

国内外两足步行机器人研究的 历史、现状及发展趋势

谭冠政 朱剑英 尉忠信

(南京航空学院机械工程系, 210016)

摘要 本文共分6个部分,详细介绍了研究两足步行机器人的原因和目的,两足步行机器人的特点及其应用前景,国内外两足步行机器人研究的历史、现状及发展趋势。

关键词: 两足步行机器人 历史 现状及发展前景

1 研究两足步行机器人的原因和目的

世界著名机器人学专家,日本早稻田大学的加藤一郎教授说过:“机器人应当具有的最大特征之一是步行功能”。步行功能的具备为扩大机器人的应用领域开辟了无限广阔的前景。

研究两足步行机器人的原因和目的,概括起来有如下4个:(1)我们希望研制出两足步行机构,使它们能在许多结构性和非结构性环境中行走,以代替人进行作业或延伸和扩大人类的活动领域。(2)我们希望更多地了解和掌握人类的步行特性,并利用这些特性为人类服务。(3)两足步行系统具有非常丰富的动力学特性,在这一方面的研究可以拓宽力学及机器人学的研究方向。(4)两足步行机器人可以作为一种智能机器人在人工智能中发挥重要的作用。

2 两足步行机器人的特点及其应用前景

在具有许多优点的步行机器人中,由于两足步行机器人体积较小,所以它们对环境有最好的适应性。这种机器人除结构较为简单外,在静、动态稳定步行方面;在高速运动方面,都是最困难的,但这些困难在技术上又并非不能克服。实用的两足步行机器人由两条腿和一个平台(腰部)组成。腿的作用是为平台提供移动能力,而平台的作用则是提供一个基础,以便安装机械手、CCD 摄象机、机载计算机控制系统和蓄电池。显然,这种带机械手的两足步行机器人能非常灵活地从事较多的工作。但是,对于这种两足步行机器人来说,平台的稳定性对于有效地控制机械手末端操作器的位置和姿态是至关重要的,而两条腿的步态又对平台的稳定性起决定作用。因此,如何规划好腿的步态,协调地控制两条腿的运动以保持平台及整个两足步行机器人的稳定就成为一个主要问题。

目前,两足步行机器人的应用领域主要是康复医学。从长远来看,两足步行机器人在无人工厂、核电站、海底开发、宇宙探索、康复医学以及教育、艺术和大众服务行业等领域都有着潜在而广阔的应用前景。

3 两足步行机器人的历史

最早系统地研究人类和动物运动原理的是 Muybridge,他发明了电影用的独特摄象机,即一组电动式触发照相机,并在 1877 年成功地拍摄了许多四足动物步行和奔跑的连续照片^[1]。

后来这种采用摄像机的方法又被 Demeny 用来研究人类的步行运动^[26]。从本世纪 30 年代到 50 年代,苏联的 Bernstein 从生物动力学的角度也对人类和动物的步行机理进行深入的研究,并就步行运动作了非常形象化的描述^[2]。

真正全面、系统地开展两足步行机器人的研究是始于本世纪 60 年代。迄今,不仅形成了两足步行机器人一整套较为完善的理论体系,而且在一些国家,如日本、美国和苏联等都已研制成功了能静态或动态步行的两足步行机器人样机。这一部分,我们主要介绍从 60 年代到 1985 年这一时期,在两足步行机器人领域所取得的最重要进展。

在 60 年代和 70 年代,对步行机器人控制理论的研究产生了 3 种非常重要的控制方法,即有限状态控制、模型参考控制和算法控制。这 3 种控制方法对各种类型的步行机器人都是适用的。有限状态控制是由南斯拉夫的 Tomovic 在 1961 年提出来的^[3],模型参考控制是由美国的 Farnsworth 在 1975 年提出来的^[4,5],而算法控制则是由南斯拉夫米哈依罗·鲍宾研究所著名的机器人学专家 Vukobratovic 博士在 1969 年至 1972 年间提出来的^[26]。这 3 种控制方法之间有一定的内在联系。有限状态控制实质上是一种采样化的模型参考控制,而算法控制则是一种居中的情况。

在两足步行机器人的发展史上,Vukobratovic 博士是一个非常突出的人物。他在整个 70 年代就两足步行机器人的理论研究和假肢的设计发表了很多有影响的论文。他提出了用欧拉角描述两足步行系统的通用数学模型;指出了由于步行系统的动态性能和控制性能的特殊性,用一般控制理论不能满意地解决人工实现步行问题,并相应地提出了算法控制的概念;研究了类人型两足步行系统在单脚和双脚支撑期机构的特点,并建立了从运动副组合到关节力矩计算等各项运算的 KINPAIR 算法,分析了类人型两足步行系统的姿态稳定性,并提出了相应的姿态控制算法;对类人型两足步行系统进行了能量分析和频率分析。此外,他还与合作者一起为截瘫病人和小儿麻痹症患者设计了一系列半动力型和动力型辅助行走装置^[26]。特别重要的是,他和 Stepanenko 博士一起在 1972 年提出了“零力矩点 ZMP”的概念^[6]。ZMP 概念的提出对两足步行机器人控制产生了非常重要的影响,为有效地控制两足步行机器人的运动开辟了一条崭新的途径。

在步态研究方面,苏联的 Bessonov 和 Umnov 定义了“最优步态”^[7],Kugushev 和 Jaroshevskij 定义了自由步态^[8]。这两种步态不仅适应于两足而且也适应于多足步行机器人。其中,自由步态是相对于规则步态而言的。如果地面非常粗糙不平,那么步行机器人在行走时,下一步脚应放在什么地方,就不能根据固定的步序来考虑,而是应该象登山运动员那样走一步看一步,通过某一优化准则来确定,这就是所谓的自由步态。

在两足步行机器人的稳定性研究方面,美国的 Hemami 等人曾提出将两足步行系统的稳定性和控制的简化模型看作是一个倒立振子(倒摆),从而可以将两足步行的前进运动解释为使振子直立移动的问题^[9]。此外,从减小控制的复杂性考虑,Hemami 等人还曾就两足步行机器人的“降阶模型”问题进行了研究^[5]。

在步行模式这方面的研究中,日本加藤一郎教授及其合作者 1980 年提出了“准动态步行的概念”^[10],这是一种介于静态步行和动态步行之间的步行方式。它既具有静态步行的特点又具有动态步行的特点,其步速要比静态步行快,而实现起来又不象动态步行那样困难。

最早采用最优理论来研究类人型两足步行系统是美国的 Chow 和 Jacobson。他们在 1971 年发表的论文中,以具有约束条件的力学模型和性能最优准则作为两足步行优化问题的核心,

而以一种简化模型作为研究对象. 但最后, 他们仅是以局部耗能最少为基础得出了一个优化结果^[11].

前面我们曾指出, Vukobratovic 也对类人型两足步行系统进行了能量分析^[26], 但他仅限于导出各关节及整个步行系统的功率随时间的变化关系, 并没有过多地涉及能耗最优这个问题. 但在他的研究中, Vukobratovic 得出了一个有用的结论, 即步行姿态越平滑, 类人型两足步行系统所消耗的功率就越少.

下面介绍一下样机研制方面的主要情况. 早在 50 年代中期, 美国通用电气公司就制造了一台名为“Hardiman”的步行车^[12], 但当时的驱动和伺服控制技术显然还不足以使 Hardiman 进入实用化阶段.

1986 年至 1971 年间, 牛津大学的 Witt 等人曾制造和完善了一个两足步行机器人. 当时他们的主要目的是为瘫痪者和下肢残疾者设计实用的辅助行走装置. 这个机器人在平地上走得非常好, 步速为 0.23 米/秒, 功率消耗约 4 瓦^[12].

1972 年, 日本早稻田大学的加藤一郎教授及其合作者设计的 Wabot(前身为 WL-5)是迄今为止最象的一个两足步行机器人, 它除有两条腿之外, 还具有许多其它拟人的特征. Wabot 首次步行是在 1973 年, 它具有一定的自律性, 能完成低速度的静态稳定步行^[13].

后来, 加藤他们又制造了一系列两足步行机器人. 这些机器人一般都是液压驱动的, 每条腿上一般具有 5 个自由度, 典型的步长和步行周期分别是 15 厘米和 15 秒, 并且它们都能实现静态和准动态步行. 特别值得一提的是, 这些科学家在 1984 年成功地使他们研制的 WL-10RD 两足步行机器人实现了动态步行, 步幅为 43.18 厘米, 步速达到 1.3 秒/步^[14]. WL-10RD 机器人重 84 公斤, 在其本体上安装了一台 Z8002 微型计算机, 用来控制它的步行运动.

在 80 年代初, 东京大学的 Miura 和 Shimoyama 研制了 5 种类型的两足步行机器人, 它们依次被命名为 BIPER-1, 2, 3, 4, 5^[15]. 所有这些机器人都不能保持静态稳定, 但在适当的控制作用下都能实现动态步行. BIPER-1 和 BIPER-2 只能侧行; BIPER-3 是一个高跷型机器人, 脚与地面以点状接触, 它既能侧行, 也能前进、后退; BIPER-4 的两条腿具有与人完全相同的自由度; 而 BIPER-5 则与 BIPER-3 相似, 但 BIPER-5 的所有仪器, 如计算机等, 都安装在其本体上.

1982 年, 东京理工学院的 Funabashi 等人设计了一个名为 MEG-2 的两足步行机器人, 在该机器人的连杆机构上安装有重力和惯性力补偿装置. 在 1985 年的实验中, 该机器人实现了高速步行(125 步/分)^[6].

此外, 日本还有很多科学家和技术人员在 80 年代也研制了一些两足步行机器人. 其中有的采用最优调节器和数字控制理论来控制两足步行机器人的运动, 有的用形状记忆合金作为关节驱动器, 而有的则是研究轨迹产生算法或试将神经网络理论用于步行机器人运动控制.

在 1985 年以前, 样机的研制主要是日本的科学家做出了突出的贡献.

4 两足步行机器人研究的近期情况和现状

从 80 年代中期到现在, 虽然理论研究和样机研制不象 1985 年以前那样丰富, 但也颇具特色. 重要的是, 国内正是在这一时期全面开展了两足步行机器人的研究. 下面, 首先看看美国的有关情况.

1985 年, 美国的 Hodgins 和 Raibert 等人研制了一个用来进行奔跑运动和表演体操动作

的平面型两足步行机器人,这个机器人有3个自由度.1986年,他们用这个机器人进行奔跑实验,着重研究奔跑过程中出现的弹射飞行状态.在实验中,这个机器人的最大速度高达4.3米/秒^[17].1988年和1990年,他们又用这个机器人进行翻筋斗动作实验^[18].Hodgins和Raibert研究这两种运动是因为它们含有丰富的动力学内容,尤其是两者都具有弹射飞行状态.

在美国研究两足步行机器人的科学家中,郑元芳(Y. F. Zheng)博士是一个非常杰出的人物.他在80年代初由中国去了美国,并于1984年在俄亥俄州立大学获博士学位,然后一直在克莱姆森大学工作,最近又回到俄亥俄州立大学任职.在克莱姆森大学期间,他主持研制了两台步行机器人,分别命名为SD-1和SD-2.SD-1具有4个自由度,SD-2则有8个自由度.其中,SD-2是美国第一台真正拟人的两足步行机器人.1986年,SD-2机器人成功地实现了平地上前进、后退以及左、右侧行.1987年,这个机器人又成功地实现了动态步行^[19,20].郑元芳博士也因他在机器人领域的突出贡献而获得美国1987年度“总统青年研究员”奖^[20].

1984年,郑元芳博士对两足步行机器人与环境接触时的碰撞效应进行了研究^[21].1987年,他提出了一种用于两足步行机器人运动控制的监控系统^[22].1989年,他研究了两足步行机器人的扰动抑制问题^[20].1990年他首次提出了使两足步行机器人能走斜坡的控制方案,并利用SD-2机器人进行了成功的实验^[23].此外,郑元芳博士还从神经生理学的角度对人类肌肉的多级传感与多级驱动原理进行了研究,并提出了采用这种原理设计两足步行机器人的方法^[24].

下面我们再看看国内在两足步行机器人方面的研究情况.

我国从80年代中期才开始研究两足步行机器人,当时主要的研究单位是哈尔滨工业大学和国防科技大学.

哈尔滨工业大学研制成功的第一台两足步行机器人重70kg,高110cm,有10个自由度,采用直流电机经谐波减速驱动,控制系统由一台IBM-PC/XT计算机和10个MCS-51单片机系统组成.1989年10月,这个机器人实现了地面上的前进,左、右侧行以及上、下楼梯的运动,步幅可达45cm,步速为10秒/步,为静态步行.

最近哈尔滨工业大学又研制了一台12自由度的两足步行机器人,并正在进行动态步行的实验.

国防科技大学在1988年春天成功地研制了一台平面型、6自由度的两足步行机器人KDW-I.它能前进、后退和上、下楼梯,最大步幅为40cm,步速为4秒/步.1989年,他们又成功地研制了一台空间运动型的两足步行机器人KDW-II.该机器人具有10个自由度,体高69cm,重13kg,各关节采用直流伺服电机经谐波减速驱动,系统采用局部关节伺服控制,离线步态规划和局部实时修正方案,用一台16位微机进行步态协调控制.在1989年,KDW-II机器人实现了前进、后退、上下台阶的静态稳定步行以及左、右的准动态步行.1990年国防科技大学在KDW-II的平台上安装了两个垂直关节,进一步发展成KDW-III.该机器人已有12个自由度,除具有KDW-II的全部功能外,还能做转弯运动,真正实现了实验室环境中的全方位行走.

国防科技大学还将工业机器人的轨迹示教方法用到了两足步行机器人的步态规划中,形成了步行机器人的步态示教规划技术.

我们南京航空学院从1989年秋天起也开展了一个两足步行机器人的研究计划,现在已研制出一台8自由度空间运动型的两足步行机器人,命名为NAIWR-1.目前,这一计划正在实

施中^[25]。

总观起来,两足步行机器人研究的现状是:国外,主要是日本和美国,对两足步行机器人的研究已经达到了相当高的水平,研制出了能静态或动态行走的多种样机。国内由于起步较晚,前一段刚完成静态稳定步行的研究,目前,正处于准动态和动态稳定步行的研究阶段。虽然国内的研究水平还不象国外那样高,但在短短的五六年时间能达到今天的水平,已经是相当惊人的了!

5 两足步行机器人研究的发展趋势

概括起来,两足步行机器人的发展趋势包括如下 10 个方面:(1)能动态稳定地高速步行。(2)能以自由步态全方位灵活行走。(3)具有良好的地形适应性。(4)具有极强的越障和回避能力。(5)具有很高的载重/自重比。(6)可靠性高、工作寿命长。(7)具有丰富的内感知和外感知系统。(8)控制系统和能源装置机载化。(9)具有完全的自律能力。(10)具有灵活的操作能力(安装一个或多个机械手)。

6 结束语

本文较详细地介绍了国内外两足步行机器人研究的主要情况。我们相信,随着整个机器人技术及相关技术的发展,在不久的将来,两足步行机器人一定能够真正进入实用化阶段,在各行各业中发挥重要作用。

参 考 文 献

- 1 Muybridge E. The horse in motion as shown by instantaneous photographs. London, England, 1982
- 2 Bernstein N A. Investigations in biodynamics of locomotion. Moscow, WIEM, 1935, 1
- 3 Tomovic R. A general theoretical model of grepping displacement. Cybernetics, English Translation, 1961, 4
- 4 Fansworth R L. Gait stability and control of a five link model of biped locomotion. M S Thesis, Ohio State University, Columbus, 1975
- 5 Hemami H. Reduced order models for biped locomotion. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1978; SMC-8(4): 321-325
- 6 Vukobratovic M, Stepanenko Y. On the stability of anthropomorphic systems. Mathematical Biosciences, 1972; 15: 1-37
- 7 Bessonov A P, Um nov N V. The analysis of gaits in six-legged vehicles according to their static stability. 1st CISM-IFTToMM Symp on Theory & Practice of Robots & Manipulators, 1973
- 8 Kugushev E I, Jaroshevskij V S. Problems of selecting a gait for an integrated locomotion robot. IJCAI-75, 1975
- 9 Hemami H, Weimer F C, Koozekanani S H. Some aspects of the inverted pendulum problem for modelling of locomotion systems. Proc of 1973 JACC
- 10 Ogo K, Ganse A, Kato I. Quasidynamic walking of biped walking machine aiming at completion of steady walking. 3rd CISM-IFTToMM Symp on Theory & Practice of Robots & Manipulators, 1980
- 11 Chow C K, Jacobson D H. Studies of human locomotion via optimal programming. Mathematical Biosciences, 1971; 10: 239-306
- 12 Todd D J. Walking machines; an introduction to legged robots. Kogan Page Ltd, London, 1985
- 13 Kato T *et al.* Information-power machine with senses and limbs. 1st CISM-IFTToMM Symp on Theory & Practice of Robots & Manipulators, 1973
- 14 Takaniishi A *et al.* The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD. Proc of the 1985 ICAR,

- 1985; 459-466
- 15 Miura H, Shimoyama I. Dynamic walk of a biped. *The IJRR*, 1984; 3(2): 60-74
 - 16 Funabashi H *et al.* Synthesis of leg-mechanisms of biped walking machines, part 1: synthesis of ankle-path-generator. *Bull JSME*, 1985; 237(28): 537-543
 - 17 Hodgins J, Koeching J, Raibert Marc H. Running experiments with a planar biped. *Robotics Research: The Third International Symp*, The MIT Press, 1986; 349-355
 - 18 Hodgins J, Raibert Marc H. Biped gymnastics. *Robotics Research: The Fourth International Symp*, The MIT Press, 1988; 5-14
 - 19 Zheng Y F, Sias F R, Jr. Design and motion control of practical biped robots. *Proc IASTED Int Symp Robotics and Automation*, St Barbara, CA, May 1987; 166-170
 - 20 Zheng Y F. Acceleration compensation for biped robots to reject external disturbance. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989; SMC-19(1): 74-84
 - 21 Zheng Y F, Hemami H. Impact effects of biped contact with the environment. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1984; SMC-14(3): 437-443
 - 22 Zheng Y F, Pan L, Rao M N M. A supervisory system for motion control of a biped robot. *Proc of the Nineteenth IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, 1987; 432-435
 - 23 Zheng Y F, Shen J. Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1990; 6(1): 86-96
 - 24 Sias F R Jr, Zheng Y F. Static stability problems in biped robot design. In Ref 22, 1987; 436-440
 - 25 Tan G Z, Wei Z X, Zhu J Y. Mechanism design and analysis of a three dimensional biped robot. *Proc of CIRP Conference on Precision Engineering and Manufacturing System*, Tianjin, China, 1991; 593-599
 - 26 马培荪,沈乃勋译,(南)M.伍科布拉托维奇著.步行机器人和动力型假肢.科学出版社,1983

(上接第 58 页)

AN ARCHITECTURE OF INTELLIGENT MOBILE ROBOT

HE Kezhong

(Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract

In this paper, an architecture of intelligent mobile robot is introduced, the composition and function of intelligent level, coordinate level and executive level are also introduced.

Key words: architecture intelligent level coordinate level executive level