

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.014

具有可控柔性的双足行走机器人研究进展综述

黄岩, 王启宁, 谢广明

(北京大学工学院智能控制实验室, 北京 100871)

摘要: 为了增强机器人的行走效率, 使机器人的步态更自然, 并有助于机器人实现复杂的运动, 在双足行走机器人中加入可控的柔性。在概述柔性可控双足行走机器人发展背景的基础上, 介绍国内外基于主动控制和基于被动行走的 2 类柔性可控双足行走机器人的研究现状, 针对目前柔性可控双足行走机器人面临的 4 大主要问题, 提出其未来的发展趋势, 主要包括: 将柔性驱动器应用到柔性可控的双足行走机器人中; 研究控制柔性的方法; 将双足机器人与生物学研究相结合; 在假肢、外骨骼等辅助行走设备中应用可控柔性。该研究可为实现效率高、步态自然、实用性强的双足行走机器人提供相关理论、方法及技术支持。

关键词: 动态双足行走; 双足机器人; 关节柔性; 柔性驱动器; 动力学建模

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Review of Bipedal Walking Robots with Adaptable Compliance

Huang Yan, Wang Qining, Xie Guangming

(Intelligent Control Laboratory, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to improve walking efficiency, make walking gaits more natural and help robots realize complex motions, we introduce adaptable compliance to bipedal walking robots. Based on the review of the progress of bipedal walking robots with adaptable compliance, this paper presents the state-of-the-art research of both active and passive bipedal walking robots with adaptable compliance. For the four main problems in current studies, this paper predicts the tendency of bipedal walking robots with adaptable compliance, including applying compliant actuators in bipedal walking robots with adaptable compliance, study of compliance control methods, combination of bipedal robots and biological research, and applications of adaptable compliance in auxiliary walking devices such as prostheses and exoskeletons. This paper provides relevant theories, methods and technologies for obtaining bipedal walking robots with high efficiency, natural gaits and high versatility.

Key words: dynamic bipedal walking; bipedal robots; joint compliance; compliant actuators; dynamics modeling

0 引言

近年来, 对双足行走运动的研究成为了力学、机械、控制、机器人学、生物学、心理学等学科的热点问题。与大多数四足或六足的动物相比, 人类的双足行走运动可以把上肢解放出来, 在运动的过程中完成其他的任务, 且可以实现在更复杂、更崎岖的环境中运动; 同时, 人类的双足运动在稳定性的控制上也具有更高的要求。自 20 世纪 90 年代以来, 对双足行走机器人的研究成为了国内外学者关注的一个热点问题。将基于主动控制的双足运动与基于被动行走的双足运动相结合, 对于提高双足机器人的运动效率, 实现多种运动步态都有十分重要的意义。笔者对柔性可控双足行走机器人的发展背景、研究现状、研究面临的主要问题和未来的发展趋势进行探讨。

1 研究背景

1.1 研究双足行走运动的意义

研究双足行走机器人的目的和意义主要体现在

以下 2 个方面:

1) 设计、研制高效、稳定的双足机器人及辅助行走设备, 推进工程技术的进步。

从上个世纪开始, 各国科学家一直致力于研制具有双足运动能力的仿人机器人。双足机器人可以帮助人们在复杂的环境下作业、为人类服务。目前比较有代表性的是本田公司于 2000 年发布的双足机器人 ASIMO^[1], 高度为 120 cm, 重量 43 kg, 可以实现行走、舞蹈、上下楼梯等运动, 并可以与人交互, 完成推车、导游等任务。将双足运动的机理应用到人工智能假肢中, 进行助残和康复方面的研究也是双足运动领域的一个热点问题。麻省理工学院(massachusetts institute of technology, MIT)在 2009 年研制的一款人工智能假肢中, 参考了人类行走中踝关节柔性的特性, 加入了踝关节动力, 提高了假肢的运动效率^[2]。这些在机器人、人工智能假肢中的成果都表明, 对人类双足运动规律的研究, 可以促进工程应用领域中相关成果的转化。

收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61005082, 61020106005); 教育部博士点基金(20100001120005)

作者简介: 黄岩(1985—), 男, 北京人, 博士, 从事动态双足行走机器人、多机器人协作研究。

2) 通过对双足运动规律的研究,更好地理解人类双足行走的机理。

人类的双足行走运动是一个非常复杂的过程,需要包括下肢和躯干在内的很多块肌肉的协调配合,来达到稳定的行走^[3]。由于人类可以在各种复杂的环境中实现自然、稳定、高效的行走,人类的行走运动为研制双足机器人提供了一个很好的自然界的范本。通过对双足行走机器人以及双足运动建模的研究,可以帮助我们进一步探索、发现人类双足行走的机理。例如,一些研究在双足实体机器人或仿真模型中加入了脚趾,分析了具有脚趾关节的双足运动的特性与优势^[4-7],在一定程度上揭示了人类脚结构的进化意义。

1.2 双足行走机器人的分类

目前国内外对双足行走运动的研究,可以从稳定性角度和力学角度进行分类。

1.2.1 从稳定性的角度分类

从稳定性的角度,双足行走可以分为静态行走和动态行走。将能包容机器人足底与地面之间的所有接触点的最小多边形区域称为支撑多边形^[8],则在静态行走中,在运动过程中行走者的质心在地面上的投影始终不超过支撑多边形的范围。而在动态行走中,行走者的质心在地面上的投影在某些时刻会在支撑多边形之外。静态行走的优点是可以时刻保证稳定性,缺点是行走速度会受到极大的限制。动态行走中,很多机器人采用的是基于零力矩法(zero moment point, ZMP)的控制方法^[9]。这种机器人在行走过程中,支撑腿的脚掌与地面保持全接触的状态。相比于静态行走,基于 ZMP 的行走中的限制条件更宽松一些,机器人也可以实现在更大速度范围内的运动,但是在运动效率、步态自然性等方面依然和人类行走相差比较远^[10]。与基于 ZMP 控制的行走方式相比,基于极限环的行走(limit cycle walking)中的限制条件更为宽松。基于极限环行走的概念最早由 Hurmuzlu 等人提出^[11],Hobbelen 等人又进行了系统的整理^[12],其基本思想是:将行走运动看作一个极限环,不是在每时每刻都局部稳定,但是在整体上能形成稳定的周期运动序列。这种运动方式的双足机器人,具有更高的运动效率,而且更容易实现较高速度的行走。

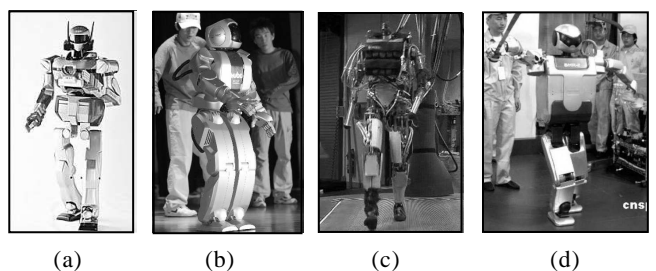
1.2.2 从力学角度分类

从生物力学角度,双足行走可以分为基于主动

控制的运动和基于被动行走的运动。基于主动控制的双足行走中,一般在所有关节都施加驱动,各个关节的运动轨迹是事先指定好的,根据期望的关节轨迹,计算各时刻所需要施加的驱动力矩,用轨迹跟踪的方法控制机器人各关节准确跟踪事先指定的轨迹。这种控制方法的优点在于:可以对机器人的运动方式进行精确的规划,机器人可以在驱动器功率允许的范围内完成各种复杂的运动,便于实现对双足运动的精确控制;缺点在于:能量消耗大,效率低,对驱动器的性能要求较高,步态不自然,与实际人类运动相差较大。基于被动行走的双足运动,一般不对各个关节的运动轨迹进行精确的规划,直接施加较简单的驱动和控制即可实现行走。这种行走的优点是运动效率高,步态自然,接近人类实际运动,制作相对简单,易于实现;缺点是控制难度高,运动的稳定性不容易保证,难以实现上下楼梯,跨越障碍物等较复杂的运动。

下面分别介绍比较有代表性的基于主动控制的和基于被动行走的双足机器人。

日本早稻田大学 1973 年研制的机器人 WABOT-1^[13]属于早期相对成熟的基于主动控制的双足机器人。WABOT-1 除了能进行双足行走以外,还具有视觉、听觉和触觉。1996 年,本田推出了仿人机器人 P2^[14]。P2 身高 180 cm,体重 210 kg,身上搭载计算机和电池,能实现双足稳定行走。此后,在 1997 年和 2000 年,本田又先后发布了双足机器人 P3 和 ASIMO^[1]。ASIMO 具有 26 个自由度,可以实现行走、上下楼梯、舞蹈等复杂的运动,还能慢速地奔跑。



(a) 日本研制的 HRP-2^[15-16]; (b) 韩国研制的 HUBO^[17];
(c) 美国波士顿动力公司研制的 PetMan^[18];
(d) 中国北京理工大学研制的 BRH-02^[19]

图 1 国内外研制的有代表性的基于主动控制双足机器人

日本东京大学在 1998 年至 2002 年期间研制的双足机器人 HRP-2^[15-16]身高 154 cm,体重 58 kg,如图 1(a)所示,可以在复杂的环境中行走,可以实现躺下、站立、跨越障碍物等运动。韩国高等科学

技术院研制了一系列双足机器人, 最新的一款是在 2004 年发布的 HUBO^[17], 身高 125 cm, 体重 55 kg, 如图 1(b)所示。该机器人可以跳舞、与人握手, 侧重与人的交互、为人类服务。图 1(c)为美国波士顿动力公司在 2011 年研制的最新军用设计的机器人“PetMan”^[18]。该机器人运动灵活, 能实现下蹲、俯卧撑等多种复杂步态, 行走速度可以达到 5.1 km/h。PetMan 即使受到较大的冲撞也能保持直立状态和身体平衡。我国北京理工大学在 2002—2005 年研制了双足机器人 BRH-01 和 BRH-02^[19], 该机器人可以感知自身的平衡状态, 能实现多种运动步态, 并能完成整套的太极拳动作, 如图 1(d)。

基于被动行走的双足机器人的主要思想是: 不在双足运动模型上施加较多的主动控制和驱动力, 更多地关注模型本身的动力学属性对运动的影响。Machon 和 McMahan 基于这种想法提出了“弹道行走(ballistic walking)”并进行了动力学分析^[20-21]。被动动态行走(passive dynamic walking)的概念在 1990 年由加拿大的学者 McGeer 提出^[22]。McGeer 建立了纯被动双足行走的动力学模型, 并进行了局部稳定性的分析。在此基础上, Garcia 等人提出了最简行走模型(the simplest walking model)^[23], Kuo 建立了加入髋关节力矩驱动的双足行走模型, 实现了在平面上的运动^[24]。之后, Wisse 等人研究了有上身的被动动态行走, 分析了上身的质量、长度对运动性质的影响^[25]。Hobbelen 等人建立了有平脚和踝关节的双足行走模型, 并在踝关节加入了驱动, 研究了对踝关节驱动的控制行走中的作用^[26-27]。北京大学的学者提出了具有关节柔性和平脚结构的行走模型, 研究了脚结构和关节柔性对运动性质的影响^[28-30]。浙江大学的研究人员研究了针对速度和步长的反馈控制方法^[31]。

基于这些对理论模型的分析, 国内外的研究者研制了一系列基于被动行走的双足机器人。最早的这类双足机器人可以追溯到 20 世纪 90 年代初 McGeer 制作的纯被动机器人^[22], 该机器人没有任何主动驱动或主动控制, 完全依靠重力的作用在下坡斜面上实现行走。该行走样机分为无膝关节和有膝关节 2 种, 腿长分别为 0.5 m 和 0.8 m, 可以在倾角为 0.025~0.05 rad 的斜坡上实现稳定行走。基于类似的原理, Cornell 大学研制了一款三维动态行走机器人^[32], 可实现在斜面上的三维稳定行走。

为了实现在平面上的行走, 很多研究机构尝试

在基于被动行走的机器人中加入简单的驱动。美国 Cornell 大学研制的另一款双足行走机器人^[10, 33], 腿长 0.81 m, 重 12.7 kg, 如图 2(a)所示。该机器人在 2 个踝关节处加入了弹簧和电机组成的驱动器, 可以实现速度为 0.44 m/s 的三维稳定行走。日本 Osaka 大学制作的双足机器人“Pneumat-BT”^[34], 高 1.12 m, 重 9.6 kg, 如图 2(b)所示。该机器人采用 McKibben 气动人工肌肉进行驱动, 能实现三维动态行走。“Denise”是荷兰 Delft 大学研制的三维动态行走机器人^[10, 35], 如图 2(c)所示。该机器人高 1.5 m, 重 8 kg, 使用 McKibben 人工肌肉作为驱动器, 膝关节和踝关节均为纯被动的关节, 可以实现速度为 0.4 m/s 的三维稳定行走。除了“Denise”之外, Delft 大学还研制了电机驱动的动态行走机器人“Flame”。“Flame”^[36]是电机驱动的可以实现三维行走的双足机器人, 高 1.3 m, 重 15 kg, 具有 6 个前进方向的关节(2 个髋关节、2 个膝关节、2 个踝关节), 还有一个侧向的髋关节, 可以克服 8 mm 的地面高度变化的扰动。德国 Jena 大学制作了一款电机驱动的双足机器人^[37], 高 45 cm, 重 2 kg, 如图 2(d)所示。该机器人中加入了弹簧等柔性结构, 模拟人类行走时肌肉的驱动方式。实验测试表明: 该机器人不但可以实现动态行走, 也可以实现奔跑运动, 最大速度可以达到 3.6 m/s。

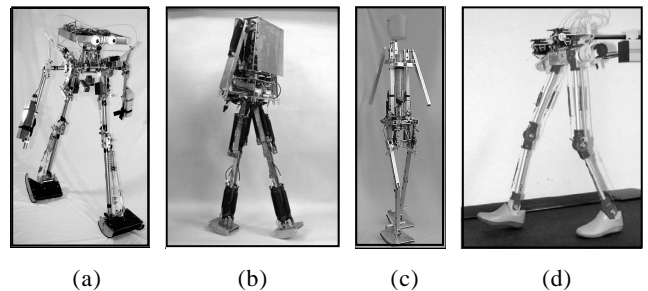


图 2 有代表性加入驱动的基于被动行走的双足机器人 (a) 美国 Cornell 大学研制的加入电机驱动的三维动态行走机器人^[10,33]; (b) 日本 Osaka 大学研制的双足机器人“Pneumat-BT”^[34]; (c) 荷兰 Delft 大学研制的三维动态行走机器人“Denise”^[10,35]; (d) 德国 Jena 大学制作的双足机器人^[37]

图 2 有代表性加入驱动的基于被动行走的双足机器人

近年来, 国内的研究机构也进行了基于被动行走的双足机器人的研究。清华大学研究了被动动态行走的动力学模型和仿真实验^[38], 并研制了一批有驱动的动态行走机器人^[39-40]。北京大学智能控制实验室从 2006 年开始进行动态双足行走研究, 研制出有上身、柔性膝关节和踝关节的动态行走机器人, 并分析了机器人在不同地面环境中的运动能力^[41-42]。

本节介绍的这 2 种分类方式之间也存在着联系。一般来说, 目前很多常见的基于主动控制的机器人, 用的是基于 ZMP 的控制方法, 而基于被动行走的机器人, 属于基于极限环的行走方式。

1.3 柔性可控双足行走的研究意义

如前文所述, 基于主动控制和基于被动行走的双足机器人分别具有各自的优势, 也都有不足的地方。现在很多学者都意识到, 未来双足机器人的发展趋势, 是将主动控制与被动行走相结合^[43], 制作出既有较高的效率和自然的步态又能实现多种运动、有较强的实用性的机器人。图 3 是这种发展趋势的示意图。

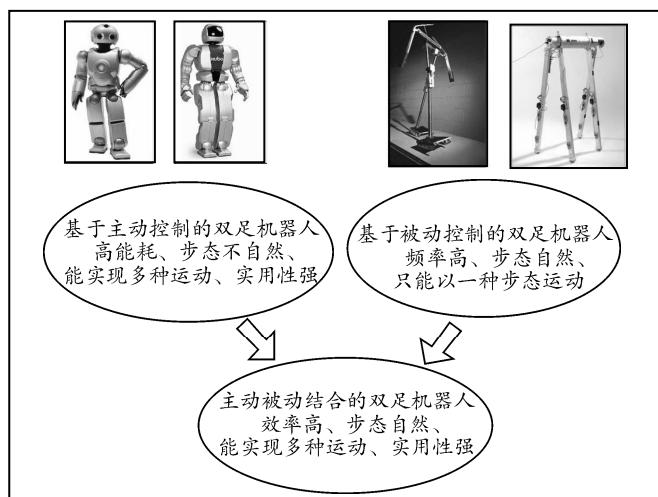


图 3 双足机器人研究的发展趋势: 主动控制与被动行走相结合的双足机器人^[44]

目前国际上有很多研究机构已经开展了主动与被动结合的双足行走的相关研究, 其中最主要的方法就是在双足机器人中加入可控的柔性。这些研究可以分为 2 种类型: 一种是在主动控制的双足行走上进行改进, 例如加入柔性驱动器, 开发系统自身的动力学特性, 减少主动控制, 达到减小能量消耗、提高运动效率的目标; 另一种是在基于被动行走的双足运动中加入各种可控的单元, 在保持高效、自然等特性的同时, 实现以不同的速度、步态运动, 达到提高实用性的目的。

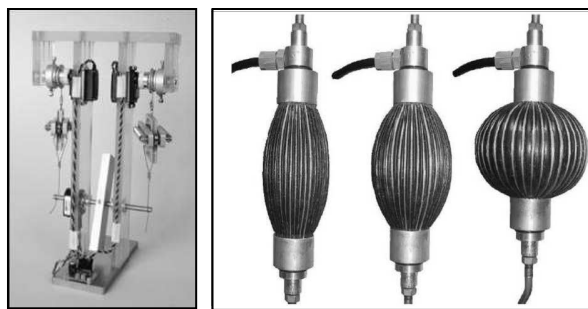
2 国内外研究现状

2.1 主动控制的柔性可控双足机器人研究现状

在早期对机器人的研究中, 人们更重视对位置的精确控制, 所使用的驱动器大多为电机这种能准确控制位置的驱动器。近年来, 研究者们逐渐认识到柔性驱动器在机器人控制中的重要作用。与传统

的刚性驱动器相比, 柔性驱动器允许控制对象在受到一定外界作用的情况下偏离平衡位置, 其优点是能减轻碰撞带来的冲击作用, 降低物体在高速运动下的危险, 适合人机交互中的工程应用, 减少对设备的损耗^[45], 并适用于需要控制柔性的研究对象。

早在 1995 年, Pratt 等人提出了一种由弹簧和传统的刚性驱动器串联而成的柔性驱动器 (series elastic actuator)^[46], 这种驱动器的柔性由弹簧的弹性系数决定, 且在运行中无法改变。Migliore 等人基于人类肌肉驱动的原理设计了一种对抗控制柔性的驱动器 (Antagonistic-Controlled Stiffness)^[47], 如图 4(a)所示, 该驱动器由 2 个电机和 2 个弹簧组成, 可以实现对关节柔性的控制。基于类似的原理, Hurst 等人设计了可以通过机械方式调整柔性的驱动器^[48]。该驱动器的机构相对复杂, 优点是只需要一个驱动器来控制柔性或平衡位置。图 4(b)所示的人工肌肉是一种有代表性的气动柔性驱动器^[49], 通过充气 and 排气, 可以实现该人工肌肉的收缩和伸展, 进而带动关节的运动。Van Ham 等人设计了能独立控制关节柔性和关节平衡位置的柔性驱动器 MACCEPA (the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator)^[50-51], 该驱动器机械结构简单, 柔性的变化范围较大, 适合应用在双足机器人中。



(a) (b)

(a) 基于人类肌肉驱动的原理设计的能控制关节柔性的驱动器^[47]; (b) 人工肌肉驱动器^[49]

图 4 2 种有代表性的柔性驱动器

在 20 世纪 90 年代, 日本早稻田大学进行了柔性驱动的相关研究。研究者参考了人类行走时肌肉的驱动方式以及关节柔性可以实时改变的特点, 在基于主动控制的机器人“WL-14”上加入了对抗驱动关节 (antagonistic driven joints) 以及由非线性弹簧实现的可变的关节柔性^[52], 如图 5 所示。实验结果发现, 与关节柔性不可改变的情况相比, 机器人在运动的摆腿阶段 (swing phase) 能量消耗减少了

25%, 即引入可控柔性的关节显著提高了机器人的运动效率。

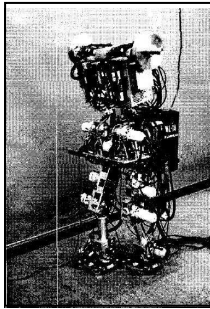


图 5 日本早稻田大学研制的加入柔性驱动的双足机器人 WL-14^[52]

比利时布鲁塞尔自由大学用图 4(b)所示的气动人工肌肉作为驱动器, 研制了双足机器人 Lucy^[43], 如图 6 所示。在该机器人中有轨迹发生器和关节轨迹跟踪控制器, 其控制思想是根据期望的关节轨迹来调整驱动器的柔性, 使机器人肢体的固有频率与期望轨迹的频率尽可能接近, 以达到提高运动效率的目的。在以该种人工肌肉驱动的单摆上的实验表明, 这种控制方法可以降低运动过程中的能量消耗、提高效率。

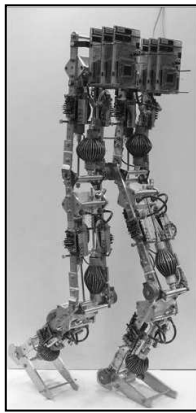


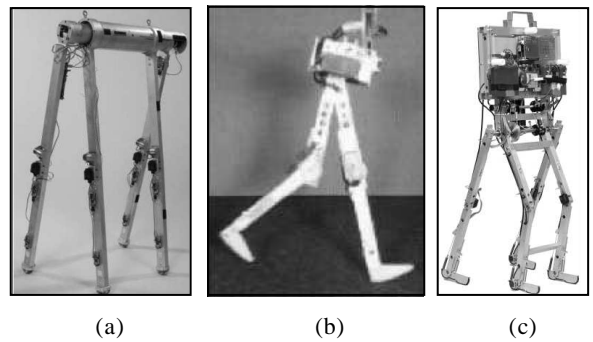
图 6 比利时布鲁塞尔自由大学研制的用气动人工肌肉驱动的双足机器人 Lucy^[43]

目前基于主动控制的双足机器人中, 大多还是以实现精确的位置控制为目标, 加入柔性驱动的机器人还比较少。对于基于被动行走的双足机器人, 由于其运动方式与人类更接近, 且对驱动器的要求相对较低, 所以更适合加入柔性驱动的研究。

2.2 被动行走的柔性可控双足机器人研究现状

如前文所述, 基于被动行走的双足机器人虽然具有更高的运动效率和更自然的步态, 但是实用性较差, 往往只能以一种实现指定好的步态行走, 在运动过程中难以实时调整运动速度和步长。

近年来一些学者致力于基于被动行走的双足变速运动的研究。德国哥廷根大学的研究者通过仿真分析了质量分布对运动性质的影响, 即通过离线调整模型动力学属性的方式来实现行走速度的改变^[53]。荷兰德尔夫特大学的学者在仿真中研究了不同双足行走模型的控制方法, 实现了在不同速度之间的转换^[54]。荷兰特温特大学的研究人员研制了基于被动控制的双足机器人“Dribbel”, 如图 7(a)所示, 通过应用合适的控制算法可以实现行走速度的变化^[55]。英国斯特林大学的研究人员研制的双足机器人“Runbot”(如图 7(b)所示), 通过改变髋关节的驱动实现对行走速度的控制, 速度最大可以达到 0.8 m/s^[56]。荷兰德尔夫特大学研制了基于极限环行走的双足机器人“Meta”, 如图 7(c)所示。该机器人在髋关节和踝关节处有驱动。实验表明调整踝关节处的期望角度可以实现改变行走速度^[27]。



(a) 荷兰特温特大学研制的双足机器人“Dribbel”^[55];
(b) 英国斯特林大学研制的双足机器人“Runbot”^[56];
(c) 荷兰德尔夫特大学研制的双足机器人“Meta”^[27]

图 7 能实现变速的基于被动行走的双足机器人

以上介绍的研究虽然实现了在行走中的变速, 但是对行走速度的控制都是通过直接改变外加的驱动力矩实现的。近年来, 越来越多的学者开始尝试在基于被动行走的双足机器人中加入可控柔性, 通过改变机器人自身的动力学性质(例如肢体运动的固有频率)来实现双足运动的速度控制和步态转换。德国耶拿大学的运动学实验室进行了柔性腿性质的仿真研究, 研究结果表明, 使用柔性腿的双足行走模型可以将行走运动和奔跑运动统一起来, 用一种模型结构实现 2 种运动^[57]。该仿真研究还发现, 在不同的柔性、初速度的条件下, 模型可以实现多种步态的运动, 不同步态以支撑腿受到的地面反作用力在一个周期中出现的峰值数为区分标准。实验结果显示, 与传统的刚性腿行走模型相比, 柔性腿模型的行走特征与人类更接近。日本东北大学的研究

者在被动动态双足运动仿真模型中加入了髌关节柔性和腿部的柔性,研究了包括奔跑、跳跃、行走在内的多种步态在不同柔性下的分布^[58],结果显示髌关节柔性和腿部柔性对产生不同的步态有很重要的影响。北京大学智能控制实验室研究了具有平脚结构和踝关节柔性的动态双足行走模型的步态选择^[30],该研究建立了具有动态运动状态序列的仿真模型,分析了不同的行走步态在不同关节柔性下的分布,实验结果表明踝关节柔性在产生不同的行走步态中发挥很大的作用,并揭示了与人类自然行走最接近的步态具有最高的运动效率。

一些研究机构也进行了在实体双足机器人上加入可控柔性的工作。日本大阪大学研制了一款使用对抗人工肌肉驱动器(antagonistic pneumatic actuators)的双足机器人^[59]。该机器人有 4 条腿(为保持侧向平衡使用了一对内侧腿和一对外侧腿的结构),高 0.9 m,重 6.0 kg,有 5 个自由度,共 14 块人工肌肉,如图 8(a)所示。该研究强调柔性机构、特别是可调节的柔性对动态运动的重要性,在机器人的髌关节、膝关节、踝关节都安装了对抗人工肌肉,通过气动驱动改变柔性,使机器人实现了行走、奔跑、跳跃 3 种运动模式。此外,该研究小组还制作了一款三维的双足机器人^[60]。该机器人通过人工肌肉的弹性和改变关节的位姿来调整腿的柔性,也可以实现多种模式的运动。这 2 个机器人的运动已经不局限于行走,还能实现奔跑和跳跃等包含腾空状态的运动,充分体现了加入可控柔性给运动性能带来的变化。德国耶拿大学的研究者在柔性腿双足模型的基础上研制了双足机器人 PogoWalker,如图 8(b)所示。该机器人由可伸缩的弹性腿构成,腿原长 0.58 m,重 4.1 kg,每个腿有 2 个电机驱动,1 个控制髌关节,1 个控制摆动时腿的收缩。该研究致力于寻找能产生较高的稳定性和较强的鲁棒性的腿部柔性的范围,结果表明,当柔性处于合适的范围时,可以实现稳定行走,且具有较好的克服扰动的能力^[61]。比利时布鲁塞尔自由大学的研究者研制了基于被动行走的双足机器人 Veronica,该机器人有上身、2 个髌关节、2 个膝关节、2 个踝关节,共 6 个自由度,如图 8(c)所示。Veronica 的每个关节上都装配了可以独立控制关节柔性和平衡位置的驱动器 MACCEPA,机器人在行走过程中可以实时地调整关节柔性,可以通过调整自身动力学性质的方式来改变行走速度和步长^[50]。

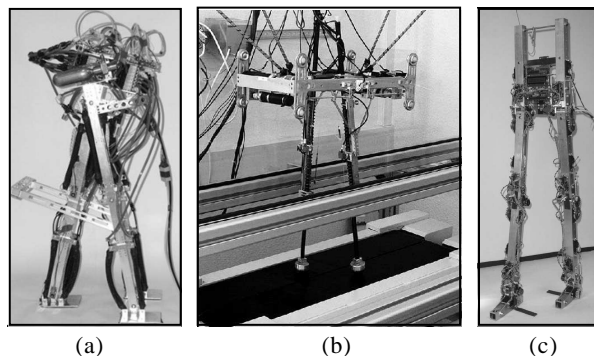


图 8 具有可控柔性的基于被动行走的双足机器人
(a) 日本大阪大学研制的使用人工肌肉驱动的机器人^[59]; (b) 双足机器人 PogoWalker^[61]; (c) 双足机器人 Veronica^[50]

图 8 具有可控柔性的基于被动行走的双足机器人

3 发展趋势与展望

3.1 柔性可控双足行走研究面临的主要问题

越来越多的研究者开始在双足行走中加入柔性,研究具有可控柔性的双足行走模型或机器人的运动性质,希望得到运动高效、自然、能实现多种步态的双足运动。目前虽然取得了一些成果,但也存在着不少待解决的问题。面临的主要问题有:

1) 在主动控制的双足机器人中加入可控柔性的研究里,机器人的运动仍然存在效率低、步态僵硬等问题。由于使用精确跟踪轨迹的控制方式,机器人的行走速度受到较大的限制,且在运动过程中难以充分利用系统自身的动力学性质,也不利于探索人类运动的内在机理。

2) 在大部分关于可控柔性的仿真研究中,所使用的双足行走模型都比较简单,往往采用较简化的质点模型,不利于进一步研究人体结构对运动的影响,也无法更深入地分析多种行走步态的性质。

3) 一些研究对不同运动步态的性质进行了比较,并分析了柔性对步态分布的影响,但对在运动过程中不同步态的实时转换研究得较少,如何通过调整机器人的柔性,实现步态实时转换是一个有待深入研究的问题。

4) 在柔性可控的双足机器人的研究中,还缺少比较成熟的通过调整柔性来改变行走速度、步态的控制方法。

3.2 柔性可控双足机器人的未来发展趋势

针对前面提到的问题,结合目前双足行走机器人的发展现状可以得出,未来对具有可控柔性的双足行走机器人的研究有以下趋势:

1) 侧重柔性驱动器设计与研制,并将其应用到柔性可控的双足行走机器人中。近年来,很

多研究机构都进行了柔性驱动器方面的研究工作^[46-50, 62]。对于应用到双足行走机器人(特别是基于被动行走的机器人)上的柔性驱动器来说,除了能够改变柔性、储存释放能量以外,还应该尽量具有较简单的机械结构和较小的重量。如何让驱动器对柔性进行较好的控制,且能实现较大的柔性变化范围和较大的驱动力,是一个很有意义的研究课题。

2) 研究控制柔性的方法。目前在双足行走的研究中,还没有很成熟的通过改变柔性来控制行走速度、步长、步态的方法。研究柔性和运动性质的关系、分析步态转换的稳定性、效率和控制方法是一个很有挑战的研究方向。

3) 双足机器人与生物学研究的结合。人类行走的规律为研究双足机器人的运动、控制提供了很多可以借鉴的地方,对双足机器人的研究也能更好地帮助我们理解人类运动的机理。将生物学研究与智能控制相结合也是当前的一个热点问题。采集人类行走时的运动学信息和动力学信息,深入分析人类运动中柔性的变化规律,可以更好地促进对柔性可控双足机器人的研究。

4) 在假肢、外骨骼等辅助行走设备中应用可控柔性。除了双足机器人以外,人工智能假肢、外骨骼机器人等辅助行走设备也是研究双足运动的重要应用。将可控柔性应用到这些辅助行走设备中,可以使这些辅助行走设备在复杂环境中具有更好的适应性和更自然的运动步态,对助力、助残、康复等方面都有很重要的意义。

4 结论

机器人具有可控柔性,意味着可以在运动过程中实时调整自身的动力学属性(例如固有频率)。生物学中的研究表明:人类在运动的时候,不同速度下的柔性也是不同的^[63],这表明相比于传统的直接改变外加驱动力的控制方法,通过调整系统自身的动力学属性来实现运动速度、步长、步态的改变与人类实际运动更加接近。总之,研究具有可控柔性的双足运动,对改进双足机器人的运动性能和理解人类运动内在机理都有十分重要的意义,是未来值得深入研究的课题。

参考文献:

[1] Hirose M, Ogawa K. Honda humanoid robots development[J]. Transactions of the Royal Society A, 2007, 365: 11-19.
[2] Au S K, Weber J, Herr H. Powered ankle-foot prosthesis

improves walking metabolic economy[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009(1): 51-66.
[3] Bekey G A. Autonomous Robots [M]. Cambridge, 2005.
[4] Rolian C, Lieberman D E, Hallgrímsson B. The coevolution of human hands and feet[J]. Evolution, 2010, 64: 1558-1568.
[5] Nishiwakiz K, Kagamiy S, Kuniyoshiz Y, et al. Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002: 3105-3110.
[6] Sellaouti R, Stasse O, Kajita S, et al. Faster and smoother walking of humanoid hrp-2 with passive toe joints[C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 4909-4914.
[7] Kumar R P, Yoon J, Christiand, et al. The simplest passive dynamic walking model with toed feet: a parametric study[J]. Robotica, 2009, 27: 701-703.
[8] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
[9] Vukobratovic M, Frank A, Juricic D. On the stability of biped locomotion[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1970, 17: 25-36.
[10] Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers[J]. Science, 2005, 307: 1082-1085.
[11] Hurmuzlu Y, Moskowitz G D. Role of impact in the stability of bipedal locomotion[J]. International Journal of Dynamics and Stability of Systems, 1986(1): 217-234.
[12] Hobbelen D G E, Wisse M. Limit cycle walking[M]. Humanoid Robots, Human-like Machines, M. Hackel, (ed). Vienna, I-Tech Education and Publishing, 2007: 277-294.
[13] Kato I. Development of WABOT-1[M]. Biomechanism 8, The University of Tokyo Press, 1973: 173-214.
[14] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, et al. The development of Honda humanoid robot[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998: 1321-1326.
[15] Kaneko K, Kanehiro F, Kajita S. Humanoid robot HRP-2 [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004: 1083-1090.
[16] Stasse O, Verrelst B, Vanderborcht B, et al. Strategies for Humanoid Robots to Dynamically Walk Over Large Obstacles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25: 960-967.
[17] Lee J, Kim J, Park I, et al. Development of a humanoid robot platform HUBO FX-1[C]. International Joint Conference on SICE-ICASE, 2006: 1190-1194.
[18] <http://www.bostondynamics.com/>
[19] Wang G, Huang Q, Geng J. Cooperation of dynamic patterns and sensory reflex for humanoid walking[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003: 2472-2477.
[20] Mochon S, McMahon T A. Ballistic walking[J]. Journal of Biomechanics, 1980, 13(1): 49-57.
[21] Mochon S, McMahon T A. Ballistic walking: An

- improved model[J]. *Mathematical Biosciences*, 1980, 52: 241–260.
- [22] McGeer T. Passive dynamic walking[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990(9): 68–82.
- [23] Garcia M, Chatterjee A, Ruina A, et al. The simplest walking model: stability, complexity, and scaling[J]. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 1998, 120: 281–288.
- [24] Kuo A D. Energetics of actively powered locomotion using the simplest walking model[J]. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 2002, 124: 113–120.
- [25] Wisse M, Hobbelen D G E, Schwab A L. Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 112–123.
- [26] Hobbelen D G E, Wisse M. Ankle joints and flat feet in dynamic walking[C]. *Proceedings of the International conference on Climbing and Walking Robots*, 2004.
- [27] Hobbelen D G E, Wisse M. Controlling the walking speed in limit cycle walking[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(9): 989–1005.
- [28] Wang Q, Huang Y, Wang L. Passive dynamic walking with flat feet and ankle compliance[J]. *Robotica*, 2010, 28: 413–425.
- [29] Wang Q, Huang Y, Zhu J, et al. Effects of foot shape on energetic efficiency and dynamic stability of passive dynamic biped with upper body[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2010, 7: 295–313.
- [30] Huang Y, Wang Q, Chen B, et al. Modeling and gait selection of passivity-based seven-link bipeds with dynamic series of walking phases[J]. *Robotica*, 2012, 30: 39–51.
- [31] Hu Y, Yan G, Lin Z. Feedback control of planar biped robot with regulable step length and walking speed[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27: 162–169.
- [32] Collins S, Wisse M, Ruina A. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees [J]. *International Journal of Robotics Research*, 200, 20: 607–615.
- [33] Collins S, Ruina A. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005: 1983–1988.
- [34] Hosoda K, Narioka K. Synergistic 3D limit cycle walking of an anthropomorphic biped robot[C]. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007: 470–475.
- [35] Wisse M, Feliksdaal G, van Frankenhuyzen J, et al. Passive based walking robot-Denise, a simple, efficient, and lightweight biped[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, 14(2): 52–62.
- [36] Wisse M. Walking robot “Flame”[C]. *Dynamic Walking Conference*, 2009.
- [37] Seyfarth A, Iida F, Tausch R, et al. Towards bipedal jogging as a natural result of optimizing walking speed for passively compliant three-segmented legs[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2009, 28: 257–265.
- [38] 柳宁. 双足被动行走器动力学仿真与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [39] 付成龙. 平面双足机器人的截面映射稳定性盘踞与应用[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [40] 毛勇. 半被动双足机器人的设计与再励学习控制[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [41] 王启宁. 动态双足行走研究: 从理论模型到机器人实现[D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [42] Wang Q, Zhu J, Wang L. Passivity-based three-dimensional bipedal robot with compliant legs[C]. *Proceedings of the SICE Annual Conference*, 2008.
- [43] Vanderborght B, Verrelst B, Van Ham R, et al. Development of a compliance controller to reduce energy consumption for bipedal robots[J]. *Autonomous Robots*, 2008, 24: 419–434.
- [44] 黄岩. 关节柔性可控的动态双足行走研究及机器人应用[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [45] Van Ham R. Compliant actuation for biologically inspired bipedal walking robots[D]. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2006.
- [46] Pratt G A, Williamson M. Series elastic actuators[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1995: 399–406.
- [47] Migliore S A, Brown E A, DeWeerth S P. Biologically inspired joint stiffness control [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005: 4519–4524.
- [48] Hurst J W, Chestnutt J E, Rizzi A A. An actuator with physically variable stiffness for highly dynamic legged locomotion[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004: 4662–4667.
- [49] Verrelst B, Van Ham R, Vanderborght B, et al. The pneumatic biped LUCY actuated with pleated pneumatic artificial muscles[J]. *Autonomous Robots*, 2005, 18: 201–213.
- [50] Van Ham R, Vanderborght B, Van Damme M, et al. MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: design and implementation in a biped robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55: 761–768.
- [51] Van Ham R, Sugar T G, Vanderborght B, et al. Compliant actuator designs review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009, 16: 81–94.
- [52] Yamaguchi J, Nishino D, Takanishi A. Realization of dynamic biped walking varying joint stiffness using antagonistic driven joints[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998: 2022–2029.
- [53] Hass J, Herrmann J M, Geisel T. Optimal mass distribution for passivity-based bipedal robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(11): 1087–1098.