



运动生物力学在仿人机器人研发中的应用

杨辰, 曲峰*, 万祥林

摘要: 介绍国内外仿人机器人的发展历程和研究现状以及仿人机器人的主要应用领域, 总结生物力学在仿人机器人本体设计和研发中的应用方向及研究手段, 以期为相关领域学者对人类和机器人学科的交叉研究提供帮助, 将人体的生物力学研究更好地应用于仿人机器人的研发与制造。

关键词: 运动生物力学; 仿人机器人

中图分类号: G804.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2015)02-0004-04

Application of Sports Biomechanics to the Research and Development of Humanoid Robot

YANG Chen, QU Feng, WAN Xianglin

(Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: The paper introduces the development course, research status and the main application fields of humanoid robot. It summarizes the application and research methods of sports biomechanics in the design and development of humanoid robot so as to provide support to the scholars of the related fields in their crossover researches in the subjects of human being and robot and apply the human body biomechanics research to the development and manufacture of humanoid robot.

Key Words: sports biomechanics; humanoid robot

研发仿人机器人最终的目的是使机器人的运动更贴近人类的动作轨迹, 同时获得与人体一样良好的节能性和稳定性, 从而协助或代替人类完成医疗、工业、日常生活等相关领域的工作。从运动生物力学角度出发, 了解人类动作基本规律、能量优化原理以及稳定控制机理, 其理论研究和手段都可以在仿生学层面上对仿人机器人的理论探索和样机研发有重要帮助。本文对仿人机器人的发展现状和应用领域作出概述, 并总结运动生物力学在仿人机器人本体设计和研究方向上的应用。

1 仿人机器人的发展及研究现状

1.1 仿人机器人的发展历程

仿人机器人的研究开始于 20 世纪 70 年代, 在长达 40 年的发展历程中, 全世界相关领域的学者不断进行着针对于仿人机器人的理论探索和样机研制。行走机构是仿人机器人的关键技术, 对于仿人机器人的研究也是从对行走机构的研究开始^[1]。目前仿人机器人根据步行方式的不同可以分为主动型和被动型两种, 主动型仿人机器人是指在机器人的关节处设有驱动装置, 通过控制方法来规划关节运动的实际轨迹与期望轨迹曲线重合; 被动型仿人机器人相比主动型减少了能源的输入, 只依靠少数几个关节的能量输入或完全依靠自身的重力完成行走。

1.1.1 国外仿人机器人的发展

在理论研究方面, Vukobratovic 于 1969 年提出了著名的双足步行机构稳定性判据 ZMP (Zero Moment Point) 理论^[2], 为仿人机器人姿态平衡的控制奠定了重要的理论基础; Hemami 等人^[3]随后提出了仿人机器人模型的简化方法, 进一步开展了机器人稳定控制的相关研究。在样机研制方面, 早稻田大学最早研发的模拟人体下肢结构 WL-1 已经基本具备了双足行走的功能, 在此基础上他们又研制出世界上第一个可以完成主动行走的双足机器人 WL-5 以及第一个具备机械手臂、视听装置的仿人机器人 WABOT-1; 本田公司设计研发的 ASIMO 是当今双足机器人样机技术的最高水平, 通过步行技术的改进使其更接近人类的行走方式, 并具备了避让障碍、跑步和边行走边转弯的功能; 日本政府于 1998 年启动了 HRP (Humanoid Robot Project) 项目, 其最具代表的 HRP 系列机器人具有顺势倒下并爬起、在不平整地面行走、协助人类操作等功能; 美国在仿人机器人的研发领域也取得了很大成功, 波士顿动力公司推出的 PETMAN 军用机器人足底模拟人类跖趾关节的设计, 使其在步行时脚趾和脚跟可以抬起, 受到外界撞击干扰也不会倒下, 麻省理工大学研发的被动步行机器人 M2 能够以极小的功耗步行。

收稿日期: 2015-01-08

基金项目: 国家高科技研究发展计划(863 计划)2013AA****。

第一作者简介: 杨辰, 男, 在读博士。主要研究方向: 运动生物力学。

* 通讯作者: 曲峰, 女, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 运动生物力学。

作者单位: 北京体育大学, 北京 100084



1.1.2 国内仿人机器人的发展

我国对双足行走机器人的研究始于20世纪80年代中期,并在863计划和国家自然科学基金的支持下取得一系列进展。国防科技大学研制出我国第一台仿人机器人“先行者”,可完成平地移动、走台阶、转弯和摆臂等各种类人步态;哈尔滨工业大学研发的HIT-3可实现稳定行走;北京理工大学研发的“汇童”仿人机器人可模仿人类完成太极拳、刀术等各种复杂动作。

1.2 仿人机器人的研究现状

在理论层面上,为了使仿人机器人获得更好的步行稳定性,各国学者对机器人以及人类自身的步行运动都进行了深入的研究,以期得到更为优化的控制理论。控制理论主要需要解决两方面的问题:一方面是要利用运动规划算法,产生各关节正确的转动序列,并获得实现方法;另一方面是要满足机器人的稳定条件。现阶段仿人机器人主要的控制理论包括ZMP控制方法、倒立摆特性、基于人类步行数据的规划/控制。

在硬件层面上,建立在高科技基础上的硬件系统如材料与机构、驱动电机、传感器对于机器人的设计及构造十分重要。通过适宜的材料构建仿人机器人机构,根据本体传感器的信息,通过驱动电机实时调整身体姿态,并对理论层面的步态进行修正,从而完成运动任务。

2 仿人机器人应用领域

2.1 医疗

仿人机器人在外科手术上的应用,可以突破传统的微创手术,让手术精度和水平提高到新的高度;在康复服务中的应用包括医疗服务和老人看护等,实现了人性化的医疗环境^[4];外骨骼系统是融合了仿生学、控制、传感器、驱动和材料等相关技术的高科技产品,可以有效地帮助残疾人恢复肢体功能,也可以帮助特殊职业人群完成高难度、大载荷的作业^[5]。

2.2 工业

模拟人类上肢自由度和灵活度的机械手臂在工业中广泛应用,主要完成焊接、搬运、喷涂、装配、测量及检验等高危险度、高复杂性的作业。

2.3 军事

主要让仿人机器人执行一些自动的侦察与控制工作,尤其是一些相对较为危险的任务,比如值守、巡逻、拆弹及扫雷等。

2.4 娱乐

主要实现机器人模拟人类的动作轨迹,如完成踢足球、打乒乓球、弹钢琴等动作。

3 仿人机器人的生物力学设计

3.1 自由度——模拟关节运动

在机器人自由度的配置中,研究人员多依据人体解剖

学并参照机器人本体特点设计其自由度。为了能自由控制脚掌的位置和姿态,机器人的研发过程中设计出许多不同自由度的行走机器人,并成功实现了稳定行走。从国内外研究中比较成熟的仿人机器人来看,大部分仿人机器人腿部结构都采用6个自由度的分配方式:髋关节3个自由度,膝关节1个自由度,踝关节2个自由度。一般情况下单侧下肢有5个自由度就可以完成基本的行走,而髋关节增加的1个自由度可使行走动作更加拟人化^[1]。

同时,为了更好地模拟人类作业,仿人机器人在上肢的设计中也要充分考虑人类的形态结构,比较典型的仿人机器人上肢自由度配置方式为:肩关节3个自由度,肘关节1个自由度,腕关节3个自由度。肩关节的转动能带动整只手臂运动,通过较小的角度就可以实现较大的肢体末端移动距离;肘关节用以实现肢体末端可以到达靠近躯干的距离点;腕关节用以实现肢体末端的灵活性,有的仿人机器人或者机械臂增加了手指的自由度以完成更复杂的任务。

躯干上腰部如采用1个自由度对某些全身运动的动作规划和跑步都有很重要的作用^[6];颈部如采用1个自由度可以增大机器人的视觉识别范围。

3.2 驱动方式——模拟肌肉

目前机器人关节的主要驱动方式有液压、气动、伺服电机驱动等,液压驱动控制复杂、成本高,气动驱动精确性差,因此电机驱动还是目前仿人机器人主要的驱动方式。同时,为了使仿人机器人的机械结构和驱动装置达到精确、简易、低耗能和低污染的要求,科研人员也广泛寻找新的方向进行研究,人工肌肉和关节驱动结构成为研究的主要方面^[7]。人工肌肉是一种具有类似人类肌肉输出特性的柔性驱动器,参考人类肌肉的运动原理设计而成。

根据人体解剖学和生物力学原理,机器人研究人员设计出空气肌肉组织,并提出了双关节肌肉、拮抗肌群等设计思路。1998年英国的研究小组在人体生理学和人体解剖学领域进行研究,用空气肌肉组织模仿人类肌肉^[8]。根据人体的肌肉大多跨过两个关节或以上这一解剖特性,Saito等人^[9]在双足机器人的髋、膝关节处设计了一个双关节驱动,该设计增加了力的输出,并将肌肉力量有效地分配到四肢。同时还有一些利用形状记忆合金模拟人体关节和肌肉性能的研究^[10,11]。张江涛等人也提出了一种新型的仿人肢体驱动结构^[7],他注意到人体通过主动和拮抗肌群的共同作用驱动关节运动,因此他在机器人上臂运动方向两侧安装多个小巧的肌肉单元结构,以此模拟人体肌肉的工作方式。如果一侧肌肉单元作为屈肌,则另一侧肌肉单元就为伸肌,二者的共同驱动完成一次关节运动,这种屈伸肌肉单元的同步收缩可以将关节固定在一个特定的位置上,因此可以有效地维持关节位置的精确性和稳定性。

3.3 传感器——模拟本体感觉

仿人机器人中安装了大量传感器,通过传感器获得关节角度、姿态、力、力矩、视觉、听觉、接近觉、触觉等信息。其作用在于即使理论计算出稳定的行走步态,但由于外界多种不稳定因素的存在,导致实际行走过程中会出现步态的偏差,因此



机器人需要依据各种传感器收集本体以及外部的信息并加以反馈控制,以保证自身稳定性。在某种程度上,机器人的稳定控制就是基于传感器的,这与人类的本体感觉十分相像。

人体在行走过程中,足部的感受器获得接触面形状、反作用力大小和方向等信息,反馈到神经中枢作出判断从而调节身体平衡,与此类似,仿人机器人足底安置六维力/力矩传感器,获得3个方向上力和力矩信息,实现准确控制。而在一些复杂的环境中,除了触觉的感知外,对姿态信息的感知也尤为重要。足部姿态对于不平整地面行走、转弯、上/下坡和上/下楼梯的稳定控制都有重要作用^[12],躯干姿态信息对于行走稳定性也非常重要。

3.4 足部结构

足部是仿人机器人在行走过程中唯一与地面接触的部位,通过足部传感器对地面反作用力和力矩的反馈来驱动踝关节围绕着地点产生转动,从而更好地控制机器人行走的稳定性,同时又提供足够的摩擦力用以推进机器人向前行进。在一些样机的研发中,科研人员根据人体跖趾关节的提示在足部结构中加入了主动脚趾,从而对ZMP进行微调,并提升了行走的步幅和速度,也更易于完成全身动作^[13]。另一些样机研发中借鉴了人体足部的缓冲特性,将机器人足部改成双重结构,这样就很好地避免了着地冲击力或不平整地面的干扰而引起的足底打滑或震颤^[14]。

4 生物力学在仿人机器人研发中的研究方向及手段

4.1 步态规划

步态规划是指预先设定仿人机器人各个关节角度的时间序列,并用角度和时间的函数来表示,从而使机器人完成期望的步行运动,它是一种关节运动在空间和时间上的协调关系。步态规划的基本原理是先根据理想的步行的要求和环境规划出各关节的位置轨迹,然后通过逆运动学模型计算出各关节的角度轨迹^[15]。

在步行机器人的研发过程中,机器人的步态逐步向着拟人化的方向发展,一方面是其下肢步行结构的设计借鉴人类下肢,另一方面是其步态规划方法可以借鉴人类步态特征。因此基于仿生运动学的步态规划方法得到发展,此方法将仪器捕获的人类步行运动数据(HMCD)应用到仿人机器人的步态规划上,本田团队通过分析人类步行时各关节相互抑制和协调的规律,利用得到的运动学数据规划出ASIMO的步态^[16];Zhang等人^[17]通过采集人类行走的运动数据并进行修正,规划出BHR-2的步态。

基于仿生运动学的步态规划法不需设定大量参数,其可行性完全依赖于仪器捕捉的运动数据,但在质量分布、动力学特性和驱动方式等方面仿人机器人与人都存在很大差异,同时由于不同机器人的实际参数不同,也会导致采集的数据无法共享^[15]。因此,不能直接将采集到的人类步行数据直接应用在机器人身上,而应通过数据分析研究人类步行原理,将基本的原理特征应用于仿人机器人来规划合适的步态。随着生物力学相关学者对人类行走机理的研究与了解,以及相

关采集设备和手段的提高与完善,基于仿生运动学的步态规划法将成为仿人机器人步态规划的一个主要发展方向。

4.2 稳定控制

仿人机器人的研究领域中,主要的稳定性判据是ZMP始终保持在支撑区域内,它距离支撑区域的中心越近,机器人的稳定性也越好。ZMP是指地面反作用力在脚与地面的接触点上的等效力矩水平分量为零,由此定义可知ZMP与COP是等价的^[18]。但在另一层面,真实的双足步行运动姿态并不始终保持平衡,人类在快速步行或者跑步的运动中也不会遵循ZMP判据,即使出现不稳定的姿态也可以通过正常迈步恢复稳定的步行运动。因此ZMP判据是一种比较保守的稳定控制方法,限制了仿人机器人基础理论的研究和样机技术的发展。而人类在快速步行、高处落地、外干扰等过程中都表现出极好的稳定性,提示相关领域的科研人员可以通过对人体稳定控制的研究,了解在不同场景和动作下人体的稳定控制机理,这有助于完善仿人机器人的稳定控制理论和提高仿人机器人的样机研发水平。

4.3 能量优化

机器人主要的能量损失发生在足部与地面的碰撞阶段,如何减少这种能量消耗也是仿人机器人研究领域的重点。研究人员根据人体足部的功能,在机器人足底安置缓冲装置^[19],或者扩大足侧部和后部的支撑区域^[20],以减小碰撞阶段冲击力对于机器人能量损失的影响。学者认为导致主动型仿人机器人行走能耗过高的主要原因在于其驱动方式不符合人类的生物力学特性^[21],赵九洲总结人类步行的能量节省化特点,认为人类步行时在双支撑阶段进行能量输入,在单支撑阶段近似被动特征,他根据这种充分利用自身被动特性以及稳定特性的原理,提出了一种自然步态的生成方法,并通过模拟关节的生物力学特性而实现对机器人的控制^[22]。同时,当前机器人的研发设计多是上肢没有摆动或者足底没有跖趾关节,一方面这种设计是否会在人类身上体现出能量消耗的差异,另一方面如果人以类似行为行走是否可以得到一些参数或特征为此类型机器人提供实用性帮助,也成为了学者研究的重点^[23, 24]。

4.4 动作设计

动作设计和规划的目的是为了使人更加拟人化,从而更好地协同人类完成工作,或者达到娱乐效果。但是对于复杂动作采用建立运动解析方程并求解运动轨迹的方法难度大且复杂,因此基于人体运动数据的动作设计方法就成为了规划仿人机器人复杂动作的有效手段^[25]。

随着运动捕捉技术的快速发展和对机器人动作设计要求的提高,越来越多的研究人员采用基于运动捕捉系统的动作设计方法,实现仿人机器人的拟人化动作。一般情况下,基于运动捕捉系统的动作设计方法分为人体的运动捕捉、建立人一机简化模型、机器人的运动学匹配和方法的有效性验证4个步骤。Kim等人^[26]通过采集人体上肢的运动学数据,并使用数学方法对其进行表达,进而使仿人机器人能够模拟人体上肢运动轨迹进行运动。Yamane等



人^[27]提出了基于人体运动数据的仿人机器人全身动作设计方法。Pollard等人^[28]通过捕捉人体舞蹈动作,提出了满足机器人关节运动范围和运动速度要求的解决方法,使得机器人能够很好地完成舞蹈动作。目前,仿人机器人通过基于运动捕捉的动作设计法可以完成包括太极拳、舞蹈、打网球和乒乓球等多种动作。

总之,仿人机器人通过模拟人类的多种动作,可以很好地代替人类工作,因此得到许多国家科研机构的关注和重视,基于运动捕捉系统的仿人机器人动作设计方法也成为运动生物力学研究的重要领域。

5 结语

运动生物力学对人体运动基本规律和稳定控制机理等方面的探索与总结在仿人机器人40年的发展历程中,对其理论研究和样机研制均有重大贡献,运动生物力学从仿生学的角度将人体的运动和控制原理应用于仿人机器人的研究领域。双足仿人机器人目前仍存在步行基础理论滞后,样机技术无法真实模拟人体运动等研究问题,这就要求针对仿人机器人的研究一定首先从“仿人”层面出发,通过运动生物力学手段更进一步探究人体机理,将人体和机器人两个学科领域交叉研究,才能制造出更类人和实用的仿人机器人。

参考文献:

- [1] 陈昱,付成龙. 仿人机器人理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [2] Vukobratovic M, Juricic D. (1969). Contribution to the synthesis of biped gait[J]. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, (1):1-6.
- [3] Hemami H W, F Koozekanani S. (1973). Some aspects of the inverted pendulum problem for modeling of locomotion systems[J]. *Automatic Control, IEEE Transactions on*,
- [4] 杜志江,孙立宁,富历新. 医疗机器人发展概况综述[J]. 机器人, 2003,25(2):182-187.
- [5] 万大千,徐义明,白跃宏. 下肢外骨骼康复机器人的研究与进展[J]. 中国组织工程研究, 2011,15(52):9855-9858.
- [6] 李允明. 国外仿人机器人发展概况[J]. 机器人, 2005,27(6):561-568.
- [7] 张江涛. 面向仿人机器人的人工肌肉与关节研究[D]. 中国科学技术大学, 2008.
- [8] Pritts M B, Rahn C D. (2004). Design of an artificial muscle continuum robot: Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. IEEE International Conference on, 2004[C]. IEEE.
- [9] Saito Y, Matsuoka T, Negoto H. (2005). Study on designing a biped robot with bi-articular muscle type bilateral servo system: Robot and Human Interactive Communication, 2005. ROMAN 2005. IEEE International Workshop on, 2005[C]. IEEE.
- [10] Ishikawa T, Nakada T. (2010). Shape memory alloy actuator for artificial muscle[J]. *Journal of Environment and Engineering*, 5(1):105-113.
- [11] Price A, Jnifene A, Naguib H E. (2006). Biologically inspired anthropomorphic arm and dextrous robot hand actuated by smart-material-based artificial muscles: Smart Structures and Materials, 2006[C]. International Society for Optics and Photonics.
- [12] 钱昌忠,吴仲城,申飞,等. 姿态传感器在仿人机器人足部感知系统中的应用[J]. 仪表技术, 2010(9):68-70.
- [13] 秦涛. 考虑跖趾关节运动的踏板式步行康复机器人运动规划[J]. 机器人, 2014,36(3):330-336.
- [14] Yamaguchi J, Takanishi A, Kato I. (1995). Experimental development of a foot mechanism with shock absorbing material for acquisition of landing surface position information and stabilization of dynamic biped walking: Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on, 1995[C]. IEEE.
- [15] 付根平. 仿人机器人的步态规划和步行控制研究[D]. 广东工业大学, 2013.
- [16] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, et al. (1998). The development of Honda humanoid robot: Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on, 1998[C]. IEEE.
- [17] Zhang L, Huang Q, Lv S, et al. (2006). Humanoid motion design considering rhythm based on human motion capture: Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, 2006[C]. IEEE.
- [18] Goswami A. (1999). Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 18(6):523-533.
- [19] Sreenath K, Park H, Grizzle J W. (2012). Design and experimental implementation of a compliant hybrid zero dynamics controller with active force control for running on MABEL: Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, 2012[C]. IEEE.
- [20] Sreenath K, Park H, Poulakakis I, et al. (2011). A compliant hybrid zero dynamics controller for stable, efficient and fast bipedal walking on MABEL[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 30(9):1170-1193.
- [21] Hobbelen D G, Wisse M. (2007). Limit cycle walking[M]. na.
- [22] 赵九洲. 双足机器人步行规划与控制方法研究[D]. 北京工业大学, 2013.
- [23] 武明,季林红,金德闻,等. 人体跖趾关节弯曲对行走步态特征的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2001,16(6):8-12.
- [24] Wannier T, Bastiaanse C, Colombo G, et al. (2001). Arm to leg coordination in humans during walking, creeping and swimming activities[J]. *Experimental brain research*, 141(3):375-379.
- [25] 张利格,毕树生,高金磊. 仿人机器人复杂动作设计中人体运动数据提取及分析方法[J]. 自动化学报, 2010,36(1):107-112.
- [26] Kim S, Kim C H, Park J H. (2006). Human-like arm motion generation for humanoid robots using motion capture database: Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, 2006[C]. IEEE.
- [27] Yamane K, Nakamura Y. (2003). Dynamics filter-concept and implementation of online motion generator for human figures [J]. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 19(3):421-432.
- [28] Pollard N S, Hodgins J K, Riley M J, et al. (2002). Adapting human motion for the control of a humanoid robot: Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, 2002[C]. IEEE.

(责任编辑:何聪)