaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması

Derleme Makalesi / Review Article

Veli BAKIRCIOĞLU^{1*}, Mete KALYONCU²

¹Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.06.2019 ; Kabul/Accepted : 23.09.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, ayaklı hareket üzerine yapılan geçmiş dönem araştırmalara; özellikle, ayaklı robotlar literatürünün önemli kilometre taşlarına değinilmiştir. Geçmiş dönem araştırmalardan, öncelikle canlıların yürüyüşü ve bunu taklit edebilen makineler üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Daha sonra, çalışmanın konusu olan ayaklı robotların tarihçesi ele alınmıştır. Ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, yürüyüş stratejisi olarak iki temel yaklaşım söz konusudur; statik yürüyüş ve dinamik yürüyüş. Bu sebepten dolayı ayaklı robotlar tarihçesi, Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar ve Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar olmak üzere iki temel başlık altında kronolojik sırayla anlatılmıştır. Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında, engebeli yüzeylerde hareket ve engelleri aşma gibi arazi adaptasyonunun daha karmaşık problemleriyle başa çıkmak için çok bacaklı sistemlerin kontrol edilmesine yönelik tekniklerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar; Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında ise, koşma ve zıplama gibi oldukça gelişmiş hareket kabiliyetlerine sahip ayaklı sistemler geliştirebilmek için dinamik kontrol kavramlarının ve tekniklerinin iletilmesi üzerine yapılan araştırmalar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ayaklı robotlar, dört bacaklı yürüyüş, statik yürüyen robotlar, dinamik yürüyen robotlar.

A Literature Review on Walking Strategies of Legged Robots

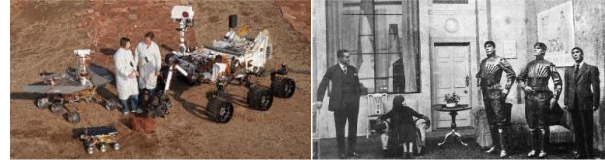
ABSTRACT

In this study, previous studies on legged motion; in particular, important milestones of the legged robots' literature were referred. From the past period research, primarily, studies on the walking of the living beings and the machines that can mimic it were mentioned. Subsequently, the history of legged robots that is the subject of the study was addressed. In the studies on the legged robots, two basic approaches as the walking strategy were concerned; static gait and dynamic gait. Due to this reason, the history of the legged robots was reported in chronological order under two main topics as Static Walking Legged Robots and Dynamic Walking Legged Robots. In the Static Walking Legged Robots topic, researches on the development of techniques for controlling of the multi-legged systems to cope with more complex problems of the land adaptation such as locomotion on rough surfaces and overcoming obstacles; as for in the Dynamic Walking Legged Robots topic, researches on the improvement of dynamic control concepts and techniques to develop legged systems with highly sophisticated mobility capabilities such as running and jumping are presented.

Keywords: Legged robots, quadrupedal locomotion, static walking robots, dynamic walking robots.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robot teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak destek birim olarak robotik sistemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır ve artık günlük işlerde bile, robotlar, kendilerine yer bulmaya başlamışlardır. Günümüzde robotlar, boya, kaynak, montaj, lehimleme, taşıma ve iletme gibi üretim işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, nükleer atıkların işlenmesi, uzay araştırmaları gibi tehlikeli ve insan gücünü aşan işlerde de kullanılmaktadır. Örneğin NASA tarafından geliştirilen Curiosity robotu, Mars yüzeyine inerek, insanoğlu için neredeyse imkânsız bir görevi yapabilmektedir (Şekil 1a).



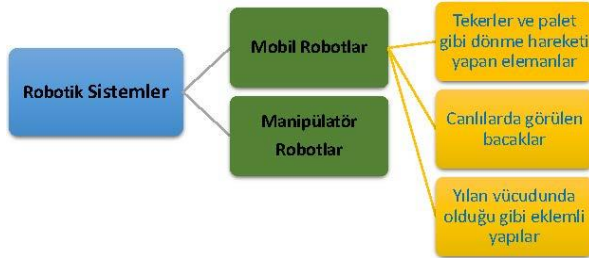
(a) NASA tarafından Mars'a gönderilmiş üç robot. (Three robots that sent to Mars by NASA.) (b) "Rossum's Universal Robots" oyunundan bir sahne. (A scene from "Rossum's Universal Robots".)

Şekil 1. Robot teknolojisinin günümüzde geldiği nokta ve tarihte robot kelimesinin ilk kullanıldığı yer. (The point where robot technology is reached today and where the word robot was first used in history.)

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : vbakircioglu@aksaray.edu.tr

Robot kelimesi ilk olarak, Karel Čapek isimli oyun yazarının, Şekil 1b'de bir sahnesi gösterilen, 1920'de yazdığı "Rossum's Universal Robots" isimli oyunda

karşımıza çıkmaktadır [1]. Amerika Robotik Enstitüsü (RIA) tarafından yapılan tanıma göre bir robot, çeşitli görevlerin yerine getirilmesi için değişken ve programlanmış hareketlerle malzemeleri, parçaları, araçları veya özel cihazları taşımak üzere tasarlanmış yeniden programlanabilir çok işlevli bir manipülatördür. Buna ek olarak, herhangi bir robotik sistem geliştirebilmek için, robotik alanının, farklı tasarım alanlarının (mekanik, elektrik ve yazılım vd.) başarılı bir şekilde çok karmaşık bir sistemde toplandığını ve disiplinler arası bir alanı temsil ettiğini bilmemiz gerekir. Uygulama açısından bakıldığında, robot yapılandırılmasını sadece mekanik gereklilikler değil, elektrik ve yazılım gereklilikleri de büyük ölçüde etkiler ve hatta bazen daha baskın olur [2].

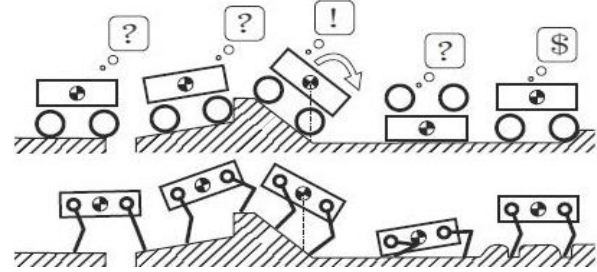


Şekil 2. Mobil robotların temel hareket yapılandırma stratejileri. (Basic motion configuration strategies of mobile robots.)

Robotik sistemleri kendi altında, sabit bir çalışma uzayına sahip olan Manipülör Robotlar ve taşınabilir bir çalışma uzayına sahip olan Mobil Robotlar diye iki ana alanda sınıflandırılabiliriz. Bir mobil robot tasarlanırken, hareket stratejisi problemi için robotun tamamlaması istenen görevlerin gerektirdikleri, çalışma ortamının ve çevrenin kısıtlamaları, kullanılan eyleyicilerin kısıtları ile güç kaynağı ve enerji ihtiyacı gibi konulara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda düşünüldüğünde, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterildiği gibi, mobil robotların hareketini sağlayacak üç temel yapılandırma şekli vardır. Her bir hareket yapılandırması belirli bir uygulama alanına yönelik kendine özgü karakteristikler göstermektedir.

Tekerlekli robotlar çok hızlı hareket edebilirler, fakat düz bir arazi üzerinde hareket gerekliliği vardır. Paletli robotlar daha engebeli arazilerde hareket edebilirler ancak tekerlekli robotlara göre daha yavaştır. Ayaklı robotlar, daha fazla hareketlilik ve esneklik gösterdiğinden, yüksek arazi adaptasyonuna sahip olduklarından ve çevreye daha az hasar verdiklerinden

dolayı tekerlekli ve paletli robotlara nazaran zorlu arazilerde daha üstündür (Şekil 4). Bu üstünlük ve yeryüzünün yaklaşık %80'inin geleneksel tekerlekli taşıtlar ile erişilemez olduğu [3] gerçeği göz önüne alındığında, ayaklı robotlar, mobil robotlar alanında daha çok ön plana çıkmaktadır.



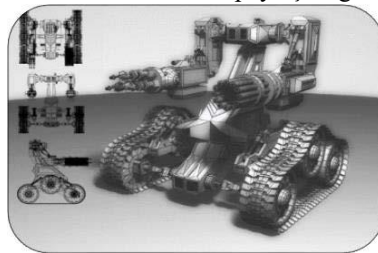
Şekil 4. Tekerlekli ve ayaklı robotların zorlu arazi koşullarındaki performanslarını karşılaştıran piktogram (Remy'nin [4] çalışmasından.) (A pictogram comparing the performances of wheeled and legged robots in rough terrain (from the study of Remy [4].))

Bu yüzden, ayaklı robotlar, literatürde yeni olmamasına rağmen günümüzde halen birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Ayaklı robotlar literatüründeki çalışmaların hemen ayak sayısına göre iki, dört ve altı ayaklı olmak üzere çiftli simetrikler şeklinde yapılmıştır. Bacak sayılarının bu şekilde çiftli simetrikler şeklinde olmasının ana sebebi doğadaki canlılarda görülen simetridir ve ayaklı robotların esin kaynağının yine doğa olmasıdır. Ayaklı sistemlerin tasarımında sistem yapılandırılması doğrudan bacak sayısı ile alakalıdır.

Teknolojinin gelişimine paralel, algılayıcılar ve eyleyiciler gibi mobil robotların önemli bileşenlerindeki teknolojik gelişmeler bu ilgiyi güncel tutmaktadır. Buna en iyi örnek olarak Honda R&D Co. Ltd. firmasına ait Humanoid Robot projesi gösterilebilir (Şekil 5). 1986 yılında başlayan bu projenin geliştirilmesine günümüzde halen devam edilmektedir. Birçok insan benzeri hareketi taklit edebilen ve proje kapsamında geliştirilen robotların son sürümü olan ASIMO [5-7] ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Üstelik, Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) desteği ile Boston Dynamics firması tarafından tamamlanan ve bugün dört bacaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog projesi [8], bu ilginin ticari firmalar ve devlet kuruluşları tarafından da paylaşıldığını göstermektedir (Şekil 6a). Öyle ki, daha



(a) Tekerlekli Mobil Robot (Wheeled Mobile Robot)



(b) Paletli Mobil Robot (Tracked Mobile Robot)



(c) Ayaklı Mobil Robot (Legged Mobile Robot)

Şekil 3. Mobil robotların temel hareket yapılandırmalarına örnekler. (Examples of basic motion configurations of mobile robots.)

sonra Google® firmasının, ayaklı robotlar üzerine birçok araştırması olan Boston Dynamics firmasını satın alarak, robotik alanında büyük bir etki yaratan, BigDog robotunun halefi Spot (Şekil 6b) ve antropomorfik bir robot olan Atlas (Şekil 6c) gibi yeni ayaklı tasarımlar geliştirmesi, ayaklı robotlar üzerine olan bu ilginin sürdürülmeye devam edeceğini ve hatta artacağını göstermiştir.



Şekil 5. Honda R&D Co. Ltd. firması tarafından iki ayaklı robotlar üzerine yürütülen proje kapsamında 1986 yılından günümüze kadar geliştirilen robotlar. (Robots developed from 1986 to present under the project carried out by Honda R&D Co. Ltd. company on biped robots.)

Literatürde, son yirmi yılda ASIMO ve BigDog gibi başarılı robotik uygulamaların yarattığı etki ile, ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı giderek yükselen bir ivme ile artmıştır. Ayaklı robotlar alanında 1990'lı yıllardan günümüze 200 adetten fazla robot geliştirilmiştir ve bu robotların yaklaşık %20'sini dört bacaklı robotlar oluşturmaktadır [9]. Bu çalışmada, kaynak araştırması sırasında dört bacaklı robotlar ile ilgili çalışmalara odaklanılmıştır, ancak sadece bununla sınırlı kalmayıp iki ayaklı ve altı ayaklı robotlar gibi farklı ayak sayılarına sahip robotlar üzerine yapılan, ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahip olduğu düşünülen çalışmalara da yer verilmiştir. Ayaklı robotlar literatüründeki çalışmaların hemen hemen hepsi ayak sayısına göre iki, dört ve altı ayaklı olmak üzere çiftli simetrikler şeklinde yapılmıştır. Bacak sayılarının bu şekilde çiftli simetrikler şeklinde olmasının ana sebebi doğadaki canlılarda görülen simetridir ve ayaklı robotların esin kaynağının yine doğa olmasıdır.

Bunun yanında, statik ve dinamik yürüyüş çeşitlerinin her ikisinin de uygulanabileceği ayaklı bir robot tasarımı için en uygun yapılandırma dört ayaklı sistemlerdir. Bunun başlıca sebebi, statik yürüyüş tipi için gerekli en az bacak sayısının dört olmasıdır ve bu sayı aynı zamanda dinamik yürüyüşe de elverişlidir. Yerdeki ayak sayısı bakımından altı ayaklı robotlara nazaran daha az avantajlı olmasına rağmen oluşan denge poligonu statik yürüyüş için yeterlidir. Bu yüzden dört ayaklı sistemlerde, dinamik yürüyüş sırasında ayaklarda aktif dengeleme için fazladan kontrol elemanlarına gerek



(a) BigDog (b) Spot (c) Atlas

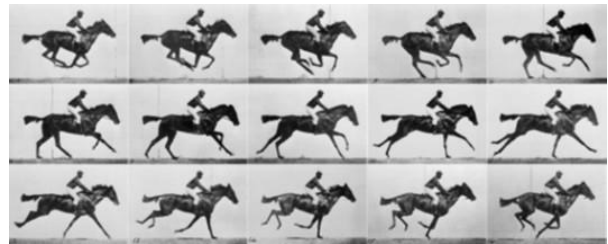
Şekil 6. Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen ayaklı robotlar. (Legged robots developed by Boston Dynamics.)

yoktur. İki ve altı ayaklı sistemlere nazaran daha sade bir sistem yapılandırması ve kontrolcü mimarisi ile farklı yürüyüş tiplerinin uygulanabildiği dört ayaklı sistemler bacak sayısı bakımından optimum bir seçimdir. Tüm bu olumlu yönler göz önüne alındığında, yüksek hareketlilik bağlamında, doğada bulunan en gelişmiş hayvanların dört ayaklı olarak tasarlanmış olması da tesadüf değildir.

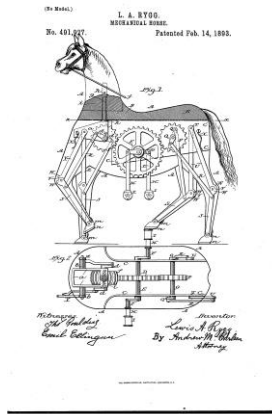
Ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, yürüyüş stratejisi olarak iki temel yaklaşım söz konusudur; statik yürüyüş ve dinamik yürüyüş. Bu sebepten dolayı ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar, Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar ve Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar olmak üzere iki temel başlık altında kronolojik sırayla anlatılmıştır. Ancak bu çalışmalara geçmeden önce yazının devamında, ayaklı robotların gelişim sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için, yürüyüş üzerine yapılan geçmiş dönem çalışmalar ve bu çalışmaların ayaklı robotların gelişimi üzerine etkileri anlatılmıştır.

2. YÜRÜYEN MAKİNELER TARİHÇESİ (WALKING MACHINES HISTORY)

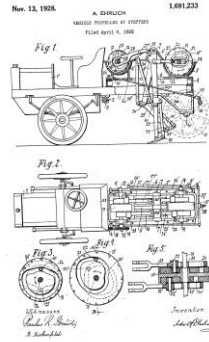
Literatürde canlıların yürüyüşü üzerine yapılan çalışmaların ilki ve belki de en önemlisi, 19. yüzyılda İngiliz fotoğrafçı Muybridge'in insan da dahil olmak üzere kırkın üzerinde canlının yürüme, koşma, zıplama gibi hareketleri yaparken fotoğraflarını çektiği çalışmalarıdır [10–12]. Şekil 7'de bir kısmı gösterilen tek resim tekniği ile çekilen bu fotoğraf kareleri canlıların hareketlerini anlamamızda bir dönüm noktası olmuştur ve hala özellikle dört bacaklı canlıların yürüyüşü üzerine yapılan araştırmalarda referans gösterilerek varlığını sürdürmektedir.



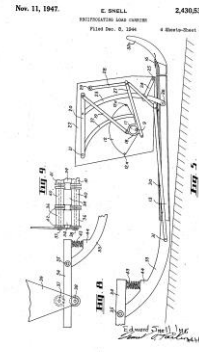
Şekil 7. Eadweard Muybridge'in resimlerinden elde edilmiş kareler. (Images obtained from the pictures of Eadweard Muybridge.)



(a) Rygg (1893)



(b) Adolf (1926)



(c) Edward (1944)

Şekil 8. On dokuzuncu yüzyıl sonları ve Yirminci yüzyılın ilk yarısında yürüyen makineler ile ilgili yapılan patent başvurularından ve çizimlerinden örnekler. (Examples of patent applications and drawings relating to walking machines in the late Nineteenth and early Twentieth centuries.)

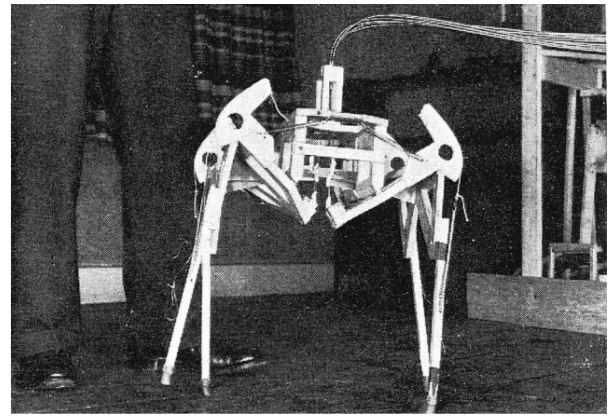
Yürüeyebilen makinelerle ilgili yapılan önemli çalışmaların başlangıcı da yine 19. yüzyıl olmuştur. Yürüeyebilen ilk mekanizma, 1878 yılında Paris'te düzenlenen Dünya Fuarı'nda karşımıza çıkmaktadır. "The Plantigrade Machine" adındaki bu makine, Rus matematikçi Pafnutiy L. Tchebyshev'e ait, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürebilen lambda mekanizmasını temel almaktadır [13]. Buna ek olarak, geçtiğimiz yüzyılın son çeyreğinde son derece popüler olan iki yürüeyebilen makine Melwalk Mark III [14] ve Dante [15] bu mekanizmayı esas alarak tasarlanmıştır. 20. yüzyılın son çeyreğine kadar yürüyen makineler üzerine yapılan çalışmalarda, sabit bir adım atma hareketini taklit edebilecek mekanizmalar tasarlamak üzerine olan bu yaklaşım benimsenmiştir ve bu yaklaşım ile birçok tasarım uygulaması ve patent başvurusu (Şekil 8) yapılmıştır [16–19]. Şekil 8'de bir çizimi gösterilen Mekanik At isimli yürüeyebilen bir makine için Rygg tarafından yapılan patent başvurusunun ayaklı bir makine için yapılan ilk patent başvurusu olduğu, ancak bu çizimin sadece fikir aşamasında kaldığı düşünülmektedir [20].

Yukarıda bahsedilen yaklaşım ile tasarlanan makineler, kullanılan mekanizmaların sabit bir yörüngesi olduğundan sınırlı bir hareket kabiliyetine sahipti ve aynı zamanda bu tip yürüyüş taklidi yapan makinelerin adım atma şekillerinin kontrol edilebilmesi mümkün değildi. Farklı arazi şartlarına uyumlu, adım atma şeklinin kontrol edilebileceği, birbirinden bağımsız bacaklara sahip yürüeyebilen makineler tasarlayabilmek için daha sofistike bir yaklaşımın gerekliliğini gören araştırmacılar, 20. yüzyılın ikinci yarısında, özellikle bilgisayar teknolojisinin icadı [21,22] gibi teknolojik gelişmelerin kazandırdığı ivme ile yürüyüşün kontrol edilebildiği makineler geliştirmeye başlamışlardı. Bu noktada, askeri ve uzay araştırmalarının çok büyük etkisi olmuştur; tekerlekli ve paletli harekete göre arazi uyumu yönünden göstermiş olduğu üstün performanstan dolayı

askeri ve uzay araştırmalarında çalışan araştırmacılar yürüeyebilen makineler üzerine odaklanmışlardır [9].

3. STATİK YÜRÜYEN AYAKLI ROBOTLAR (STATIC WALKING LEGGED ROBOTS)

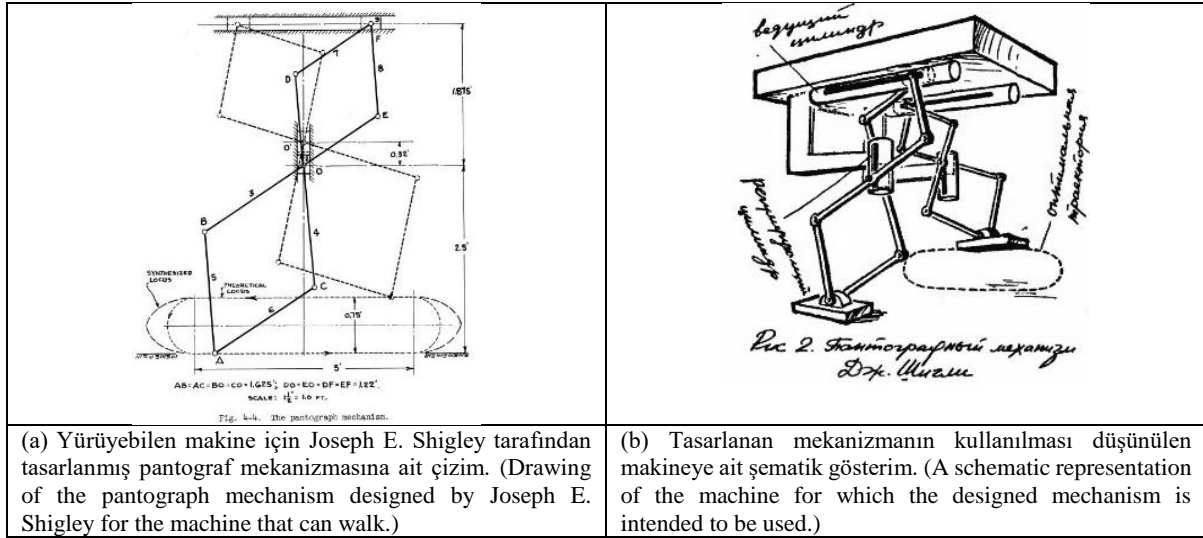
Bağımsız olarak kontrol edilebilen bacaklara sahip yürüeyebilen bir makine tasarlamaya yönelik bilinen ilk ciddi girişim, 1940 yılında Birleşik Krallık Savaş Departmanı desteğiyle Hutchinson [23] tarafından denenmiştir. W. H. Allen & Company Ltd. firması için çalışan Hutchinson, çok büyük zırhlı bir araç için ayaklı hareketin paletli hareketten daha iyi olacağını öne sürmüştü ve zırhlı araç tasarımı için, yaklaşık 60cm yüksekliğinde, operatörün oturduğu bir konsola bağlı dört adet esnek kablo tarafından kontrol edilebilen, toplamda sekiz ekleme sahip, dört bacaklı bir model oluşturmuş ve test etmiştir (Şekil 9). Ancak o yıllarda İngiltere İkinci Dünya Savaşı'na girdiğinden, Birleşik Krallık Savaş Departmanı bu tür gelişmelere daha fazla ilgi gösterememiş ve sonuç olarak bu proje tamamlanamadan sonlandırılmıştır [24].



Şekil 9. Yirminci yüzyıl ortalarında dört bacaklı makineler üzerine yapılan ilk önemli çalışma. (The first major

study on four-legged machines in the mid-Twentieth century.)

ayaklara aktarmak için pantograf mekanizması (Şekil 10a) kullanılmıştır. Ne yazık ki, böyle bir makinenin



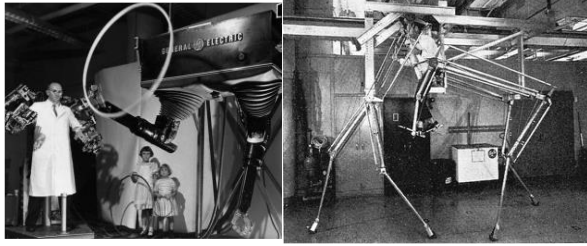
Şekil 10. Joseph E. Shigley tarafından ATAC bünyesinde yapılan çalışmalara ait çizimler. (Sketches of the study done by Joseph E. Shigley within ATAC.)

Hutchinson'ın yaptığı çalışmaların devamında, yaklaşık yirmi yıl boyunca ayaklı robotlar ile ilgili dönemin en dikkat çekici teorik çalışmaları, Amerika'da Birleşik Devletler Ordusu ve NASA destekli projeler kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bunun başlıca sebebi olarak, 2. Dünya Savaşı'ndan sonra Amerika Ordusu'nun engembeli arazide taşıma ve ulaşım için araç geliştirme çalışmalarına olan ilgisinin artması gösterilmektedir [24]. Bu bağlamda, birçoğu DARPA destekli olmak üzere, Michigan Üniversitesi iş birliği ile ABD Ordusu Tank-Otomotiv Merkezi (ATAC) tarafından ayaklı sistemler üzerine birçok araştırma yapılmıştır[25]. Bu araştırmaların temeli, 1950'li yıllarda Polonyalı mühendis M. G. Bekker'in ATAC bünyesinde Arazi Hareket Laboratuvarı'nı kurması ile atılmıştır ve Bekker, hem zorlu arazilerde hem de ay yüzeyi gibi daha yumuşak yüzeylerde hareket ile ilgili birçok araştırma yapmıştır [26–29]. ATAC bünyesinde yapılan bu çalışmalar Liston tarafından devam ettirilmiştir [30–33]. Daha sonra yine ATAC bünyesinde ayaklı hareket üzerine yapılan çalışmalar, Michigan Üniversitesi'nden Shigley tarafından yapılan yürüeyebilen makineler için makinenin nispi boyutları, kontrol edilecek nicelikler ve düzgün ve verimli yürümeyi sağlayacak metotlar gibi birtakım kriterlerin belirlendiği çalışmaları kapsayan araştırmalar ile geliştirilmeye devam edilmiştir [34].

Shigley, bu kriterlerin çoğunu yerine getirmeyi amaçlayan ve daha sonra imalatı yapılan tamamen mekanik bağlantılara sahip bir yürüyüş makinesi tasarlamıştır (Şekil 10). Bu tasarımda, bacakların ivmelenmesini azaltan ancak imal edilmesi çok zor olan dairesel olmayan dişliler kullanması aracın performansını sınırlamaktaydı ve sonuç olarak hidrolik bir sistem kullanılmasının daha iyi bir sonuç verebileceği düşünülmüştür. Önerilen hidrolik tasarımda (Şekil 10b), her köşede dört ayak olacak şekilde toplamda 16 ayak vardı ve eyleyicilerin yatay ve dikey hareketlerini

engembeli bir zeminde ve engeller arasında kontrol edilmesine yönelik uygun bir yöntem bulunamamıştır ve bu çalışmadan da tamamlanamadan vazgeçilmiştir. Ancak tüm bu çalışmalar, yürüeyen makineler literatüründe bir kilometre taşı olarak görülen başka bir çalışmanın temelini oluşturmuştur.

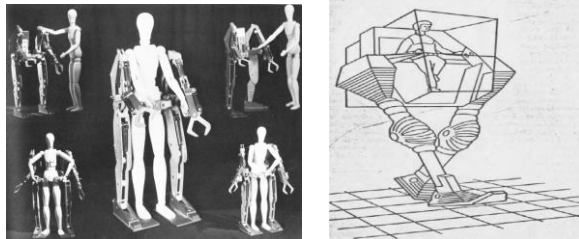
Bahsi geçen çalışmanın temeli ATAC bünyesindeki yürüyüş laboratuvarının 1962 yılında General Electric (GE) firması ortaklığında, sonrasında ayaklı hareket literatüründe büyük bir etki yaratacak, bir proje üzerine çalışmaya başlaması ile atılmış oldu. Bu anlaşmanın yapıldığı yıllarda Liston ve Shigley çalışmalarını kontrol problemi üzerine yoğunlaştırmışlardı [33]. GE ise aynı zamanlarda Siberetik Antropomorfik Makineler (CAMs) adını verdiği, operatörün kollarına kuvvet geri beslemesi kullanarak kontrol edilebilen teleanipülatörler üzerine çalışmalar yapmaktaydı. Şekil 11a'da gösterilen Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde 1958-59 yılları arasında Birleşik Devletler Ordusu Hava Kuvvetleri ve Birleşik Devletler Atom Enerjisi Komisyonu ortaklığında yürütülen Uçak Nükleer Tahrik Programı için geliştirilen Handyman adındaki teleanipülatör zamanının en popüler çalışmasıydı ve haptik teleoperasyon teknolojisinde bir kilometre taşı olma özelliğine sahiptir [35]. GE, o yıllarda, zaten Hardiman adında bir dış-iskelet geliştirdiğinden (Şekil 12b), ATAC için insan boyutlarına göre dış-iskelet sayılamayacak kadar büyük, iki ayaklı, operatörünün içerisinde bulunduğu, yürüeyebilen bir makine yapmak için Handyman'de kullanılan kuvvet geri-besleme servo prensibini kullanmayı önermişti (Şekil 12a). Fakat ATAC tarafından gelen talep üzerine, dört bacaklı bir makine yapılmasına karar verilmiş ve Hutchinson'ın çalışmaları ile hemen hemen aynı yıllarda yapılan fizibilite çalışmalarının (Şekil 11b) başarıyla tamamlanması üzerine tam ölçekli dört bacaklı bir yürüyüş makinesi



(a) Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Handyman. (The Handyman developed by Ralph S. Mosher in GE.)
 (b) GE Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından yürüyebilen makineler üzerine yapılan uygulanabilirlik çalışması. (The feasibility study on machines that can walk by GE Research and Development Center.)

Şekil 11. GE tarafından yürütülen çalışmaların resimleri. (The pictures of the study carried out by GE.)

yapılması için GE ile ATAC arasında bir sözleşme imzalanmıştır [35].



(a) Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen dış-iskelet modeli Hardiman. (The exoskeleton model Hardiman that developed by Ralph S. Mosher within GE.)
 (b) GE tarafından ATAC için önerilen yürüyebilen iki ayaklı makineye ait şematik çizim. (A schematic drawing of a walking biped machine that suggested for ATAC by GE.)

Şekil 12. GE bünyesinde yapılan iki ayaklı makine ve dış-iskelet çalışmalarına ait görseller. (Images of biped machine and exoskeleton studies performed within GE.)

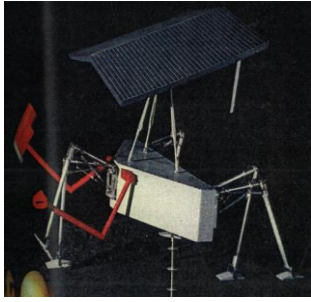


(a) Ralph S. Mosher operatörlüğünde yapılan Walking Truck denemelerine ait görsel. (The image of the Walking Truck trials run by Ralph S. Mosher.)
 (b) Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesinde sergilenen Walking Truck. (Walking Truck on display at the United States Army Transportation Museum.)

Şekil 13. Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Walking Truck isimli dört ayaklı yürüyebilen makineye ait görseller. (Images of the quadruped walking machine named Walking Truck that developed by Ralph S. Mosher within GE.)

Todd [24] tarafından belirtildiği gibi, bu araştırma başlangıçtaki fikre bağlı kalarak iki ayaklı makineler üzerine yapılsaydı, belki de operatör, insan doğasına benzerliğinden dolayı iki ayaklı bir makineyi dört bacaklı bir makineye göre daha iyi kontrol edebilecekti ve devamında yürüyen makineler tarihi şimdikinden çok farklı olabilecekti. Fakat yine de 1962-1968 yılları arasında, Ralph S. Mosher tarafından dört bacaklı olarak tasarımı ve imalatı yapılan bu makine ayaklı robotlar alanında birçok çalışmaya esin kaynağı olarak yön vermiştir ve günümüze kadar ayaklı hareket üzerine yapılan çalışmalarda referans gösterilerek popülerliğini korumuştur.

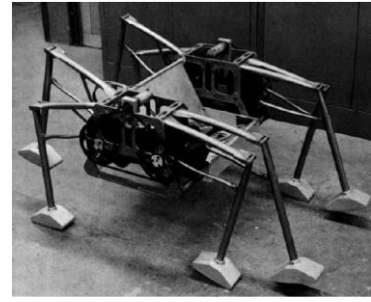
Günümüzde halen Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesi'nde sergilenmekte olan ve Şekil 13'de gösterilen, Walking Truck adındaki yürüyebilen dört bacaklı makine, yaklaşık 3 m boyundaydı, 1400 kg ağırlığındaydı ve saatte 8 km gibi bir hıza çıkabilmekteydi [36-38]. Ek olarak, Hutchinson'ın çalışmasına benzer bir kontrol stratejisi kullanılmaktaydı [23]. Dört bacaklı ve toplamda 12 serbestlik dereceli aracın, 3 serbestlik derecesine sahip her bir ayağı, hidrolik servo döngülerle operatörün bir kol veya bacağına bağlıydı; aracın ön bacakları operatörün kol hareketlerini takip ederken, aracın arka ayakları operatörün bacak hareketlerini takip ediyordu. Aracın hareketi için gerekli hidrolik güç, 90 Beygir gücünde içten yanmalı bir motor ile çalışan pompalar tarafından üretiliyordu.



(a) Moon Rover



(b) Walking Chair



(c) The Iron Mule

Şekil 14. Space General Corporation firması tarafından 20. yüzyıl son çeyreğinde Birleşik Devletler Ordusu ve NASA tarafından sağlanan destek ile geliştirilen yürüyebilen makineler. (Walking machines developed by Space General Corporation with support from the United States Army and NASA in the last quarter of the 20th century.)

Günümüzde halen Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesi'nde sergilenmekte olan ve Şekil 13'de gösterilen, Walking Truck adındaki yürüyebilen dört bacaklı makine, yaklaşık 3 m boyundaydı, 1400 kg ağırlığındaydı ve saatte 8 km gibi bir hıza çıkabilmekteydi [36–38]. Ek olarak, Hutchinson'ın çalışmasına benzer bir kontrol stratejisi kullanılmaktaydı [23]. Dört bacaklı ve toplamda 12 serbestlik dereceli aracın, 3 serbestlik derecesine sahip her bir ayağı, hidrolik servo döngülerle operatörün bir kol veya bacağına bağlıydı; aracın ön bacakları operatörün kol hareketlerini takip ederken, aracın arka ayakları operatörün bacak hareketlerini takip ediyordu. Aracın hareketi için gerekli hidrolik güç, 90 Beygir gücünde içten yanmalı bir motor ile çalışan pompalar tarafından üretiliyordu.

Walking Truck imal edildiği zamana göre çok iyi bir performans göstermişti, ancak Raibert'in belirttiği gibi kontrolü için çok iyi bir eğitime ve uzmanlığa ihtiyaç duyulmaktaydı ve operasyon süresi oldukça kısıtlıydı [39]. Buna rağmen, Walking Truck, ayakların birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebildiği yürüyebilen makinelerin uygulanabilirliğini kanıtladığı için ve kendi zamanının ötesine geçerek ayaklı robotlarla ilgili birçok çalışmayı teşvik eden bir çalışma olması sebebiyle ayaklı hareket teknolojisinde son derece önemli bir dönüm noktası olmuştur. Aynı yıllarda, yine Birleşik Devletler Ordusu ve uzayda, Ay'da ve diğer gezegenlerde hareketlilik problemlerine ilgi duyan NASA, GE firması ile olan projelere paralel, Space General Corporation (Aerojet General Corporation) firması ile askeri taşımacılık, gezegenler arası keşif ve engelli destek birimi olmak üzere en az üç uygulama alanı için ayaklı makinelerin geliştirilme olanaklarının araştırılması üzerine ortak projelere destek sağlamıştı [40]. Bu araştırma ve geliştirme serisi içerisinde geliştirilen yürüyen makinelerle ait görseller Şekil 14'de gösterilmektedir.

Bu çalışmaların en önemli çıktısı, askeri taşımacılık için geliştirilen ve ayaklı makinelerin gelişim tarihinde bir başka kilometre taşı olarak kabul edilen, Iron Mule Train isimli sekiz ayaklı yürüyebilen makinenin imalatı

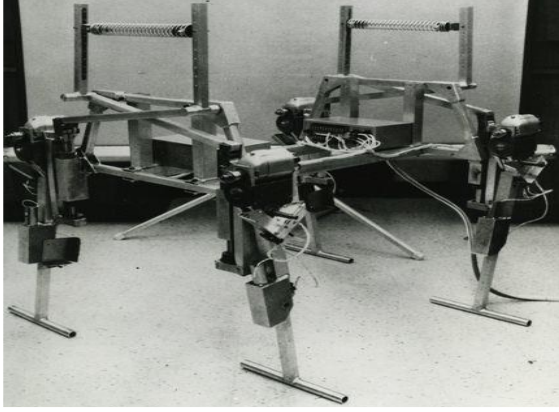
olmuştur. Todd daha sonra herhangi bir teknik iyileştirme yapmadan sadece bazı bileşenlerinde küçük değişiklikler yaparak Iron Mule Train makinesine dayanan bir robot üretmişti ve yaptığı çalışmada denge problemi bağlamında ayaklı robotların avantajlarını ve sınırlarını göstermek için hala değerli bir buluş olduğunu belirtmişti [41]. 21. yüzyıl başlarında, Morrison ve Mosher'in yaptığı çalışmalardan yaklaşık kırk sene sonra, bu görüşü destekleyen önemli bir gelişme olmuştur; DARPA, ayaklı hareket konseptini temel alan zorlu ve engebeli arazi taşımacılığı fikrine tekrar başvurmuş ve Boston Dynamics firmasına BigDog robotunun geliştirilmesi için fon sağlamıştır. Ayaklı hareket literatürüne ait önemli çalışmalar olmasına rağmen GE Walking Truck ve Iron Mule Train, ayaklı makinelerin tamamen mekanik olarak tasarlanmasına yönelik son girişimleri temsil etmektedir. Bu yaklaşımda, tasarım sadeliğinin getirdiği avantajlara nispeten zemin koşullarına uyum sağlayamamadan kaynaklanan dezavantajlar çok daha fazlaydı ve bu dezavantajların giderilmesi gerekmektedir.

Bu sebeple, 20. yüzyılın son çeyreğinde, Bölüm 2'de belirtildiği gibi ayaklı hareket alanında çalışan araştırmacıların bilgisayar ve elektronik alanındaki gelişmelerden etkilenmesi ile, ayaklı makinelerin tasarımında ve kontrolünde bilgisayar desteğine başvuru yeni bir döneme geçilmişti. 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren, analog veya kablolu elektronik mantık devreleri ile sınırlandırılan birkaç çalışma hariç, ayaklı robotların hemen hemen hepsinde belirli bir dereceye kadar bilgisayar kontrolü kullanılmıştır.

3.1 Statik Yürüyüşte Tam Otomatik Sistemlere Geçiş Dönemi (Transition Era to Fully Automatic Systems in Static Walking)

Bu dönemdeki bilgisayar boyutları göz önüne alındığında, hareket eden sistemler için esnek depolanmış program kontrolünün gerekliliği aşılması gereken bir problemdi, ancak ilk önce mini bilgisayarların ve daha sonra mikroişlemcilerin icadı ile çok küçük makinelerle bile bir çeşit bilgisayar işlem gücünün entegre edilebilmesi bu problemin aşılmasını mümkün kılmıştı. Ayrıca tam otomatik sistemlere geçiş döneminde, yürüyebilen makinelerin çoğu sonuçta bir

operatör tarafından kontrol ediliyordu ve insan-makine arasında kontrol görevinin nasıl paylaşılacağına karar verilmesi gerekmekteydi. Bu noktada, araştırmacılar, yürüeyebilen makinelerin kontrol sistemlerini, stratejik kararların operatör tarafından alındığı ancak eklemlerin servo kontrolü gibi daha spesifik kararların bilgisayarlar tarafından denetlendiği alt sistemler şeklinde yapılandırılarak bu problemin aşılmasını amaçlamışlardı.



Şekil 15. Andrew A. Frank ve Robert B. McGhee tarafından South California Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Phony Pony isimli dört bacaklı robot. (The quadruped robot named Phony Pony developed by Andrew A. Frank and Robert B. McGhee at the University of South California.)

Bilgisayar kullanılarak mevcut hareket etme tekniklerinin geliştirilmesine yönelik bilinen ilk ciddi girişim, Robert B. McGhee'nin önce South California Üniversitesi ve daha sonra Ohio State Üniversitesi bünyesinde yürüttüğü araştırma çalışmaları olmuştur. McGhee o yıllarda GE Walking Truck ile ilgili bir tanıtım gösterisini izlemişti ve makineyle ilgili asıl sorunun, operatörün kısa bir süre için bile olsa makinenin bacak hareketlerini koordine edememesi olduğunu fark etmişti. McGhee böyle bir makinenin bilgisayar veya elektronik bir mantık tarafından oluşturulan otomatik bir adım döngüsü kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermeye karar verdi. O yıllarda Robert B. McGhee'nin, Belgrad Üniversitesi'nden Rajko Tomovic ile Sonlu-Durum Kontrol Teorisi [42] üzerine çalışmaları vardı ve operatörü ikame edebilen otomatik bir döngü sistemi tasarlamak için bu yöntemi önermişti [43]. South California Üniversitesi'nde çalışmalarına devam eden McGhee [44], daha sonra, doktora danışmanlığını yaptığı Andrew A. Frank ile birlikte dört bacaklı yürüyüş üzerine araştırmalar yapmıştı [45,46]. Aynı dönemde, insan hareketleri için bir model olarak sonlu durum makinesini öneren Robert B. McGhee ve Rajko Tomović tarafından teorik çalışmalarının yapıldığı Frank'in doktora çalışması kapsamında [47], Phony Pony (Şekil 15) olarak adlandırılan, dönemin ilk otonom dört bacaklı robotunun imalatı gerçekleştirilmişti [48]. Phony Pony robotunda her bacak, birbirinin eşleniği ve iki serbestlik dereceli olacak şekilde tasarlanmıştı. Robotun bacakları ön ve arka çiftler aynı olacak şekilde monte edilip kontrol edilmişti. Ayrıca mikroişlemcilerin varlığından çok önce imal edildiğinden, bu robot, bitişik bir binanın ikinci

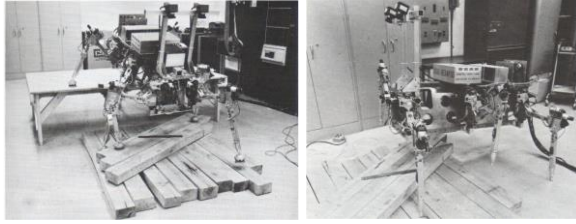
katında yer alan uzak bir mini bilgisayar vasıtasıyla kontrol ediliyordu. Robotu bilgisayara bağlayan kablo Şekil 15'in sağ kenarında görülebilir.

Robot, dahili herhangi bir kinematik veya dinamik modeli olmaksızın, limit sensörler ile eklemlerin durum geri-beslemesi kullanılarak sonlu durumlu bir makine tarafından kontrol edilmişti. Ayaklı robotlar literatüründe, bilgisayar kullanımına geçiş dönemi içerisinde bir ilk olması sebebiyle, Phony Pony robotu son derece önemli bir kilometre taşıdır ve bu robotun asıl önemi McGhee'ye, robotların yürütmesinde önemli bir dönüm noktası olacak olan, yürüeyebilen daha sofistike robotlar üzerine çalışmalar [49-51] yapması için ilham kaynağı olmasıdır. Ayrıca, Phony Pony çalışmasının o dönemdeki başarısı, Andrew A. Frank'e, antropomorfik sistemler üzerine önemli çalışmaları olan [52,53] ve iki ayaklı robotların hareket planlamasında çok önemli bir kavram olan Sıfır Moment Noktası (ZMP) kavramını [54-56] literatüre kazandıran Miomir Vukobratović ile birlikte çalışma fırsatı sağlamıştır [57-60].

3.2 Aktif Uyum Kavramının Ortaya Çıkışı

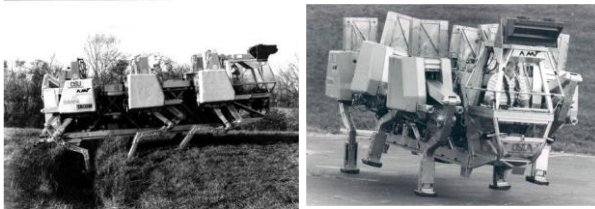
(Emergence of Active Adaptation Concept)

Yukarda belirtildiği gibi Phony Pony robotundan sonra McGhee, ayaklı yürüyüş üzerine çalışmalarına Ohio State Üniversitesi'nde devam etmiş ve 1977 yılında, OSU Hexapod isimli, altı bacaklı, belirli birkaç yürüyüş şekli taklit edebilen, dönebilen, yana yürüeyebilen, basit engelleri aşabilen, eklem bacaklılara benzer yapıda bir robot imalatını gerçekleştirmiştir [61]. Bu robot, 3 serbestlik dereceli birbirine benzer bacaklara sahipti. Ayrıca, altı adet bacakta, eyleyici olarak toplamda 18 adet elektrik motoru kullanılmıştı. Bu robotun en büyük özelliği bilgisayar kontrollü yürüeyebilen ilk robot olmasıydı. Bilgisayarın asıl görevi, bacakları hareket ettiren elektrik motorlarının sürülebilmesi için yürüyüş boyunca makinenin kütle merkezinin ayakların sağladığı destek poligonunun içerisinde kalacak şekilde kinematik denklemleri çözmektir. Şekil 16'da OSU Hexapod robotunun iki ayrı versiyonu gösterilmektedir. Bu robotun diğer bir önemi ise robot kontrolü, yürüyüş üretimi, merdivenlere çıkmak ve engellerin aşılması, dönme, aktif uyumluluk, sensörlerin kullanımı ve çok işlemcili kontrol gibi çok sayıda deneysel çalışma için kullanılmış olmasıdır [62-66].



(a) Yüksek bir masadan inerken (Climbing down from a high table)
(b) Engebeli bir yüzeyde ilerlerken (Moving on a rough surface)

Şekil 16. Robert B. McGhee tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen OSU Hexapod isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named OSU Hexapod developed by Robert B. McGhee at Ohio State University.)

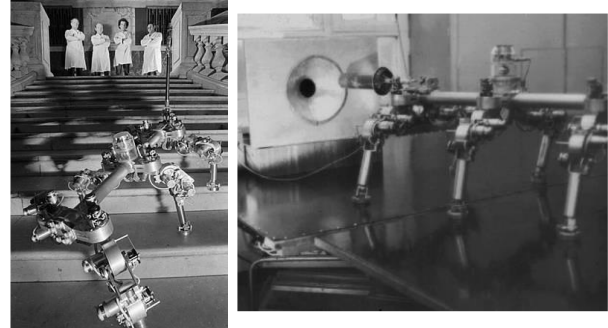


(a) Engebeli arazide ilerlerken (Moving on a rough surface)
(b) Düz bir zeminde ilerlerken (Moving on a flat surface)

Şekil 17. DARPA desteği ile, Robert B. McGhee ve Kenneth J. Waldron tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen ASV isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named ASV developed by Robert B. McGhee and Kenneth J. Waldron at Ohio State University with DARPA support.)

Çoğu temel bilimsel araştırmada olduğu gibi, OSU Hexapod robotuyla ilgili en dikkat çekici şey robotun kendisi değil, geliştirilmesi sırasında ortaya koyulan veya doğrulaması yapılan yeni kavramlardı. Bu robot sayesinde yapılan çalışmalarda, robotta kullanılan algılayıcı sistemler ile ayağın temas noktasındaki zemin yüzeyinin kesin seviyesi bilinemediğinden dolayı, tek başına konum kontrolünün yürüyen bir robot için yeterli olmadığını, bu yüzden de kontrol algoritmasında yüzeye uygulanan kuvvet geri-beslemesinin de kullanılması gerekliliği görülmüştü ve bu sayede aktif uyum kavramı ortaya çıkmıştı [67]. Ayrıca, McGhee, o yıllarda hala Ohio State Üniversitesi'nde olan ve ayaklı robotlar üzerine önemli çalışmaları olan Kenneth J. Waldron ile birlikte, 1983 yılında, yine DARPA tarafından desteklenen, başka bir ayaklı robot çalışması gerçekleştirmişti [68-71]. Adaptif Süspansiyonlu Araç (ASV) adındaki bu robot, arazi adaptasyonu açısından o zamana kadar yapılmış en üstün ve en büyük araçtı (Şekil

17). ASV, toplamda yaklaşık 3 ton gibi bir ağırlığa ve 250 kg taşıma kapasitesine sahipti, 5,6 m boyundaydı ve içten yanmalı bir motor ile çalışıyordu. Ayakların hareket kontrolü bir bilgisayar tarafından yapılıyordu, ancak aracın durumu, hareketi, hızı ve yapılan manevralar bir operatör tarafından yapılıyordu [72].



(a) Masha Robotu yapılıırken (The Masha Robot)
(b) Kuvvet geri-beslemesi deneyleri yapılırken (Performing force feedback experiments)

Şekil 18. SSCB Bilimler Akademisi iş birliği ile, E. V. Gurfinkel tarafından Moskova State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Masha isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named Masha developed by E. V. Gurfinkel in Moscow State University, in collaboration with the USSR Academy of Sciences.)

1976 yılında, SSCB Bilimler Akademisi iş birliği ile Moskova State Üniversitesi bünyesinde, Phony Pony robotuna benzer özelliklere ve performansa sahip, Masha adında (Şekil 18), eklem bacaklılara benzer yapıda altı ayaklı bir robot geliştirilmişti. Masha robotunda, üç serbestlik dereceli boru şeklinde mafsallı bacaklar kullanılmıştı. Bacaklar, elektrikli motorlar ve dişliler ile tahrik ediliyordu ve eklemlerde açılma konumları ölçmek için potansiyometre sensörleri kullanılmıştı. Robot, engelleri bir yakınlık sensörü ve ayaklardaki kontak sensörleri ile aşabiliyordu ve engellerin üzerinden geçmek ve tırmanmak gibi hareketler dahil olmak üzere tüm hareketleri otonom bir şekilde yapabiliyordu [73,74].



(a) KUMO-I
(b) PV-II

Şekil 19. Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen robotlardan ilk ikisi. (The first two of the robots that developed by Shigeo Hirose in TIT.)



(a) COMET-I

(b) COMET-II

(c) COMET-III

(d) COMET-IV

Şekil 22. Chiba Üniversitesi bünyesinde Kenzo Nonami tarafından insani amaçlı mayın temizleme işi için geliştirilen COMET serisi robotlar. (COMET series robots for humanitarian demining developed by Kenzo Nonami within Chiba University.)

Yine aynı yıllarda, Japonya'da Tokyo Teknoloji Enstitüsü (TIT) bünyesinde, Shigeo Hirose ve Yoji Umetani, daha sonra çok sayıda ayaklı robot çalışmasına öncülük edecek olan KUMO-I (Şekil 19a) ve genel olarak ayaklı robotların geliştirilmesinde önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilen PV-II (Şekil 19b) üzerine araştırmalar yapmışlardı [75-78]. PV-II robotunda, PANTOMEK ismiyle patentli olan üç serbestlik dereceli bir pantograf mekanizmasını temel alan bacaklar kullanılmıştı [78,79]. Pantograf mekanizması sayesinde, her bir eyleyicinin hareketi ayağın her bir Kartezyen koordinatlarda hareketine karşılık geliyordu. Her ayağın x, y ve z hareketlerini sadece bir eyleyici ile gerçekleştirebilme yeteneği ile, robotun kontrolü için kullanılan bilgisayarın, hareket etmek için karmaşık kinematik çözümler yapmasına gerek kalmıyordu. Bu mekanizma daha sonra geliştirilen diğer ayaklı robotlarda da kullanılmıştır [80].



(a) TITAN-III

(b) TITAN-XIII

Şekil 20. Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen TITAN serisi robotlardan ilki TITAN-III ve sonuncusu TITAN-XIII. (The TITAN series robots developed by Shigeo Hirose within TIT, the first one TITAN-III and the last one TITAN-XIII)

PV-II robotunda, bacak hareketleri harici bir elektrik enerjisi kaynağından beslenen DC motorlar sayesinde sağlanıyordu, ayrıca yer teması ve engelleri tespit edebilmek için bacaklarda kontak sensörleri kullanılmıştı. Hirose daha sonra, 1984 yılında, PV-II'nin gelişmiş bir versiyonu olan TITAN-III isimli bir robot geliştirdi [81]. TITAN-III, Hirose'ye ait TITAN serisi robotların ilk üyesiydi (Şekil 20) ve bu serinin devamında TIT bünyesinde günümüze kadar birçok ayaklı robot geliştirilmiştir [78,82-90].

3.3 Ayaklı Robotların Gerçek Görevlerde Kullanılmaya Başlanması (Starting to Use Legged Robots in Real Missions)



(a) Dante-I

(b) Dante-II

Şekil 21. FCR bünyesinde volkanik araştırmalarda kullanılmak üzere geliştirilen Dante serisi robotlar. (Dante series robots that developed to be used in volcanic researches within FCR.)

1992 yılında Carnegie Mellon Üniversitesi (CMU) bünyesinde bulunan Saha Robotik Merkezi'nde (FCR), aktif volkanik kraterler gibi zorlu yerleri keşfetmek ve bu yerlerden veri toplamak için sekiz bacaklı, Dante adında (Şekil 21a), başarılı bir saha robotu tasarlanmış ve imal edilmiştir [15,91]. Dante projesi, fikirden uygulamaya geçiş süreci sadece 10 ay süren iddialı bir girişimdi ve bu projenin sonucunda Antarktika'da aktif bir yanardağ olan Erebus Dağı'nda bir keşif yapıldı. Ancak kraterle yaklaşık 6 metrelik bir iniş yaptıktan sonra iletişimi sağlayan kablolardan birisi kopunca görev iptal olmuştu. Daha sonra, 1994 yılında yine FCR bünyesinde, NASA tarafından desteklenen, selefinin daha sağlam bir versiyonu olan ve Alaska'da aktif bir volkanik dağ olan Spurr Dağı kraterine başarılı bir keşif gerçekleştiren Dante-II (Şekil 21b) robotu geliştirilmişti [92]. Bu araştırmanın en büyük özelliği, volkanik araştırmalara katkıda bulunmasının yanı sıra, bunun gibi insanlar için zor ve tehlikeli görevlerde robotların kullanımının mümkün olduğunu göstermesidir.

21. yüzyıl başlarında Japonya'da Chiba Üniversitesi bünyesinde, Kenzo Nonami tarafından, zorlu ve engebeli arazilerde kuvvet ve empedans kontrolü ile yürüme, lazer haritalama ile tam otonom navigasyon ve teleoperasyon kontrollü yürüme konularını kapsayan ve günümüzde halen geliştirilmeye devam edilen proje kapsamında [93], insani amaçlı mayın temizleme işi için arazi mayınlarının tespitini ve imhasını yapmak üzere, daha sonra üç farklı versiyonu da geliştirilecek olan, altı ayaklı COMET

adında bir robot geliştirilmişti [94–96]. Nonami tarafından geliştirilen COMET serisi robotların (Şekil 22) farklı tipteki arazi koşullarında hareket etkinliğini göstermek için, farklı algoritmalara sahip kontrolcüler ile başarılı denemeler gerçekleştirilmiştir [97]. Bu serideki robotlardan, COMET–I ve COMET–II, elektrik motorlarıyla tahrik edilirken, COMET– III ve serinin en son versiyonu olan COMET–IV robotlarında, engebeli arazilerde ağır yükler altında yürümeye yetecek güçleri sağlayabilmek için hidrolik tahrik tercih edilmiştir. COMET–IV robotunda, dört serbestlik dereceli ve iki adet içten yanmalı motor ile çalışan bir hidrolik pompaya bağlı hidrolik eyleyiciler tarafından sürülen bacaklar kullanılmıştır [98,99].

3.4 Statik ve Dinamik Yürüyüş Stratejilerinin Karşılaştırılması (Comparison of Static and Dynamic Gait Strategies)



- (a) Statik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun statik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün her anında en az üç ayak yerde olmaktadır. (Static Walking – The support polygon formed by the legs on the ground and the projection of the center of gravity of a quadruped robot during the static walk. At least three legs are at the ground during every moment of the walk.)
- (b) Dinamik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun dinamik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün her anında ayaklar yere temas etmeyebilir. Dengenin korunabilmesi için sürekli hareket etmelidir. (Dynamic Walking – The support polygon formed by the legs on the ground and the projection of the center of gravity of a quadruped robot during the static walk. The legs may not touch the ground at any moment of the walk. It must move continuously to maintain balance.)

Şekil 23. Statik ve dinamik yürüyüş yaklaşımlarının dengeleme stratejisi bakımından karşılaştırılması. (Comparing static and dynamic walking approaches in sense of stability strategy)

Şu ana kadar bahsedilen yürüyen robotlar üzerine yapılan araştırmalar, daha önce bahsedilen iki temel yaklaşımdan ilk yaklaşımı temsil eden statik yürüyüş üzerine yapılan çalışmalardır. Tasarım yaklaşımlarında, kontrol edilmelerinde kullanılan algoritmalarda ve bilgisayar teknolojilerinde temel bazı farklılıklar olsa da konu edilen robot ve makinelerin hepsinde denge ve kararlılık için ortak bir yaklaşıma gidilmiş ve yürüyüş şekli olarak statik yürüyüş diye tanımladığımız bir yürüme stratejisi tercih edilmiştir. Statik yürüyüş stratejisinde, yürüyüşün her anında denge ve kararlılığı sağlayacak yeterli derecede geniş bir destek poligonunun oluşması için yeterli sayıda ayağın yerde olması sağlanmaktadır (Şekil 23a) ve hareket esnasında, robotun ağırlık merkezi bu destek poligonunun içerisinde hareket edecek şekilde gövde ve ayaklar hareket ettirilmektedir. Bunun sonucu olarak da statik yürüyüş stratejisinde hareket oldukça yavaştır.

4. DİNAMİK YÜRÜYEN AYAKLI ROBOTLAR (DYNAMIC WALKING LEGGED ROBOTS)

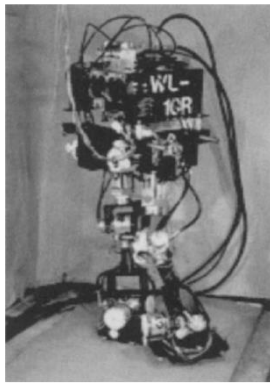
Dinamik yürüyüş stratejisinde temel yaklaşım denge ve kararlılığın yürüyüş esnasında bir destek poligonunun oluşmasına ihtiyaç duymadan aktif olarak sağlanmasıdır. Yani kısaca bu yürüyüş stratejisinde robot hareket ederken ayakların yerle temas etmediği bir an olabilir (Şekil 23b). Bu nedenle dinamik yürüyüş esnasında, robot davranışını öngörebilmek, kararlılık ve dengeyi sağlayabilmek için robot yapılandırmasının ve robot duruş şeklinin yanı sıra, bu yaklaşımda, robotun sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjiler ve bunlar arasındaki değişimler de önem arz etmektedir.

4.1 Yarı-Dinamik Yürüyüş Çalışmaları ve Aktif Dengeleme (Quasi-Dynamic Gait Studies and Active Balancing)

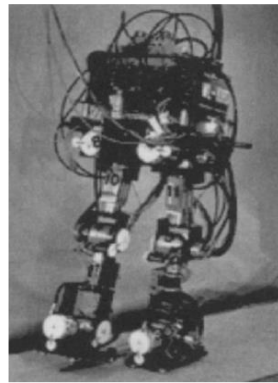
Aktif olarak dengelenen ilk makineler, otomatik olarak kontrol edilen küçük bir taşıyıcı üzerine monte edilmiş ters sarkaçlardır. Bu şekilde dizayn edilmiş bir makine imalatı üzerine yapılan bilinen ilk çalışma, 1951 yılında, "Bilgi Kuramının babası" olarak tanımlanan [100] Amerikalı matematikçi Claude Shannon tarafından gerçekleştirilmiştir [39]. Stanford Üniversitesi bünyesinde bulunan Robert H. Cannon, Shannon'ın bu çalışmasından esinlenerek ikili ters sarkaç kullanılan bir aktif dengeleme sistemi geliştirmiştir. Cannon daha sonra tek giriş ve çok çıkış prensibine dayalı sistemler üzerine çalışmalar yaparak, sadece taşıyıcı araba tahrik edilerek ikili ters sarkacın açılarının kontrol edilebilmesini araştırmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, Cannon, kontrol edilebilirlik sınırlarını sistemin fiziksel parametrelerinin açık işlevleri olarak ifade edebilmiştir [101,102]. Ters sarkaçlar üzerine yapılan bu aktif dengeleme araştırmaları, ayaklı yürüyüş üzerine yapılan çalışmalara öncü çalışmalar olmuştur, ayrıca ayaklı robotlarda aktif dengeleme probleminin çözümüne ilham kaynağı olması bakımından oldukça önemli çalışmalardır [103–106].

Aktif dengeleme prensibini temel alarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen ilk ciddi araştırmalar, bu ilkelere dayalı fiziksel bir sistemin o dönemlerde oluşturulmasındaki zorluklar nedeniyle deneysel çalışmalar olmadan yapılmıştır [54,107]. Ancak, antropomorfik robotlar üzerine ciddi çalışmaları olan Ichiro Kato ve Atsuo Takanishi, 20. yüzyılın sonlarına doğru, Waseda Üniversitesi bünyesinde WL serisi (Şekil 24a, 24b, 24c) ve daha sonra Şekil 24d'de son sürümü gösterilen WABIAN serisi isminde bir dizi antropomorfik robot geliştirmeye başlamışlardır [108–115]. Hidrolik olarak tahrik edilen 10 serbestlik derecesine sahip, toplamda dakikada 0,4m adım atabilen WL serisi robotlarda, ters sarkaç modelini esas alan bir hareket planı kullanılmıştır. Tam anlamıyla aktif bir dengeleme sistemine sahip olmasa da WL serisi robotların geliştirilmesindeki en dikkat çekici nokta, kullanılan dinamik geçiş evreleri sayesinde, ayaklı robotların basit bir kontrolcü ile çok karmaşık dinamik davranışlar sergileyebileceğinin gösterilmesidir. Bu yönüyle WL serisi robotlar, ayaklı robotlar literatüründe statik yürüyüşten dinamik yürüyüşe geçiş döneminin en önemli kilometre taşlarından biri olma özelliğine sahiptir.

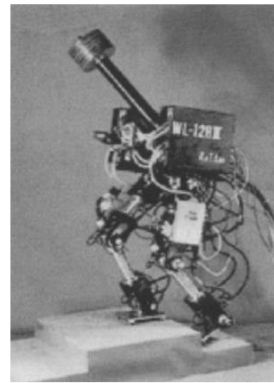
1980'li yılların ortalarında Tokyo Üniversitesi bünyesinde, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura, antropomorfik bir robot geliştirebilmek için Biper isimli bir dizi robot üzerine çalışmalar yapmışlardır [116–118]. Beş farklı robota sahip bu serinin ilk iki sürümü olan BIPER-1 ve BIPER-2 sadece yanlara yürüyebilmektedir. BIPER-3 yaklaşık 2kg ağırlığında ve 30.8cm yüksekliğindedir. Bu robotun ayakta durması için bir dizi adım atması gerekmektedir, çünkü her iki ayak da yere temas ettiğinde kendini dengelemeyi başaramamaktadır. Yedi serbestlik derecesine sahip Biper-4, insan bacakları ile hemen hemen aynı serbestlik derecesine sahiptir ve her bir eklemden sekiz adet DC motor kullanılmıştır. Şekil 25a'da gösterilen Biper-4, günümüzde halen, Kaliforniya'da bulunan Bilgisayar Tarih Müzesi'nde sergilenmektedir. BIPER-5, üzerine monte edilen bilgisayar haricinde BIPER-3 benzeri bir



(a) WL-10R



(b) WL-10RD

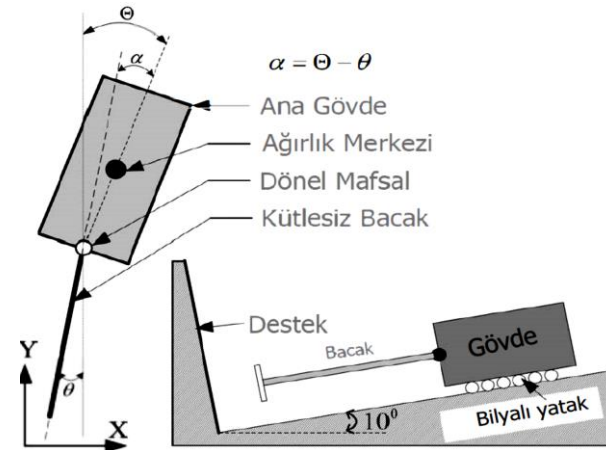


(c) WL-12RIII



(d) WABIAN-2R

Şekil 24. Waseda Üniversitesi bünyesinde Kato ve Takanishi tarafından geliştirilen antropomorfik robotlar. (Anthropomorphic robots developed by Kato and Takanishi within Waseda University)



Şekil 26. Kyushu Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından geliştirilen tek bacaklı zıplayan robota ait kavramsal model (soldaki) ve deney düzeneği modeli (sağdaki) (Sayyad ve ark.'nın [121] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The conceptual model of the monopod jumping robot developed by Kiyotoshi Matsuoka within Kyushu Institute of Technology (left) and the experimental setup model (right) (adapted from the study Sayyad et al. [121]))

yapıya sahiptir. Biped serisi robotlar, statik olarak kararlı bir yapıya sahipti ancak dinamik olarak kararlı bir yürüyüş yapabilen robotlardır. Kısaca, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura tarafından geliştirilen BIPER serisi robotlar, aktif dengeleme prensibinin ilk defa tam anlamıyla uygulandığı deneysel çalışmalar olması sebebi ile ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Buna ek olarak, koşma ve zıplama gibi yüksek hareket becerisini sergileyebilecek çalışmalar yapılabilmesine de öncü olmuşlardır.



(a) Bilgisayar Tarih Müzesi'nde sergilenmekte olan Biper-4 robotu (Biper-4 robot that exhibiting at Computer History Museum.) (b) Sağdaki Biper-3 robotu, Soldaki Biper-4 robotu (Biper-3 robot at right, Biper-4 robot at left)

Şekil 25. Tokyo Üniversitesi bünyesinde Shimoyama ve Miura tarafından geliştirilen iki ayaklı robotlar. (Biped robots developed by Shimoyama and Miura within Tokyo University)

Koşabilen bir robot üzerine bilinen ilk deneysel araştırma çalışmaları Kyushu Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından gerçekleştirilmiştir [119–121]. Burada koşma kavramı, daha net bir ifade ile, daha hızlı ilerleyebilmek için ayakların yerden kesildiğinde balistik uçuş yaptığı anların varlığı ile tanımlanmaktadır. Matsuoka, insanların zıplayarak ilerlemesine benzer bir hareketi taklit ederek ilerleyebilen, ana bir gövdeye dönel bir mafsals ile bağlanmış kütlesiz bir bacadan oluşan bir sistemin modelini formüle etmiştir. Sistem modelini formüle ederken, zıplayarak ilerleme esnasında yerle temas süresinin balistik uçuş evresine kıyasla çok daha kısa olduğunu varsayarak problemi basitleştirmiştir. Tüm çevrim süresinin neredeyse balistik uçuş evresi içerisinde tamamlandığı bu koşma modeli sayesinde Matsuoka, zıplayarak düşük bir hızda ilerleme için optimal bir zaman durum geribildirim kontrolörü elde edebilmiştir. Daha sonra, Şekil 26'de gösterilen deney düzeneğini kullanarak, elde ettiği modeli deneysel çalışmalar ile doğrulamayı başarmıştır. Bilyalı rulmanlar ile sürtünmenin azaltıldığı, yatayda 10 derecelik eğimli bir masa üzerinde hareket eden bir bacak modelinden oluşan deney düzeneği ile yaptığı çalışmalar, ayaklı robotlar literatüründe aktif olarak dengelenmiş ilk deneysel çalışma olması nedeniyle önemli bir yere sahiptir.

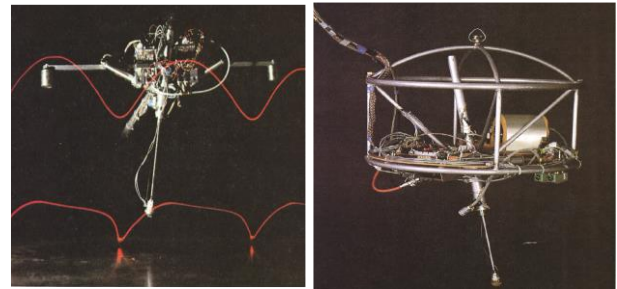
4.2 SLIP Modeli ve Raibert'ın Çalışmaları (SLIP Model and Raibert's Works)

Ayaklı robotlar literatüründe, aktif dengeleme prensibini temel olarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik yapılan en önemli çalışmalar ve ilk ciddi girişimler,

robotik alanının öncülerinden Marc H. Raibert tarafından, önceleri CMU bünyesinde ve daha sonra Massachusetts Teknoloji Enstitüsü bünyesinde (MIT) yürütülen araştırma çalışmaları olmuştur [122–124]. Özellikle dört bacaklı robotlar alanında gerçekleştirdiği çalışmalar ve literatüre kazandırdığı kavramlar ile Marc H. Raibert bugün en etkili robotistlerden biridir. Ayaklı robotların geliştirilmesi için DARPA tarafından desteklenen birçok proje yürütmüştür. Spot, LS3, BigDog [8], Petman [125], Atlas [126], Wildcat ve RHex [127] gibi dünyanın en gelişmiş dinamik robotlarını geliştiren bir şirket olan Boston Dynamics'in kurucusudur ve halen başkanlığını yürütmektedir.

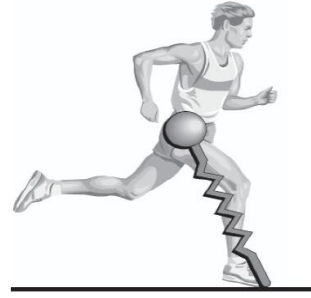
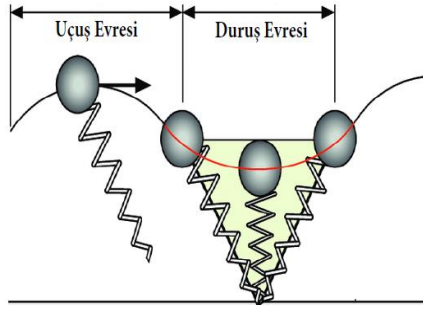
Robotikte önemli bir dönüm noktası olan aktif olarak kendini dengeleyen ve dinamik yürüyüş yapabilen robotların ilk geliştiricilerinden biri olan Raibert [128–130] çalışmalarına, ilk başta, Şekil 27a'da gösterilen hareketi dikey bir düzleme kısıtlanmış zıplayan tek ayaklı bir robot geliştirerek başlamıştır [131] ve devamında Şekil 27b'de gösterilen üç boyutlu zıplayabilen tek ayaklı bir robot geliştirmiştir [132]. İki ve üç boyutlu hareket eden tek ayaklı robotların her ikisinde de zıplama yüksekliğinin ayarlanmasının yanında enerji depolayan elemanlar olarak da kullanılabilmesi için yay eklenmiş pnömomatik silindirlere teleskopik bacak olarak kullanılmıştır. İki boyutta hareket edebilen ilk robotta, teleskopik bacak gövdeye döner mafsals ile bağlanmıştır. Ayrıca, robot üzerine gövdenin eğim açısını, ayak açısını, ayak boyunu, bacağa eklenmiş yaydaki gerilmeyi ve yer temasını ölçen sensörler eklenmiştir.

Ayaklı robotlarda aktif dengeleme ile koşma ve zıplama gibi hareketlerin incelenmesi amacıyla geliştirilen bu robotlar sayesinde, Raibert, daha sonra çok bacaklı sistemlere de uygulanabilecek basit ama etkili, koşma ile arasındaki analogi Şekil 28'de gösterilen Yay Yüklü Ters Sarkaç (SLIP) modelini temel alan bir algoritma geliştirmiştir. Matsuoka'nın çalışmasına benzer şekilde



(a) Düzlemsel zıplayan tek ayaklı robot (Planar jumping monopod robot) (b) Üç boyutlu zıplayan tek ayaklı robot (Three-dimensional jumping monopod robot)

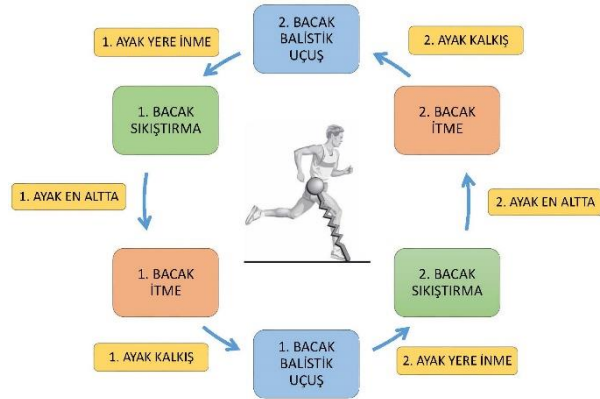
Şekil 27. Marc H. Raibert tarafından geliştirilen tek ayaklı robotlar. (The monopod robots developed by Marc H. Raibert)



- (a) Burada duruş evresinin başlangıcında bacak sıkışmakta ve enerji duruş sonunda kalkışa geçerken gövdeyi ivmelendirmek için tekrar kullanılmaktadır (Poulakakis'in [133] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The leg is compressed at the beginning of the stance phase, and the energy is re-used to accelerate the body as it enters the swing phase at the end of the stance (adapted from the study Poulakakis [133]).)
- (b) Koşan bir insan üzerinde SLIP model analojisinin gösterimi (Schwind ve Koditschek'in [134] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The representation of the SLIP model analogy on a running person (based on the study of Schwind and Koditschek [134]))

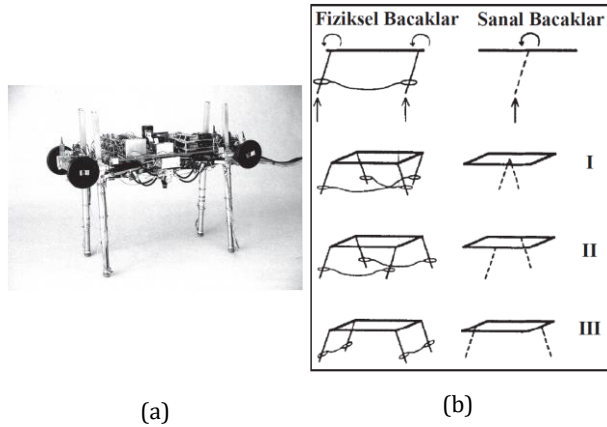
Şekil 28. Koşma modeli ile SLIP modelinin benzeşimini gösteren çizimler. (Drawings illustrating the similarity of SLIP model with the running model.)

Şekil 29. Raibert tarafından dört ve iki ayaklı yürüyen robotlar için önerilen kontrol algoritmasını eş zamanlayan durum makinesinin şematik gösterimi. Durumlar arasında geçişler zıplama hareketine bağlı olarak sensörler aracılığı ile sağlanmaktadır (Raibert'in [39] çalışmasından uyarlanmıştır.) (Schematic representation of the state machine synchronizing the control algorithm proposed by Raibert for four- and two-legged walking robots. Transitions between states are provided by sensors depending on the bounce movement (adapted from the work of Raibert [39]).)



koşma çevrimini duruş evresi ve uçuş evresi olarak iki ayrı evrede inceleyen Raibert, duruş evresini göz ardı etmeden; duruş evresinde ayak yerde sabit bir noktada dururken sistemi ters sarkaç gibi, ayağın yerden kesildiği uçuş evresinde ise yine kütle merkezinin hareketini balistik uçuş gibi modellemiştir. Daha sonra tek bir çevrimi zıplama yüksekliği, ilerleme ve gövde durusu olmak üzere üç ana kısımda ayrı ayrı dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur. Bu şekilde tek ayaklı bir robotun aktif olarak dengelemesi için kullanılacak kontrolcü algoritmasının, birbirleriyle eşzamanlı çalışan ve ilerleme hızının, gövde duruşunun ve son olarak zıplama yüksekliğinin ayrı ayrı düzenlendiği üç ayrı ve çok basit kısımdan oluşturulabileceğini göstermiştir. Kontrolcülerini eş zamanlamak için sistem durumları arasında geçiş yapan bir sonlu durum makinesi kullanılmıştır (Şekil 29). Etkinlikler arasındaki bağlantı, bağlantıların üç ayrı kontrolcüde bozucu sinyal olarak işleme alınmasıyla sağlanmıştır.

Raibert daha sonra, iki boyutta hareket için önerdiği bu hareketlilik algoritmasının, üç boyutta çalışan tek bacaklı bir makinenin hareketini kontrol etmek için de yeterli olduğunu göstermiştir [132]. Hareketlilik algoritmasının bu şekilde ayrıştırılması basit bir kontrolcü tasarımına imkan vermesinin yanında, ayaklı robotlarda hareketliliğin daha karmaşık problemlerine odaklanılmasını sağlayan kavramsal bir çerçeve de sunmaktadır. Bu kontrol prensibi genellikle Raibert'in üç parçalı kontrolü olarak adlandırılır ve ayaklı hareketlilik araştırmasında çok önemli bir kilometre taşıdır. Raibert, ayaklı robotlarda aktif denge ve dinamik temellerinin anlaşılabilmesi için, basitleştirilmiş bir hareketlilik problemi bağlamında tek ayaklı robotlar üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar ile ortaya koyduğu bu kavramsal çerçevenin, birtakım kabuller ile çok bacaklı sistemler için de kullanılabileceğini göstermiştir. İlk önce, iki ayaklı koşan bir robot üzerinde [135], daha sonra Şekil 30a'da gösterilen dört bacaklı bir robot üzerinde, tek ayak için önerilen kontrol algoritmalarının

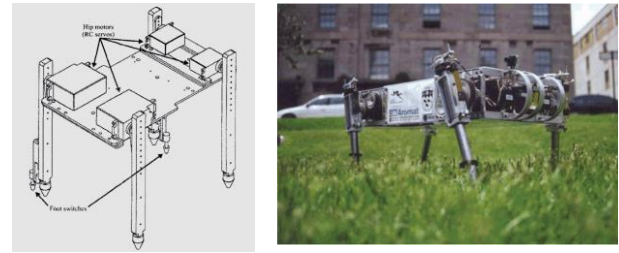


Şekil 30. (a) Marc H. Raibert tarafından geliştirilen dört bacaklı robot ve (b) sanal bacak kavramının farklı yürüyüş tipleri için uygulamasını gösteren şematik çizim (Raibert ve ark.'nın [129] çalışmasından uyarlanmıştır.) ((a) The quadruped robot developed by Marc H. Raibert, and (b) Schematic drawing of the virtual leg concept implementation for different types of walking (adapted from the study by Raibert et al. [129]))

doğrudan uygulanabileceği gösterilmiştir [129]. Buradaki temel yaklaşımın dayanağı, insanlarda olduğu gibi, koşarken bacakların dönüşümlü kullanılmasından dolayı her iki bacedan sadece birinin aktif olması gerçeğinden yola çıkarak, tek bacak için oluşturulan kavramsal çerçevenin iki ayaklı bir robotta aktif bacak için uygulanabilir olmasıdır.

Prensipde bu yaklaşımın, hareket boyunca sadece bir bacağın aktif olduğu herhangi bir ayaklı sistem için uygulanabilir olmasına rağmen, hareket boyunca birden fazla bacağın aktif olduğu durumlarda bu yaklaşımın uygulanması mümkün değildir. Bu problemi aşır, oluşturduğu kavramsal çerçeveyi dört bacaklı robotlarda da kullanabilmek için, Raibert, Ivan Sutherland tarafından önerilen [136] birden fazla aktif bacağın tek bir bacakmış gibi davrandığı sanal bacak kavramına başvurmuştur. Bu yöntemle, Şekil 30b'de gösterildiği gibi dört bacaklı bir robot, ikili eşleştirmeler ile Raibert'in üç parçalı kontrolünün uygulanabildiği iki ayaklı bir sisteme indirgenebilmektedir. Burada, bacaklarda yapılan eşleştirmeler robotun yürüyüş şeklini belirlemektedir. İki çapraz bacağın eşzamanlı hareketi, Tırs yürüyüş şekline, aynı taraftaki iki bacağın eşzamanlı hareketi, Rahvan yürüyüş şekline neden olurken, Zıplayarak yürüyüş şekli arka bacakların ve ön bacakların eşzamanlı hareketiyle elde edilmektedir.

Raibert tarafından aktif dengeleme ve dinamik yürüyüş üzerine yapılan bu araştırma çalışmaları sonrasında, ayaklı robotlar alanında çalışan birçok araştırmacının ilgi odağı, antropomorfik robotlarda daha çok tercih edilen ZMP kontrollü sistemler yerine hızlı, dinamik ve çok yönlü hareketler sunabilen dinamik yürüyüş şekli üzerine



(a) Scout-I robotuna ait (b) Scout-II robotu (The Scout-II çizim (Drawing of the Scout-I robot)

Şekil 31. McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı bünyesinde Martin Buehler tarafından geliştirilen Scout serisi dört ayaklı robotlar. (The quadruped robots developed by Martin Buehler within Ambulatory Robotics Lab of McGill University)

yoğunlaşmıştır. Nitekim araştırmacılar, iki ayaklı robotlar ile karşılaştırıldığında yapılandırmasından dolayı denge problemine daha basit bir çözüm sunan, daha hızlı ve çeşitli yürüyüş şekilleri olan dört bacaklı robotlar geliştirilmeye başlamıştır. 1990'lı yılların sonunda McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı (ARL) bünyesinde bulunan Martin Buehler tarafından, mekanik sadeliği temel alan Scout isimli robot serisi geliştirilmeye başlanmıştır [137–139]. Dört bacaklı hareket için tasarlanan, Şekil 31a'da tasarıma ait bir çizimi de gösterilen, serinin ilk robotu Scout-I her baceda sadece bir serbestlik derecesine sahip oldukça basit bir tasarımdı. Oldukça basit bir mekanığe sahip olmasına rağmen bu robotun, hareket stratejisinde ters sarkaç dinamiklerinin temel alındığı deneysel çalışmalar sonucunda yüksekliği yaklaşık bacak boyunun %45'i olan merdivenleri tırmanabildiği gösterilmiştir [137]. Şekil 31b'de gösterilen serinin ikinci ve son robotu olan Scout-II robotunda, yine mekanik basitlik korunmuş, sadece bacağa yaylı prizmatik mafsal eklenerek bacağın serbestlik derecesi biri aktif diğeri pasif olmak üzere ikiye çıkarılmıştır. Saatte 1,3 m/s gibi bir hıza erişebilen bu ikinci robotun ağırlığı 27 kg'dır [140]. Bu çalışma, bacaklarda sadece bir eyleyicinin kullanıldığı oldukça basit bir tasarıma sahip dört bacaklı bir robotun yürüme, koşma, merdiven tırmanma gibi yüksek hareket kabiliyeti sergileyebileceğini göstermesi açısından ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir.

4.3 Son On Yılda Yapılan Dört Ayaklı Robot Çalışmaları (Quadruped Robot Studies in the Last Decade)

21. yy başlarında, Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka, Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde, canlılardaki sinir sisteminden esinlenerek geliştirdikleri Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) modeli kullanılan, Patrush serisi (Şekil 32a) ve Tekken serisi (Şekil32b) isminde bir dizi dört bacaklı robot geliştirilmeye başlamıştır. Canlılarda



(a) Patrush-I (b) Tekken-II

Şekil 32. Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından geliştirilen dört ayaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Hiroshi Kimura and Yasuhiro Fukuoka within Kyoto Institute of Tehcnology)

görülen vestibülo-spinal refleks, gerilme refleksi gibi spinal refleksleri taklit edebilen bir MÖÜ geliştirmeyi amaçlamışlardır. Önerdikleri yapay sinir sistemi yaklaşımını deneysel çalışmalarla doğrularak, MÖÜ temelli kontrol yöntemini kullanan dört bacaklı bir robotun, bilinmeyen düzensiz bir araziye otonom adaptasyon yeteneğine sahip olduğu gösterilmiştir. 2010 yılında en son sürümü olan Tekken IV isimli robotta kamera ve lazer mesafe algılayıcıları kullanılmışlardır [141-145]. O yıllara kadar yapılan çalışmalarda, ayaklı robotların hareketi esnasında genellikle bacakların yörünge planlamasına dayalı bir arazi adaptasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından yapılan çalışmalarda, MÖÜ ve reflekslerin kullanıldığı tork tabanlı bir kontrol sisteminin çevreyle olan etkileşimi sonucu otonom şekilde gerçekleştirilen bir arazi adaptasyonu yaklaşımı sunulması ve bu yaklaşımın deneysel çalışmalarla doğrulanmasından dolayı ayaklı robotlar literatüründe bu çalışmalar bir fark yaratmıştır ve önemli bir yere sahiptir.

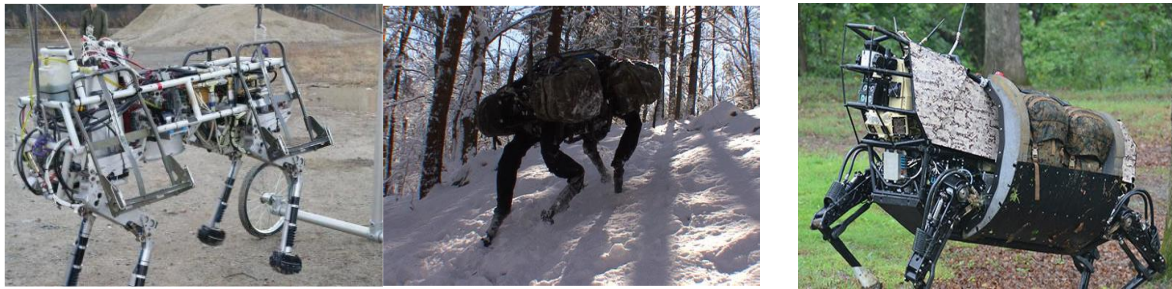
21. yüzyılın başlarına gelindiğinde, DARPA tarafından desteklenen ayaklı robotlar üzerine bir proje yürüten

Boston Dynamics firması, daha önce de belirtildiği gibi günümüzde halen dört bacaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog adında bir robot geliştirmiştir.

Martin Buehler tarafından yürütülen proje kapsamında, 2005 yılında BigDog robotunun ilk versiyonu 1 m boyunda, 1 m uzunluğunda, 0,3 m genişliğinde ve yaklaşık 90 kg ağırlığındaydı, ayrıca zorlu arazilerde saatte 6,5 km gidebilecek hızlara çıkabilmektedir. Her bacak, hidrolik olarak tahrik edilen üç aktif serbestlik derecesi ve ayakucu ile bacak arasında pnömatik bir yay kullanılmış prizmatik mafsallı bulunan bir pasif serbestlik derecesi olmak üzere toplamda dört serbestlik derecesine sahiptir [146].

Şekil 33a'da görüldüğü üzere, BigDog robotunun ilk versiyonunda diz eklemlerinin dört bacakta da aynı yönde olduğu bir bacak yapılandırılması tercih edilmiştir. Kendi ağırlığı 109 kg ve yaklaşık 50 kg ek yük taşıma kapasitesi olan ikinci versiyonda en temel farklılık bacak yapılandırmasında yapılmış ve yine hidrolik olarak tahrik edilen dördüncü bir serbestlik derecesi eklenmiştir [8]. Şekil 33b'de gösterilen bu robotta, gövdenin duruşunu ve ivmesini ölçen atalet sensörleri, eklemleri tahrik eden hidrolik eyleyicilerin hareketini ve kuvvetini ölçen eklemler sensörleri ile hidrolik basınç, akış ve sıcaklık gibi nicelikleri ölçen toplamda yaklaşık elli adet sensör kullanılmıştır. Ayrıca, sensörlerden gelen bu bilgileri işleyip BigDog robotunun hareketini kontrol eden yerleşik bir bilgisayar ve güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır.

2009 yılında, robotik alanında BigDog ile müthiş bir başarı ve etkinin elde edilmesinden dolayı, DARPA, BigDog projesinin gelişmiş versiyonu olan ve AlphaDog (Şekil 33c) adıyla da bilinen Bacaklı Birim Destek Sistemi (LS3) projesini başlatmıştır ve 2015 yılında bu proje sonlandırılmıştır. LS3 robotu, yaklaşık 600 kg ağırlığa ve 200 kg bir yük taşıma kapasitesine sahiptir, ayrıca zorlu arazi şartlarında 32 km gidebilecek bir yakıt

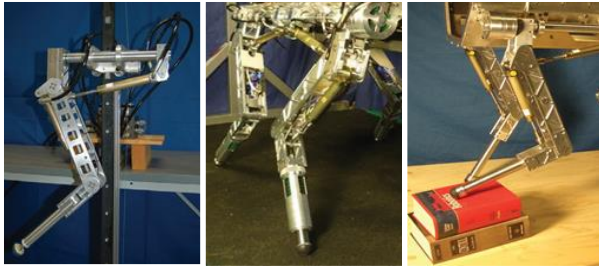


(a) BigDog robotunun 2005 yılındaki ilk versiyonu (The first version of the BigDog robot in 2005)

(b) BigDog robotunun 2008 yılındaki versiyonu (The 2008 version of the BigDog robot)

(c) Bigdog robotunun, AlphaDog ismiyle de bilinen, 2015 yılındaki son versiyonu (The latest version of the Bigdog robot in 2015, also known as AlphaDog)

Şekil 33. Boston Dynamics firması bünyesinde Martin Buehler ve Marc H. Raibert tarafından DARPA için geliştirilen dört ayaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Martin Buehler and Marc H. Raibert for DARPA within Boston Dynamics.)



(a) HyQ robotunda kullanılan ilk bacak tasarımı (The first leg design developed for use in HyQ robot)
 (b) HyQ robotunun 1.1 versiyon modelinde kullanılan bacak tasarımı (The leg design used in HyQ robot version 1.1 model)
 (c) HyQ robotunun 1.2 versiyonunda kullanılan bacak tasarımı (The leg design used in HyQ robot version 1.2 and later)

Şekil 34. İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ robotunda kullanılmak üzere geliştirilen bacak tasarımları. (Leg designs developed for use in HyQ robot developed by Claudio Semini within Italy Institute of Technology.)

kapasitesine sahiptir. Yine güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır. Ayaklı robotlar alanında yapılan diğer çalışmalara birer referans olmalarının yanında BigDog ve LS3 robotları, bu alanda çalışan bilim insanlarının dikkatini çektiği gibi büyük ölçekli askeri uygulamalar olmasından dolayı kamuoyunda da büyük bir ilgi uyandırmıştır. Askeri projeler olmasından dolayı literatürde bu robotlar hakkında neredeyse hiçbir bilimsel kaynak bulunmamaktadır.

Aynı yıllarda Claudio Semini, İtalya Teknoloji Enstitüsü (IIT) bünyesinde Hydraulic Quadruped (HyQ) isminde yine dört bacaklı ve hidrolik tahrikli bir robot geliştirmeye başlamıştır. Semini'nin kendi doktora tezinde de belirttiği gibi, bu çalışmanın asıl motivasyon kaynağı Marc. H. Raibert'm çalışmaları ve BigDog robotunun yarattığı büyük etkidir [123]. Semini 2007 yılında, BigDog robotuna benzer bir robot geliştirebilmek için, çalışmalarına ilk olarak ayaklı robotların en önemli bileşeni olan bacak mekanizması ve

yapılandırması üzerine yaptığı araştırmalar ile başlamıştır [147–149]. Elektro-mekanik yapıların ve özellikle hidrolik eyleyicilerin tasarımının ve performansının değerlendirildiği deneysel çalışmalarda kullanılması için geliştirilen ve Şekil 34a'da gösterilen HyQ robotuna ait bacağın ilk versiyonu, sadece dikey düzlemde hareket edebilecek şekilde birbirine döner mafsallarla bağlanmış iki adet uzuvdan oluşan basit bir mekanizmaya sahipti. Bacak mekanizması, hidrolik silindireler ile tahrik edilen her biri 0.3m uzunluğunda olmak üzere toplamda iki serbestlik derecesine sahipti. Şekil 34b'de gösterilen ikinci bacak versiyonunda, ayakucu ve bacak arasına yay eklenerek, sistemin toplam serbestlik derecesi üçe çıkartılmıştır [150], fakat Şekil 34c'de gösterilen sistem empedansının aktif olarak kontrol edildiği HyQ robotunun son versiyonunda kullanılan bacak tasarımında bu yay eklenmemiştir [151,152].

Şekil 35a'da ilk versiyonu gösterilen 2011 yılında imal edilen HyQ robotu ile dört bacaklı robotların dinamik yürüyüşü ve kontrolü üzerine birçok deneysel araştırma-geliştirme çalışmaları gerçekleştirildikten sonra, robota ait eyleyiciler, hidrolik bileşenler, elektro-mekanik yapı ve sensörler iyileştirilerek, 2013 yılında Şekil 35b'de gösterilen HyQ robotuna ait son versiyon imal edilmiştir. Hidrolik olarak tahrik edilen toplamda 12 serbestlik derecesine sahip, 75 kg ağırlığında, 1 m uzunluğunda, 0,5 m genişliğinde, 1 m boyunda olan son versiyon HyQ robotunun tüm eklemlerinde manyetik mutlak ve optik bağlı kodlayıcılar vardır, ayrıca robot, gerinim ölçme tabanlı kuvvet-tork sensörlerine sahiptir. Bunlara ek olarak robotta, hidrolik bileşenlere ait basınç sensörleri ve gövde duruşunun belirlenmesinde kullanılan atalet ölçüm birimi de mevcuttur. Ayakucunda yüksek frekanslı darbelerin sönümlenmesini sağlayan ve robota çekiş gücü sağlayan yüksek oranda sıkıştırılmış araba lastiği kauçuğu benzeri bir malzeme kullanılmıştır [153–158].

Çizelge 1. HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri (Semini ve ark.,'nın çalışmasından uyarlanmıştır [163]). (System specifications of the HyQ2Max robot. (It was adapted from the study of Semini et al. [163]).)

Boyutlar	Boy: 1,31m Genişlik: 0,54m Yükseklik: 0,91m	Kalça Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork	Çift Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 120N·m (@20 MPa)
Uzuv Boyutları ve Ağırlıkları	Bacağın Kalça Uzu: 0,117m, 3,54kg	Üst Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork	Tek Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 45N·m (@20 MPa)
	Bacağın Üst Uzu: 0,36m, 4,95kg Bacağın Alt Uzu: 0,38m, 1,40kg	Alt Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork	Hidrolik Silindir & Dört Çubuk Mekanizması 250N·m (@20 MPa)
Maksimum Ayak Uzunluğu	0,740m	Toplam Serbestlik Derecesi	12
Toplam Ağırlık	80kg (Güç Kaynağı Hariç)	Kontrolcü Frekansı	1 kHz Tork & Konum Kontrolcüsü (EtherCAT arayüzü)
Eklemlerin Açılış Aralığı	Kalça Uzu: 80° Üst Uzu: 270° Alt Uzu: 165°	Konum Sensörleri	Tüm eklemlerde Mutlak Konum Sensörü (Çözünürlük: 262.144 CPR)

HyQ robotu ile düz, eğimli ve engebeli arazide yürüme, dış darbeler altında dengeyi sağlama [159], koşma [156], adım refleksleri, sezgisel yürüyüş, engeller üzerinden atlama [160,161] ve engebeli yüzeylerde yürüme ve merdiven çıkma için optimize edilmiş yürüyüş [162] gibi yüksek hareket kabiliyetlerinin değerlendirildiği birçok başarılı deneysel çalışma gerçekleştiren Semini, laboratuvar ortamının dışına çıkarak gerçek hayatta kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla 2015 yılında Şekil 35'e gösterilen HyQ2Max adını verdiği HyQ robotunun daha gelişmiş bir versiyonunu geliştirmeye başlamıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bilgi ve birikimler ışığında HyQ robotunun sağlamlığını, bacağın çalışma uzayını ve eklemlerde üretilen torkları artırabilmek ve zayıf yönlerini güçlendirebilmek için bacakları ve gövdeyi tamamen yeniden tasarladıkları HyQ2Max robotundaki en dikkat çekici değişiklikler bacak ile gövde arasındaki eklemin yapılandırılmasında ve bacaklarda tork üretimi için kullanılan eyleyicilerde yapılmıştır. Bacağın üst kısmını tahrik etmek için hidrolik silindir yerine hidrolik döner eyleyici tercih edilmiştir. Bacağın alt kısmında tork

üretimini iyileştirebilmek için yine hidrolik silindiler dört çubuk mekanizması ile birlikte kullanılmıştır [163]. Bu derlemenin yazımı sırasında halen IIT bünyesinde geliştirilmeye devam edilen ve günümüzün en gelişmiş dört bacaklı robotlarından biri olan HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Gerçek hayatta kullanılmaya en yakın diğer bir dört bacaklı robot, özellikle dört bacaklı robotlar üzerine birçok araştırmanın yapıldığı Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi (ETHzürich) Robotik ve Akıllı Sistemler Enstitüsü bünyesinde, ANYbotics firmasının kurucularından Marco Hutter tarafından geliştirilen ANYmal isimindeki robottur [164]. Yukarıda bahsedilen gelişmiş robotların başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olduğu gibi, ANYmal robotunun geliştirilmesine de ilk önce canlıların yürüyüşlerindeki benzer dinamikleri sağlayabilen, eklemlerde geçici enerji depolayabilen ve arazi uyumunun pasif olarak geliştirilebildiği Seri Esnek Eklemlerli Robotik Bacak (ScarLETH) adı verilen tek bir robot bacağı üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla başlamıştır. ETHzürich bünyesinde

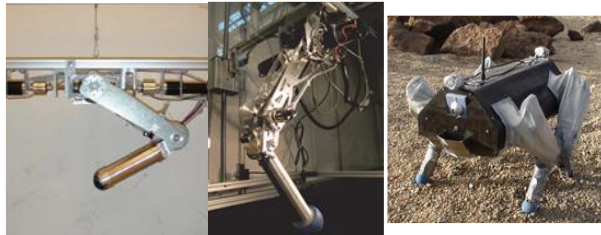


(a) HyQ robotunun 2011 yılındaki ilk versiyonu (The first version of the HyQ robot in 2011) (b) HyQ robotunun 2013 yılındaki son versiyonu (The latest version of the HyQ robot in 2013) (c) HyQ robotunun selefi HyQ2Max robotu (The predecessor of the HyQ2Max robot)

Şekil 35. İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ isimli dört ayaklı robot versiyonları. (The versions of the quadruped robot named HyQ developed by Claudio Semini within Italy Institute of Technology)

ayaklı yürüyüş üzerine yapılan birçok araştırma çalışmaları [165–167] sonucu geliştirilen, Şekil 36a'da ilk ve Şekil 36b'de son versiyonu gösterilen ScarLETH ismindeki robotik bacak, ilk olarak David Remy tarafından 2008 yılında Avrupa Uzay Ajansı tarafından düzenlenen Lunar Robotik Yarışması'na katılmak için geliştirilen ALoF isimli (Şekil 36c) dört bacaklı bir robotta kullanılmıştır [4,168–170]. Daha sonra Marco Hutter yine ScarLETH adındaki robotik bacakları kullanarak, Şekil 37a'da gösterilen, Eklemli Robotik Ayaklı Yaylı Tetrapod (StarLETH) adını verdiği dört bacaklı bir robot geliştirmiştir [171]

Laboratuvar ortamında hareket kontrol prensipleri ve eyleyici üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan StarLETH robotu, rijid bir ana gövdeye bağlanmış dört özdeş ve tamamen simetrik eklemli bacaklara sahiptir. Her bacağın memeli tarzında düzenlenmiş üç serbestlik derecesi vardır. Hızlı bacak hareketleri elde edebilme adına tüm eyleyiciler gövdeye montaj edilerek, hafif bir bacak yapısı tercih edilmiştir. Yaklaşık 0,5 m boyunda ve 23 kg ağırlığındaki bu robotun bacakları 0,2 m uzunluğundaki bölümlerden oluşmaktadır. Canlılardaki kas ve tendon yapısına benzer özelliklere sahip, son derece esnek seri elastik eyleyiciler tarafından tahrik edilen bacaklar sayesinde hareket esnasında enerji depolayabilmektedir. Bu sayede yüksek enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Hutter, StarLETH robotu ile mekanik tasarım [172], ayaklı robotlarda esnek bacakların kullanımı [173], yürüyüş ve tork kontrolü [174], dört bacaklı robotların hızı, verimliliği, çok yönlülüğü ve sağlamlığı [175], yürüyüş esnasında kuvvet ve tork optimizasyonu [176], eğimli yüzeylerde dinamik yürüyüş [177], dört bacaklı koşma ve atlama hareketlerinin matematiksel model kullanılarak durum-geri bildirim ile optimizasyon tabanlı kontrolü [178] gibi birçok konu üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgi ve birikimi kullanarak, laboratuvar ortamının dışında, gerçek hayatta zorlu ortamlarda kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla Şekil 37b'de



(a) FerrETH ismindeki ilk versiyonu (The first version named FerrETH)
 (b) ScarLETH ismindeki son versiyonu (The last version named ScarLETH)
 (c) ScarLETH'nin kullandığı ALoF ismindeki ilk robot (The first robot named ALoF in which ScarLETH is used)

Şekil 36. Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde ayaklı robotlarda kullanılmak üzere geliştirilen robotik bacaklar (a, b) ve kullanıldığı ilk dört ayaklı robot (c). (The robotic legs developed for use in legged robots within the Zurich Federal University of Technology (a,b) and the first quadruped robot used in (c).)

gösterilen ANYmal robotunu geliştirmeye başlamıştır [179].



(a) StarLETH

(b) ANYmal

Şekil 37. Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde Marco Hutter tarafından geliştirilen dört bacaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Marco Hutter within Zurich Federal University of Technology)

Tek bir ana karbon fiber gövdeye basit mekanik bağlantılarla bağlanmış 12 adet özdeş eyleyiciye sahip, çevre algısı için iki adet lidar sensör ve geniş açılı kameranın kullanıldığı, toplamda 30 kg ve 0,5 m yüksekliğinde olan ve farklı uygulamalar için kullanılacak gaz algılama sensörü, ultrason mikrofona, optik yakınlaştırma ve termal kamera gibi sensörler veya manipülasyon için kullanılacak robotik kolların bağlantısına izin veren modüler bir yapıya ve IP67 sınıfı bir koruma derecesine sahip olan ANYmal robotu (Şekil

38b), yüksek hareketlilik, hızlı ve dinamik hareket yetenekleri, sağlıklı, basit bakım onarım gibi konulara odaklanılarak zorlu ortamlarda uzun süreli dayanıklı otonom çalışma için özel olarak tasarlanmıştır [180]. ANYmal robotunda da selefi StarLETH robotunda olduğu gibi memeli canlılarda görülen bir eklem yerleşimi tercih edilmiştir. Ancak StarLETH, ALoF, HyQ, BigDog veya diğer geliştirilen ayaklı sistemlerin aksine bu robotun bacakları, tüm eklemlerin tamamen dönebileceği şekilde, ofsetli olarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu sayede ANYmal robotunun bacakları, yüksek hareketliliğin anahtarı olan oldukça geniş bir hareket aralığında çalışabilmektedir (Şekil 38a). Bununla birlikte, geniş hareket aralığı sayesinde Şekil 38a'da gösterildiği gibi ANYmal robotunun ayakları, kapı açmak veya yüksek engelleri aşmak gibi hareketler için gerekli yüksekliklere çıkabilmekte veya yürüyüş esnasında bacak yapılandırmasını değiştirebilmektedir. Bu derlemenin yazıldığı tarihte, ETHzürich bünyesinde ANYmal robotunun geliştirilmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir [181–184].

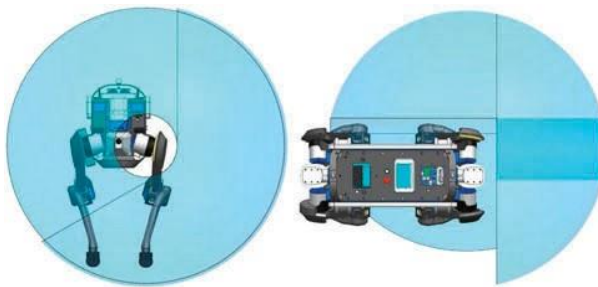
Son olarak, yine bu derlemenin yazıldığı tarihlerde halen dört ayaklı robotlar üzerine çalışmalarının devam ettiği Mete Kalyoncu ve ekibi tarafından, ilk olarak Selçuk Üniversitesi ve daha sonra Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde olmak üzere, literatürdeki başarılı dört ayaklı robotlarda olduğu gibi yine hidrolik tahrikli bir dört ayaklı robot geliştirilebilmek için araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Yukarıda değinildiği üzere birçok başarılı robotun başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olmasından dolayı, Kalyoncu ve ekibi çalışmalarına, dört ayaklı bir robot için bir bacak tasarımı da dahil olmak üzere, ilk önce yürüyüşün kendisi ile değil de yürüyüş performansını doğrudan etkileyen adım atma performansı ve adım kontrolü üzerine yaptıkları

araştırmalar ile başlamışlardır. Devamında farklı çalışma şartları için adım refleksinin iyileştirilmesi ile yürüyüş performansının artırılması ve dört ayaklı bir robotun ters kinematik analizi gibi konular üzerine yaptıkları araştırmalar ile çalışmalarına devam etmişlerdir [185–191].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Literatürde yeni olmamasına rağmen, son yıllarda araştırmacılar mobil robotlar ile ilgili yaptıkları çalışmalarda BigDog, ASIMO, HyQ ve ANYmal gibi robotların yarattığı etki ile genelde ayaklı robotlar üzerine odaklanmıştır ve ayaklı robotlarla ilgili çalışmaların sayısında artan bir eğilim gözlenmektedir. Bu eğilimin bir sonucu olarak, son on yılda, ayaklı robot literatürüne birçok yeni robot tasarımı eklenmiştir. Bunun ana sebebi, ayaklı robotların, diğer hareketlilik yöntemlerine göre engebeli ve zorlu araziler üzerinde daha iyi bir performans gösterdiği ve yeryüzünün çok az bir parçasının konvansiyonel hareketlilik yöntemleri ile ulaşılabilir olduğu gerçeğidir.

Bahsedilen gelişmelere ve diğer mobil robotlara olan üstünlüklerine rağmen, ayaklı robotlar ile ilgili yapılan çalışmalar henüz deneysel ortamların ötesine geçememiştir. Araştırmacılar tarafından geçtiğimiz on yılda geliştirilen ve günümüzde üzerinde araştırmalara devam edilen birçok ayaklı robot, kararlı bir şekilde yürüme, koşma, zıplama gibi dinamik hareketleri ancak engebesiz ve düz bir zeminde yapabilmektedir ve üstelik bu robotların, endüstriyel veya günlük işlerde destek eleman olarak diğer mobil robotlar gibi tam anlamıyla kullanımı henüz mümkün değildir. Bunun başlıca sebebi, ayaklı robotların yapısından dolayı çok yüksek derecede doğrusal olmayan kararsız dinamik özellikler göstermesi ile birlikte çok serbestlik dereceli kararsız bir sistemin



(a) ANYmal robotuna ait bacak hareket aralığı (Leg movement range of the ANYmal robot)



(b) ANYmal robotuna ait çeşitli yapılandırmalar (Various configurations of ANYmal robot.)

Şekil 38. Tamamen dönebilen bacak eklemleri sayesinde ANYmal robotunda elde edilen bacak hareket aralığı ve robota ait farklı bacak yapılandırmaları (Hutter ve ark.'nin [180] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The leg movement range obtained from ANYmal robot by courtesy of the fully rotatable leg joints, and the different leg configurations of the robot (adapted from the work of Hutter et al. [180]))

gerçek zamanlı kontrolünün oldukça güç ve karmaşık olmasıdır. Buna ek olarak, mobil robotlarda enerji ihtiyacının sınırlı bir güç kaynağından karşılanması gerektiğinden çalışma sürelerinin kısıtlı olmasıdır. Bu bağlamda, ayaklı robotların yüksek hareketlilik kabiliyeti, kendini dengeleyebilme yeteneği ve enerji verimliliği gibi becerileri henüz yetersizdir ve bu yönlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Ayaklı robotlar alanında 1990'lı yıllardan günümüze 200 adetten fazla robot geliştirilmiştir ve bu robotların yaklaşık %20'sini dört bacaklı robotlar oluşturmaktadır. Ancak, yazarların tüm bilgisi dahilinde, ayaklı robotlar ile ilgili yapılan geniş kapsamlı bir derleme çalışması yoktur. Bu bağlamda, bu çalışmada, ayaklı robotların – özellikle dört bacaklı robotların – gelişim süreci ve dört bacaklı robotlar alanındaki en son gelişmeler ele alınmıştır. Yürüyüş üzerine yapılan ilk çalışmalar dahil olmak üzere, yürüyen robotların gelişim sürecine etki eden önemli çalışmalar ve dört bacaklı robot literatüründeki son gelişmeler benimsenen yürüyüş stratejilerine göre sınıflandırılarak sunulmuştur. Bu çalışmanın, ayaklı robotlar alanında dört bacaklı yürüyüş konusunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı ve aynı zamanda ayaklı robotlar ile ilgili gelecekteki çalışmalara bir başvuru kaynağı olacağı öngörülmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., “*Robot Modeling and Control*.” Wiley, (2005).
- [2] Nof, S.Y. ed., “*Handbook of Industrial Robotics*.” Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., (1999).
- [3] Silva, M.F., Machado, J.T., “A literature review on the optimization of legged robots.” *Journal of Vibration and Control*, 18 (12): 1753–1767, (2012).
- [4] Remy, C.D., “Optimal exploitation of natural dynamics in legged locomotion.” *Ph.D Thesis*, ETH Zurich, (2011).
- [5] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T., “The Development of Honda Humanoid Robot.” *International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1321–1326, (1998).
- [6] Sakagami, Y. et al., “The intelligent ASIMO: system overview and integration.” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2478–2483, (2002).
- [7] Chestnutt, J. et al., “Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid.” *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 629–634, (2005).
- [8] Raibert, M.H., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., “BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot.” *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2): 10822–10825, (2008).
- [9] de Santos, P.G., Garcia, E., Estremera, J., “*Quadrupedal Locomotion*.” London: Springer London, (2006).
- [10] Muybridge, E., “The attitudes of animals in motion.” *Journal of the Franklin Institute*, 115(4): 260–274, (1883).
- [11] Muybridge, E., “*The human figure in motion*.” New York, USA: Dover Publications, (1887).
- [12] Muybridge, E., “*Animals in motion*.” New York, USA: Dover Publications, (1957).
- [13] Lucas, E., “Huitieme Recreation – La Machine a Marcher.” *Recreations Mathematiques*, 4: 198–204, (1891).
- [14] Kaneko, M., Abe, M., Tanie, K., “A hexapod walking machine with decoupled freedoms.” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1(4): 183–190, (1985).
- [15] Wettergreen, D., Thorpe, C., Whittaker, R., “Exploring Mount Erebus by walking robot.” *Robotics and Autonomous Systems*, 11(3–4): 171–185, (1993).
- [16] Dederick, Z.P., Grass, I., Dredrick, Z.P., Grass, I., “Improvement in steam-carriage.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US75874A, (1868).
- [17] Ehrlich, A., “Vehicle propelled by steppers.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US1691233A, (1926).
- [18] Edward, S., Snell, E., “Reciprocating load carrier.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US2430537A, (1944).
- [19] Urschel, W.E., “Walking tractor.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US2491064A, (1945).
- [20] Rygg, L.A., “Mechanical Horse.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US491927A, (1893).
- [21] Eckert, J.P., Mauchly, J.W., “Electronic numerical integrator and computer.” Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US3120606A, (1947).
- [22] Shurkin, J.N., “*Engines of the mind: the evolution of the computer from mainframes to microprocessors*.” Norton, (1996).
- [23] Hutchinson, A.C., “Machines can walk.” *The Chartered Mechanical Engineer*, 11(10): 480–484, (1967).
- [24] Todd, D.J., “*Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*.” Boston, MA: Springer US, (1985).
- [25] Mann, M., “Tanks that Walk and Jump.” *Popular Science*, 1771: 51–54, (1960).
- [26] Bekker, M.G., “Land Locomotion on the Surface of Planets.” *ARS Journal*, 32(11): 1651–1659, (1962).
- [27] Bekker, M.G., “Mechanics of Off-the-Road Locomotion.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, 16(1): 25–44, (1962).
- [28] Bekker, M.G., “Mechanics of Locomotion and Lunar Surface Vehicle Concepts.” *SAE Technical Paper Series*. 549–569, (1964).
- [29] Bekker, M.G., “Off-road locomotion on the moon and on earth.” *Journal of Terramechanics*, 3(3): 83–91, (1966).
- [30] Liston, R.A., “Requirements for Increased Ground Mobility.” (1963).
- [31] Liston, R.A., “Walking machines.” *Journal of Terramechanics*, 1 (3): 18–31, (1964).
- [32] Liston, R.A., “Correlation Between Predicted and Actual Off-Road Vehicle Performance.” *SAE Technical Paper 670170*, (1967).
- [33] Liston, R.A., “Walking Machine Studies and Force-Feedback Controls.” *Biomechanics*. Boston, MA: Springer US, 51–64, (1969).
- [34] Shigley, J.E., *The mechanics of walking vehicles*. Army Tank-Automotive Center, Warren, MI, USA, (1960).

- [35] Mosher, R.S., "Handyman to Hardiman." *SAE Transactions*, 76: 588–597, (1968).
- [36] Mosher, R., "Test and evaluation of a versatile walking truck." *Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium*. Washington DC, 359–379, (1968).
- [37] Mosher, R.S., "Exploring the Potential of a Quadruped." *SAE Technical Paper 690191*, (1969).
- [38] Liston, R.A., Mosher, R.S., "A versatile walking truck." *Proceedings of the Transportation Engineering Conference*. London: Institution of Civil Engineers, (1968).
- [39] Raibert, M.H., "Legged robots." *Communications of the ACM*, 29 (6): 499–514, (1986).
- [40] Morrison, R.A., "Iron Mule Train." *Proceedings of Off Road Mobility Research Symposium*. 381–400, (1968).
- [41] Todd, D.J., "An evaluation of mechanically co-ordinated legged locomotion (The Iron Mule Train revisited)." *Robotica*, 9 (04): 417, (1991).
- [42] Tomovic, R., Mcghee, R.B., "A finite state approach to the synthesis of bioengineering control systems." *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-7 (2): 65–69, (1966).
- [43] Mcghee, R.B., "Finite state control of quadruped locomotion." *Simulation*, 9(3): 135–140, (1967).
- [44] Mcghee, R.B., "Some finite state aspects of legged locomotion." *Mathematical Biosciences*, 2(1–2): 67–84, (1968).
- [45] Mcghee, R.B., Frank, A.A., "On the stability properties of quadruped creeping gaits." *Mathematical Biosciences*, 3(1–2): 331–351, (1968).
- [46] Frank, A.A., Mcghee, R.B., "Some considerations relating to the design of autopilots for legged vehicles." *Journal of Terramechanics*, 6(1): 23–35, (1969).
- [47] Frank, A.A., "Automatic Control Systems for Legged Locomotion Machines." University of Southern California, (1968).
- [48] Bekey, G.A., "Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control." MIT Press, (2005).
- [49] Mcghee, R.B., Jain, A.K., "Some properties of regularly realizable gait matrices." *Mathematical Biosciences*, 13(1–2): 179–193, (1972).
- [50] Mcghee, R.B., Pai, A.L., "An approach to computer control for legged vehicles." *Journal of Terramechanics*, 11(1): 9–27, (1974).
- [51] Gubina, F., Hemaml, H., Mcghee, R.B., "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-21 (2): 102–108, (1974).
- [52] Vukobratović, M., Juricic, D., "Contribution to the synthesis of biped gait." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-16(1): 1–6, (1969).
- [53] Vukobratović, M., Stepanenko, J., "Mathematical models of general anthropomorphic systems." *Mathematical Biosciences*, 17(3–4): 191–242, (1973).
- [54] Vukobratović, M., Stepanenko, J., "On the stability of anthropomorphic systems." *Mathematical Biosciences*, 15 (1–2): 1–37, (1972).
- [55] Vukobratović, M., "Locomotion Robots: Kinematics, Dynamics and Control Algorithms." *5th IFAC Symposium on Automatic Control in Space*. (1973).
- [56] Vukobratović, M., Borovac, B., Šurdilović, D., "Zero moment point - Proper interpretation and new applications." *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*. 237–244, (2001).
- [57] Frank, A.A., Vukobratović, M., "On the synthesis of biped locomotion machines." *Proceedings of 8th International Conference on Medical and Biological Engineering, Evanston, IL*. 64, (1969).
- [58] Vukobratović, M., Frank, A.A., Juricic, D., "On the stability of biped locomotion." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-17(1): 25–36, (1970).
- [59] Vukobratović, M., Juricic, D., Frank, A.A., "On the control and stability of one class of biped locomotion systems." *Journal of Basic Engineering*, 92(2): 328–332, (1970).
- [60] Frank, A.A., Vukobratović, M., "On the gait stability of biped machines." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 15 (6): 678–679, (1970).
- [61] McGhee, R.B., "Control of legged locomotion systems." *Proceedings of the 18th Automatic Control Conference, San Francisco, CA, USA*. 205–215, (1977).
- [62] Mcghee, R.B., Iswandhi, G.I., "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9 (4): 176–182, (1979).
- [63] Mcghee, R.B., Koozekanani, S.H., Weimer, F.C., Rahmani, S., "Dynamic modelling of human locomotion." *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference*, 16: 405–413, (1979).
- [64] Mcghee, R.B., "Mathematical models for dynamics and control of posture and gait." *Proceedings of the VII International Congress of Biomechanics, Warsaw, Poland*. 18–22, (1979).
- [65] Mcghee, R.B., Olson, K.W., Briggs, R.L., "Electronic coordination of joint motions for terrain - Adaptive robot vehicles." *SAE Technical Papers*, (1980).
- [66] Orin, D.E., Mcghee, R.B., "Dynamic computer simulation of robotic mechanisms." *Theory and Practice of Robots and Manipulators*, 286–296, (1981).
- [67] Holland, J.M., "Basic robotic concepts." Indianapolis: Howard W. Sams & Company, (1983).
- [68] Waldron, K.J., Vohnout, V.J., Pery, A., Mcghee, R.B., "Configuration design of the adaptive suspension vehicle." *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2): 37–48, (1984).
- [69] Waldron, K.J., Mcghee, R.B., "The mechanics of mobile robots." *Robotics*, 2(2): 113–121, (1986).
- [70] Waldron, K.J., Mcghee, R.B., "The adaptive suspension vehicle." *IEEE Control Systems Magazine*, 6 (6): 7–12, (1986).
- [71] Song, S., Waldron, K.J., "Machines that walk: the adaptive suspension vehicle." MIT press, (1989).
- [72] Todd, D.J., "Current developments." *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Boston, MA: Springer US, 151–168, (1985).
- [73] Gurfinkel, V.S.S. et al., "Walking robot with supervisory control." *Mechanism and Machine Theory*, 16 (1): 31–36, (1981).
- [74] Devjanin, E.A. et al., "The six-legged walking robot capable of terrain adaptation." *Mechanism and Machine Theory*, 18 (4): 257–260, (1983).
- [75] Hirose, S., Umetani, Y., "Some considerations on a feasible walking mechanism as a terrain vehicle." *3rd CISM-IFTOMM International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. 357–375, (1978).
- [76] Hirose, S., Umetani, Y., "A Cartesian coordinates manipulator with articulated structure." *Proceedings of 11th International Symposium Industrial Robots*. 603–609, (1981).
- [77] Hirose, S., Kato, K., "Study on quadruped walking robot

- in Tokyo Institute of Technology – past, present and future.” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 414–419, (2000).
- [78] Hirose, S., Arikawa, K., “Coupled and decoupled actuation of robotic mechanisms.” *Advanced Robotics*, 15 (2): 125–138, (2001).
- [79] Hirose, S., “A study of design and control of a quadruped walking vehicle.” *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2): 113–133, (1984).
- [80] de Santos, P.G., Garcia, E., Estremera, J., “Walking Robots.” *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. London: Springer London, 3–32, (2006).
- [81] Hirose, S., “TITAN–III: A Quadruped Walking Vehicle - Its Structure and Basic Characteristics.” *Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics Research*. The MIT Press, 325–331, (1985).
- [82] Hirose, S., Yoneda, K., Arai, K., Ibe, T., “Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN–VI.” *Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Robotics, “Robots in Unstructured Environments.”* 723–728, (1991).
- [83] Hirose, S., Kunieda, O., “Generalized Standard Foot Trajectory for a Quadruped Walking Vehicle.” *The International Journal of Robotics Research*, 10 (1): 3–12, (1991).
- [84] Hirose, S., Yoneda, K., Tsukagoshi, H., “TITAN–VII: quadruped walking and manipulating robot on a steep slope.” *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 494–500, (1997).
- [85] Hirose, S., Arikawa, K., “Development of Quadruped Walking Robot TITAN–VIII for Commercially Available Research Platform.” *Journal of the Robotics Society of Japan*, 17: 1191–1197, (1999).
- [86] Kato, K., Hirose, S., “Development of the quadruped walking robot, TITAN–IX.” *Proceedings of 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 40–45, (2000).
- [87] Hodoshima, R. et al., “Development of TITAN–XI: a quadruped walking robot to work on slopes.” *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 792–797, (2004).
- [88] Hodoshima, R., Fukumura, Y., Amano, H., Hirose, S., “Development of track-changeable quadruped walking robot TITAN X-design of leg driving mechanism and basic experiment-.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 3340–3345, (2010).
- [89] Kitano, S., Hirose, S., Endo, G., Fukushima, E.F., “Development of lightweight sprawling-type quadruped robot TITAN–XIII and its dynamic walking.” *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6025–6030, (2013).
- [90] Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A., Endo, G., “TITAN–XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking.” *ROBOMECH Journal*, 3 (1): 8, (2016).
- [91] Christian, D.A., “*The Mt. Erebus Explorer Control System*.” Pittsburgh, PA, (1993).
- [92] Wettergreen, D., “Robotic Walking on Natural Terrain: Gait planning and behavior-based control for statically-stable walking robots.” Carnegie Mellon University, (1995).
- [93] Tedeschi, F., Carbone, G., “Design of Hexapod Walking Robots: Background and Challenges.” *Handbook of Research on Advancements in Robotics and Mechatronics*. Hershey, PA: IGI Global, 527–566, (2015).
- [94] Nonami, K., “Development of mine detection robot COMET–II and COMET–III.” *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*. 346–351, (2002).
- [95] Huang, Q., Nonami, K., “Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control.” *Mechatronics*, 13 (8): 773–790, (2003).
- [96] Nonami, K. et al., “Development and Control of Mine Detection Robot COMET–II and COMET–III.” *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46 (3): 881–890, (2003).
- [97] Irawan, A., Nonami, K., Daud, M.R., “Optimal Impedance Control with TSK-Type FLC for Hard Shaking Reduction on Hydraulically Driven Hexapod Robot.” *Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned Systems* (Editors, K. Nonami et al.). Tokyo: Springer Japan, 223–236, (2013).
- [98] Oku, M. et al., “Development of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET–IV : The 1st Report : System Design and Configuration.” *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics*, 2007: G01-1--3, (2007).
- [99] Nonami, K., Barai, R.K., Irawan, A., Daud, M.R., “*Hydraulically Actuated Hexapod Robots*.” Tokyo: Springer Japan, (2014).
- [100] James, I., “Claude Elwood Shannon 30 April 1916 – 24 February 2001.” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 55: 257–265, (2009).
- [101] Higdon, D.T., Cannon, R.H., “On the control of unstable multiple-output mechanical systems.” *ASME Winter Annual Meeting*. (1963).
- [102] Schaffer, J., Cannon, R.H., “On the Control of Unstable Mechanical Systems.” *Automatic and Remote Control III: Proceedings of the Third Congress of the International Federation of Automatic Control*. (1966).
- [103] Hemami, H., Golliday, C.L., “The inverted pendulum and biped stability.” *Mathematical Biosciences*, 34(1–2): 95–110, (1977).
- [104] Poulakakis, I., Grizzle, J.W., “The spring loaded inverted pendulum as the hybrid zero dynamics of an asymmetric hopper.” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8): 1779–1793, (2009).
- [105] Piovani, G., Byl, K., “Enforced symmetry of the stance phase for the Spring-Loaded Inverted Pendulum.” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1908–1914, (2012).
- [106] Bae, H., Oh, J.-H., “Biped robot state estimation using compliant inverted pendulum model.” *Robotics and Autonomous Systems*, 108: 38–50, (2018).
- [107] Frank, A.A., “An approach to the dynamic analysis and synthesis of biped locomotion machines.” *Medical & Biological Engineering*, 8 (5): 465–476, (1970).
- [108] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., Kato, I., “The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10 RD.” *Journal of the Robotics Society of Japan*, 3(4): 325–336, (1985).
- [109] Yamaguchi, J., Takanishi, A., Kato, I., “Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion.” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1 (C): 561–566, (1993).
- [110] Yamaguchi, J., Kinoshita, N., Takanishi, A., Kato, I., “Development of a Dynamic Biped Walking System

- for Humanoid - Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Humans' Living Floor." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1 (April): 232–239, (1996).
- [111] Lim, H.O., Ishii, A., Takanishi, A., "Emotion-based biped walking." *Robotica*, 22 (5): 577–586, (2004).
- [112] Lim, H.O., Takanishi, A., "Compensatory motion control for a biped walking robot." *Robotica*, 23(1): 1–11, (2005).
- [113] Lim, H.O., Takanishi, A., "Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365 (1850): 49–64, (2007).
- [114] Hashimoto, K. et al., "Biped walking stabilization based on gait analysis." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 154–159, (2012).
- [115] Kryczka, P. et al., "Walking despite the passive compliance: Techniques for using conventional pattern generators to control intrinsically compliant humanoid robots." *Nature-Inspired Mobile Robotics*. World Scientific Publishing Co., 487–494, (2013).
- [116] Miura, H., Shimoyama, I., "Dynamic Walk of a Biped." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 60–74, (1984).
- [117] Kimura, H., Shimoyama, I., Miura, H., "Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot." *Advanced Robotics*, 4(3): 283–301, (1989).
- [118] Bezerra, C.A.D., Zampieri, D.E., "Biped Robots: The State of Art." *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Dordrecht: Springer Netherlands, 371–389, (2004).
- [119] Matsuoka, K., "A model of repetitive hopping movements in man." *Proceedings of 5th World Congress of Theory of Machines and Mechanisms*. 1168–1171, (1979).
- [120] Matsuoka, K., "A mechanical model of repetitive hopping movements." *Biomechanisms*, 5: 251–258, (1980).
- [121] Sayyad, A., Seth, B., Seshu, P., "Single-legged hopping robotics research – A review." *Robotica*, 25(5): 587–613, (2007).
- [122] Todd, D.J., "A brief history of walking machines." *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Boston, MA: Springer US, 11–33, (1985).
- [123] Semini, C., "HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot." *Ph.D Thesis*, University of Genoa, (2010).
- [124] Popović, M.B., "*Biomechanics and Robotics*." New York: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., (2013).
- [125] Nelson, G. et al., "PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing." *Journal of the Robotics Society of Japan*, 30(4): 372–377, (2012).
- [126] Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C.G., Kim, J., "Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals." *IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. 1028–1035, (2015).
- [127] Saranlı, U., Buehler, M., Koditschek, D.E., "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot." *The International Journal of Robotics Research*, 20 (7): 616–631, (2001).
- [128] Raibert, M.H. et al., "Dynamically Stable Legged Locomotion Progress Report: October 1982–October 1983." (1983).
- [129] Raibert, M.H., Chepponis, M., Brown, H., "Running on four legs as though they were one." *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(2): 70–82, (1986).
- [130] Raibert, M.H. et al., "Dynamically Stable Legged Locomotion." (1989).
- [131] Raibert, M.H., Brown, H.B., "Experiments in Balance with a 2D One-Legged Hopping Machine." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 106(1): 75–81, (1984).
- [132] Raibert, M.H., Brown, H.B., Chepponis, M., "Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 75–92, (1984).
- [133] Poulakakis, I., "Spring Loaded Inverted Pendulum embedding: Extensions toward the control of compliant running robots." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 5219–5224, (2010).
- [134] Schwind, W.J., Koditschek, D.E., "Approximating the Stance Map of a 2-DOF Monoped Runner." *Journal of Nonlinear Science*, 10 (5): 533–568, (2000).
- [135] Hodgins, J.K.K., Raibert, M.H., "Adjusting step length for rough terrain locomotion." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3): 289–298, (1991).
- [136] Sutherland, I.E., Ullner, M.K., "Footprints in the Asphalt." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 29–36, (1984).
- [137] Buehler, M. et al., "SCOUT: a simple quadruped that walks, climbs, and runs." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1707–1712, (1998).
- [138] Buehler, M., Cocosco, A., Yamazaki, K., Battaglia, R., "Stable open loop walking in quadruped robots with stick legs." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2348–2353, (1999).
- [139] Battaglia, R.F., "Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary Stair-Climbing." McGill University, (1999).
- [140] Poulakakis, I., Smith, J.A., Buehler, M., "Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II Robot." *The International Journal of Robotics Research*, 24(4): 239–256, (2005).
- [141] Kimura, H., Fukuoka, Y., "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain by Using Neural System Model." *IFAC Proceedings Volumes*, 33(26): 585–590, (2000).
- [142] Kimura, H., Fukuoka, Y., Konaga, K., "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot using a neural system model." *Advanced Robotics*, 15(8): 859–878, (2001).
- [143] Kimura, H., Fukuoka, Y., Katabuchi, H., "Mechanical Design of a Quadruped 'Tekken3&4'" and Navigation System Using Laser Range Sensor." *International Symposium on Robotics*. 10, (2005).
- [144] Kimura, H., Fukuoka, Y., Cohen, A.H., "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts." *International Journal of Robotics Research*, 26(5): 475–490, (2007).
- [145] Fukuoka, Y., Katabuchi, H., and Hiroshi Kimura, "Dynamic Locomotion of Quadrupeds Tekken3&4 Using Simple Navigation." *Journal of Robotics and Mechatronics*, 22(1): 36–42, (2010).
- [146] Playter, R., Buehler, M., Raibert, M.H., "BigDog." *Proceedings of the Unmanned Systems Technology VIII, Defense and Security Symposium* (Editors, G. R. Gerhart et al.). 62302O, (2006).
- [147] Semini, C. et al., "HyQ - Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype." *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on*

- Biomedical Robotics and Biomechanics*. Scottsdale, AZ, USA: IEEE, 593–599, (2008).
- [148] Semini, C., Tsagarakis, N.G., Guglielmino, E., Caldwell, D.G., “Design and experimental evaluation of the hydraulically actuated prototype leg of the HyQ robot.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3640–3645, (2010).
- [149] Yang, Y. et al., “Leg mechanisms for hydraulically actuated robots.” *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, MO, USA: IEEE, 4669–4675, (2009).
- [150] Semini, C. et al., “Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225(6): 831–849, (2011).
- [151] Semini, C. et al., “Is Active Impedance the Key to a Breakthrough for Legged Robots?” *Robotics Research*. Springer International Publishing, 3–19, (2016).
- [152] Focchi, M. et al., “Torque-control based compliant actuation of a quadruped robot.” *International Workshop on Advanced Motion Control*. Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, 1–6, (2012).
- [153] Boaventura, T. et al., “On the role of load motion compensation in high-performance force control.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 4066–4071, (2012).
- [154] Havoutis, I. et al., “Onboard perception-based trotting and crawling with the Hydraulic Quadruped Robot (HyQ).” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6052–6057, (2013).
- [155] Ugurlu, B., Havoutis, I., Semini, C., Caldwell, D.G., “Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot – HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control.” *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6044–6051, (2013).
- [156] Semini, C. et al., “Towards versatile legged robots through active impedance control.” *The International Journal of Robotics Research*, 34(7): 1003–1020, (2015).
- [157] Winkler, A.W. et al., “Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 5148–5154, (2015).
- [158] Boaventura, T., Buchli, J., Semini, C., Caldwell, D.G., “Model-Based Hydraulic Impedance Control for Dynamic Robots.” *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6): 1324–1336, (2015).
- [159] Semini, C. et al., “Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2): 635–646, (2017).
- [160] Barasuol, V. et al., “A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 2554–2561, (2013).
- [161] Havoutis, I., Semini, C., Buchli, J., Caldwell, D.G., “Quadrupedal trotting with active compliance.” *Proceedings of the International Conference on Mechatronics*. 610–616, (2013).
- [162] Bazeille, S. et al., “Quadruped robot trotting over irregular terrain assisted by stereo-vision.” *Intelligent Service Robotics*, 7(2): 67–77, (2014).
- [163] Winkler, A. et al., “Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 6476–6482, (2014).
- [164] Bellicoso, C.D. et al., “Advances in real-world applications for legged robots.” *Journal of Field Robotics*, 35(8): 1311–1326, (2018).
- [165] Fisler, J., “Maximum high jump with a robotic leg.” *MsC Thesis*, ETH Zurich, (2008).
- [166] Hutter, M., Remy, C.D., Siegart, R., “Design of an Articulated Robotic Leg with Nonlinear Series Elastic Actuation.” *Mobile Robotics: Solutions and Challenges, Proceedings of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. World Scientific, 645–652, (2009).
- [167] Hutter, M., Remy, C.D., Hoepflinger, M.A., Siegart, R., “ScarLETH: Design and control of a planar running robot.” *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 562–567, (2011).
- [168] Belo, F.A.W. et al., “The ESA Lunar Robotics Challenge: Simulating operations at the lunar south pole.” *Journal of Field Robotics*, 29(4): 601–626, (2012).
- [169] Hoepflinger, M.A., Remy, C.D., Hutter, M., Siegart, R., “The quadruped ALoF and a step towards real world haptic terrain classification.” *Proceedings of the 12th Mechatronics Forum Biennial International Conference*. Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich Switzerland, 1–8, (2010).
- [170] Remy, C.D. et al., “Walking and crawling with ALoF: a robot for autonomous locomotion on four legs.” *Industrial Robot: An International Journal*, 38 (3): 264–268, (2011).
- [171] Hutter, M., “StarLETH & Co.–Design and Control of Legged Robots with Compliant Actuation.” *Ph.D Thesis*, ETH Zurich, (2013).
- [172] Remy, C.D. et al., “Quadrupedal Robots with Stiff and Compliant Actuation.” *at - Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 60 (11): 682–691, (2012).
- [173] Hutter, M., Remy, C.D., Hoepflinger, M.A., Siegart, R., “Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (2): 449–458, (2013).
- [174] Gehring, C. et al., “Towards automatic discovery of agile gaits for quadrupedal robots.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 4243–4248, (2014).
- [175] Hutter, M. et al., “Toward Combining Speed, Efficiency, Versatility, and Robustness in an Autonomous Quadruped.” *IEEE Transactions on Robotics*, 30(6): 1427–1440, (2014).
- [176] Hutter, M. et al., “Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control.” *The International Journal of Robotics Research*, 33(8): 1047–1062, (2014).
- [177] Gehring, C. et al., “Dynamic trotting on slopes for quadrupedal robots.” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 5129–5135, (2015).
- [178] Gehring, C. et al., “Practice Makes Perfect: An Optimization-Based Approach to Controlling Agile Motions for a Quadruped Robot.” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 23(1): 34–43, (2016).

- [179] Hutter, M. et al., "ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot." **2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. Daejeon, South Korea: IEEE, 38–44, (2016).
- [180] Hutter, M. et al., "ANYmal - toward legged robots for harsh environments." **Advanced Robotics**, 31(17): 918–931, (2017).
- [181] Bellicoso, C.D., Jenelten, F., Gehring, C., Hutter, M., "Dynamic Locomotion Through Online Nonlinear Motion Optimization for Quadrupedal Robots." **IEEE Robotics and Automation Letters**, 3(3): 2261–2268, (2018).
- [182] Fankhauser, P., "Perceptive Locomotion for Legged Robots in Rough Terrain." **Ph.D Thesis**, ETH Zurich, (2018).
- [183] Winkler, A.W., "Optimization-based motion planning for legged robots." **Ph.D Thesis**, ETH Zurich, (2018).
- [184] Fankhauser, P., Hutter, M., "ANYmal: A Unique Quadruped Robot Conquering Harsh Environments." **Research Features**, 126: 54–57, (2018).
- [185] Bakırcıoğlu, V., Arif Şen, M., Kalyoncu, M., "Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot." **MATEC Web of Conferences**, 42: 03004, (2016).
- [186] Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Optimal Tuning of PID Controller Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Quadruped Robot." **Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering**, 6(1): 29–35, (2018).
- [187] Şen, M.A., Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., "Automatic LQR Controller Tuning Based on Grey Wolf Optimizer Algorithm for a Quadruped Robot." **2nd International Vocational Science Symposium**. (2018).
- [188] Bakırcıoğlu, V., Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Motion Analysis of the Robotic Leg Mass Centre during Reference Trajectory Tracking." **2nd International Vocational Science Symposium**. (2018).
- [189] Bakırcıoğlu, V., Şen, M., A., Kalyoncu, M., "Obtaining Dynamic Characteristics of of Parker D1FP Proportional Valve." **International Conference on Engineering Technologies** (Editor,İ. Sarıtaş). Konya, Turkey, 662–668, (2017).
- [190] Bakırcıoğlu, V., Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Adaptive Neural-Network Based Fuzzy Logic (ANFIS) Based Trajectory Controller Design for One Leg of a Quadruped Robot." **Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering - ICMCE '16**. Venice, Italy: ACM Press, 82–85, (2016).
- [191] Şen, M.A., Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., "Inverse Kinematic Analysis of a Quadruped Robot." **International Journal of Scientific & Technology Research**, 6(9): 285–289, (2017).