双足机器人稳定性与控制策略研究进展①

付成龙② 陈 恳

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘 要 对双足步行机器人的稳定性与控制策略的最新研究进行了综述。分析了双足步行模型的单边约束、混杂,及变拓扑的固有特性,介绍了基于 ZMP 的姿态稳定判据和基于庞加莱映射(Poincaré Map)的步态稳定判据。根据质心和 ZMP 与支撑凸多边形的关系,提出了双足运动的动态程度分类。总结了基于轨迹规划的时变控制策略与基于虚拟约束的定常控制策略,分析了各自的优缺点。最后探讨了这一研究领域的发展方向。

关键词 双足机器人,混杂系统,单边约束,稳定性,控制策略

0 引 言

具有自如多样的运动能力是生物体特有的属性。没有这种能力,生物体将无法猎取食物,无法生存,无法繁衍生息。在各种运动形式中,双足步行运动是高级生命所特有的运动形式,对这种运动形式的机理研究及其机械再创造是一项极富挑战的课题,其研究动机分为纯科学探究[1]和商业目的[2]两种。

机器人学学术界对双足运动的研究已有多年,其中比较好的入门读物有南斯拉夫学者 Vukobratovic[3]与美国 MIT 的 Raibert 的著作[4],感兴趣的读者也可以参考有关网站[5-9]。

在过去的 40 多年里,公司、大学、研究所开发的双足机器人样机数以百计,我国国防科技大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学以及清华大学等高校也分别研制了仿人机器人样机。在这其中,日本本田公司在样机技术上取得的进步[2]最让人瞩目,但从其公开的录像可以看出,本田机器人 ASIMO 仍然采用零力矩点(zero movement piont, ZMP)稳定判据规划其运动,在相同的步速下,与人类的行走模式还有较大区别,且无法解释和实现 ZMP 稳定判据以外的双足运动。正如美国 MIT 腿实验室的 Pratt 教授所说:本田公司设计控制器的方法无法解释为什么给定的轨迹有效,也无法解释在崎岖路面上选择轨迹模式的内在机理[10]。

尽管经过近半个世纪的努力,双足步行机还是没能走入实际应用领域。作者认为,双足步行研究的瓶颈问题并不在于样机的开发与研制,而是在步行基础理论的突破。

双足机器人要取得进一步的发展,就必须要研究双足运动的内在固有特点,必须深入研究其稳定性与控制机理。只有解释清楚了这一系列机理性问题,双足步行机的研制才能有本质上的进步。基于这种认识,本文对双足机器人稳定性与控制等略研究进行了综述。

1 双足运动的固有特点

1.1 单边约束特性

双足机器人的运动发生在地面环境之上,且只能受到地面对其单方向的作用力,这可以写成如下的单边约束形式:

$$F(q) \geqslant 0,\ q \in R^p,\ F: R^p \to R^m \tag{1}$$

式中,q 为步行系统中独立的广义坐标,p 为系统自由度数目,m 为约束的数目。

受 m 个单边约束的 p 自由度步行机器人系统的动态模型可以写成如下的动力学方程组[11]:

$$D(q)\ddot{q} + N(q,\dot{q}) = Bu + \nabla F(q)\lambda_n \tag{2}$$

$$\lambda_n^T F(q) = 0,\ \lambda_n \geqslant 0,\ F(q) \geqslant 0 \tag{3}$$

$$\text{摆动足触地时碰撞模型} \tag{4}$$

$$\text{支撑足与地面摩擦模型} \tag{5}$$

式中 $D(q)$ 为惯性矩阵,$N(q,\dot{q})$ 为包含科氏力、向心力及惯性力的 p 维向量,u 为关节驱动输入力,$\lambda_n \in R^m$ 为拉格朗日乘子,其代表地面接触力。$\nabla F(q) = (\partial F/\partial q)(q) \in R^p \times R^m$ 为约束的梯度矩阵。$\lambda_n^T F(q) = 0$ 表明:当 $F(q) > 0$ 时,机器人摆动

① 863 计划(2003AA420010-05)、国家自然科学基金(50575119)资助项目。
② 男,1980 年生,博士生;研究方向:双足机器人稳定性与控制;联系人,E-mail:fcl02@mails.tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2005-06-28)

腿未与地面接触，$\lambda_n = 0$；当 $F(q) = 0$ 时，机器人摆动腿与地面接触，$\lambda_n \geqslant 0$。

1.2 混杂特性

由于步行过程中，双足与地面间约束形式的多样化，使得双足运动呈现一个多模型的动态混杂系统。所谓混杂系统，指的是同时具有连续和离散特性的动态系统。

一般来讲，根据机器人足与地面间的接触形式，可以将步行过程粗略的分为四种子系统：

Ω_k^f：腾空相，双脚离地；

Ω_k^{sl}：左脚支撑相，右脚离地；

Ω_k^{sr}：右脚支撑相，左脚离地；

Ω_k^{ds}：双脚支撑相，双脚于地面接触。

这样，步行系统可以表述成如下的混杂系统：

$$Walking = \Omega_0^{sl} \cup \Omega_0^{ds} \cup \Omega_0^{sr} \cup \Omega_1^{ds} \cup \Omega_1^{sl} \cup \cdots \quad (6)$$

跑步系统可以表述成如下的混杂系统：

$$Running = \Omega_0^f \cup \Omega_0^{sl} \cup \Omega_1^f \cup \Omega_1^{sr} \cup \Omega_2^f \cup \Omega_1^{sl} \cup \cdots \quad (7)$$

碰撞是导致系统混杂的另一个原因。当摆动腿触地时，机器人与地面发生碰撞，使得系统的状态变量发生突变，使得步行系统的动力学特性是非光滑的，碰撞是步行机器人的固有特点。

传统的做法是尽量回避碰撞对系统稳定性的影响：在脚底板加缓冲橡胶及缓冲气囊，规划摆动足落地瞬时速度为零[12]，尽量减小碰撞。这些方法很难适用于大步幅快速步行和跑步，因为此时碰撞是不可避免的。

1.3 驱动模式的变拓扑特性

由于双足机器人与地面环境间约束形式的变化，机器人与环境组成的系统在不同相期的自由度数目不同，而系统的驱动数目固定，因此其驱动模式的拓扑结构是变化的。

在单腿支撑相时，步行系统为开链机构，系统自由度数目等于驱动关节数，称为“完全驱动模式”；在双腿支撑相时，步行系统为闭链机构，系统自由度数目小于驱动关节数，称为“过驱动模式”；在腾空相时，步行机不受地面的约束，系统自由度数目大于驱动关节数目，称为“欠驱动模式”。

2 稳定性判据

2.1 基于 ZMP 的姿态稳定判据

双足运动稳定性是仿人机器人理论框架中的核心问题。运动稳定性的一般定义最早是由 Lyapunov 提出的，他通常是研究平衡点的稳定性，而步行运动没有一个固定的平衡点，又由于双足运动的上述固有特性，因此，Lyapunov 稳定性的概念和理论不能准确解释双足步行机器人的稳定性问题。

由于经典的稳定性概念及其理论方法的不适用，南斯拉夫学者 Vukobratovic 在 1969 年提出了著名的 ZMP 稳定性概念与判据[3,13]。其核心思想是要确保单腿支撑期的机器人足与地面完全接触，使得各个自由度直接可控，避免出现欠驱动的翻转情形。根据足底的力学平衡方程可以得到姿态稳定判据为：ZMP 必须时刻落在支撑凸多边形内部，如图 1 所示。时至今日，这一方法仍被作为双足运动稳定性的判定准则[14,15]。

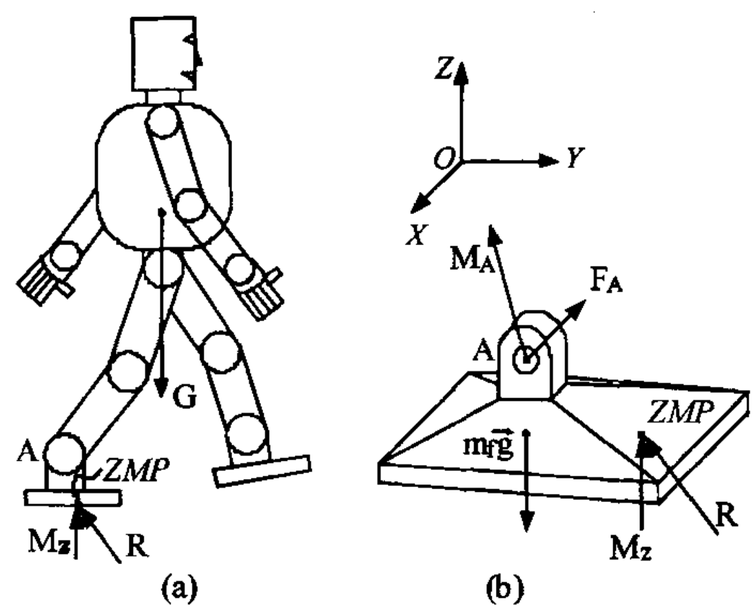

图 1 双足步行机及支撑足受力情况

在 Vukobratovic 提出 ZMP 稳定性概念与判据之后出现过众多版本的 ZMP 定义，其中大多数都将 ZMP 等同于压力中心。在 ZMP 概念的基础上，Goswami[16]提出了足翻转指示器(foot rotation indicator)，Garcia[17]提出了步行稳定裕度；Huang[12]提出了有效稳定区域。这些概念的基本思想仍是尽量避免欠驱动的翻转情形。

2004 年 Vukobratovic 在文献[18]中又重新对 ZMP 进行定义，即 FRI 在支撑区域之内时对应 ZMP，在支撑区域之外时对应虚拟零力矩点(fictitious zero moment point)。这与几十年来众多研究者的理解不同，按照 Vukobratovic 重新给出的定义，在所谓的动态平衡状态，即支撑脚与地面充分接触的平衡状态，无论 ZMP 的何种定义，都与 FRI 以及压力中心(center of pressure, COP)重合。

从步行的动态程度考虑，根据质心和 ZMP 与支撑凸多边形的关系，可以将步行运动分成静态运动、准动态运动及动态运动。满足 ZMP 稳定判据的运动属于静态运动和准动态运动，如图 2(a)和图 2(b)

所示。ZMP 判据无法解释图 2(c)的动态运动的稳定性问题。

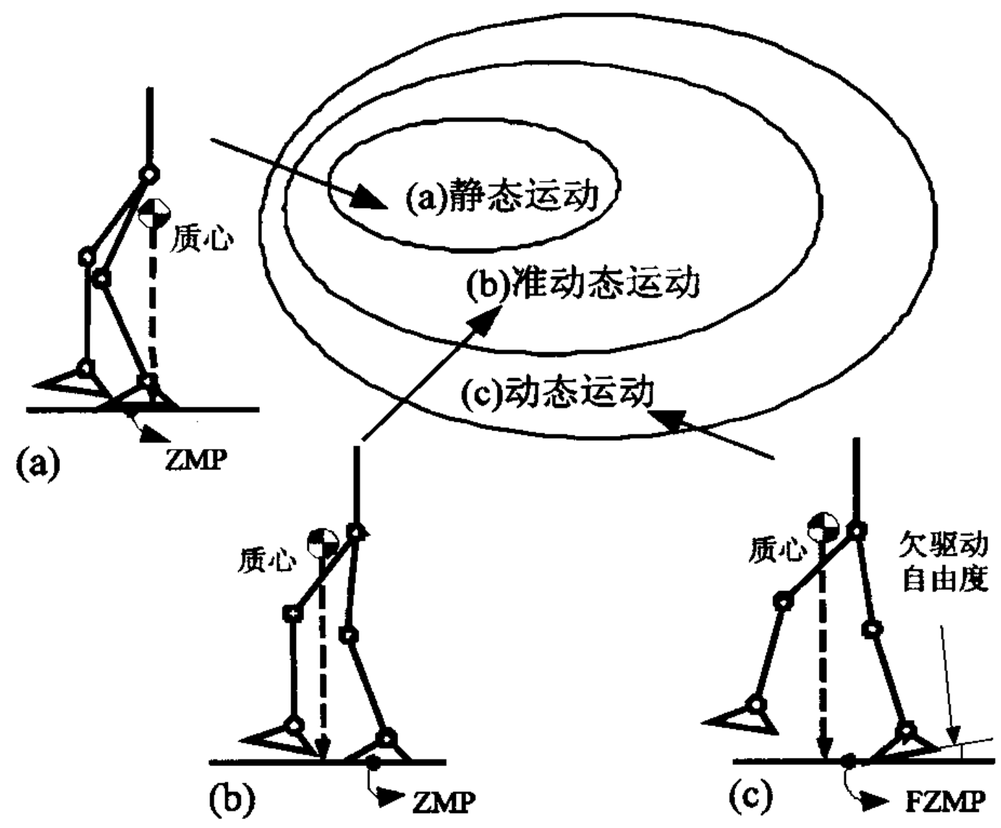

图 2　双足步行运动的分类

ZMP 本是针对双足步行提出的,但一些研究人员将其应用到双足跑步领域。Kajita[19]将机器人简化为一个无质量弹簧腿的倒立摆,在单腿支撑期遵守 ZMP 准则,在腾空期根据弹道模型得到飞行轨迹。北京理工大学李朝晖[20]将跑步稳定性分为支撑阶段和腾空阶段,在支撑阶段限制机器人足与地面完全接触,仍然遵守 ZMP 稳定准则。2003 年,Sony 公司发布了其跑步机器人 QRIO 的实验录像。2004 年底,日本 Honda 公司公布了 ASIMO 的跑步实验录像。基于商业机密的考虑,以上公司没有公布其技术细节,但从录像可以明显看出,这些机器人平脚板落地和平脚板腾空,仍然遵守 ZMP 平衡准则。

实质上,ZMP 的基本概念和判据是通过对约束的描述,确切地说是对机器人足与地面完全接触的约束,来间接反映静态和准动态步行的平衡性,由于没有从步行的本质去研究稳定性,并缩小了步行运动的范围,因而无法解释图 2(c)的动态运动。

由于长期沿用 ZMP 判据来研究双足步行机器人,各种相关研究一直没有从根本上突破其基本概念、定义及其理论模型,致使双足步行的基础理论严重滞后于仿人机器人样机技术的发展,并且已经成为进一步揭示人类复杂步行运动规律,提高样机步行性能,实现大步幅快速步行、动态跑步和跳跃等类人重要运动功能的瓶颈问题。

2.2　基于庞加莱映射的步态稳定判据

为了解释双足被动机器人的步态稳定性问题,研究人员从动力系统的研究角度,提出了庞加莱映射的分析方法。

庞加莱映射是分析动力系统的经典工具,它是用 $n-1$ 阶的离散系统替换 n 阶连续系统的流。如图 3 所示,令 $\phi(t,x^*)$ 是 n 阶连续系统的周期轨道,x^* 是 $\phi(t,x^*)$ 上的一点,S 是过 x^* 点的 $n-1$ 维超平面(庞加莱截面),并在 x^* 点于 $\phi(t,x^*)$ 横截。在 x^* 的邻域内取一点 $x^{(0)}\in S$ 为系统初始点,第 k 次返回 S 的交点为 $x^{(k)}$,则庞加莱映射可表示为:

$$x^{(k+1)} = P(x^{(k)}) \tag{8}$$

将式(8)在 x^* 处线性化,可得

$$x^{(k+1)} = J(x^{(k)}) \tag{9}$$

其中 J 为雅可比矩阵,J 的特征值称作 Floquent 乘子。

若庞加莱映射的雅可比矩阵在平衡点处的特征值在单位圆内,则周期轨道 $\phi(t,x^*)$ 渐进稳定。

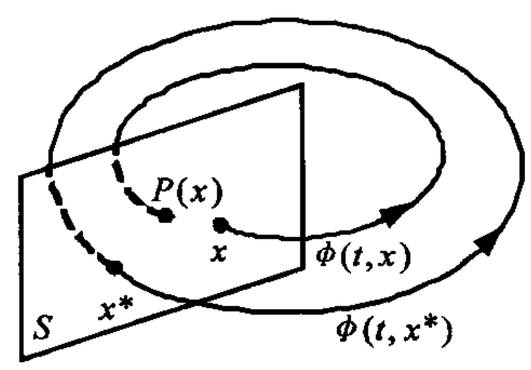

图 3　动力系统的庞加莱映射

双足步行的稳定步态在相空间中表现为稳定的极限环,而极限环是庞加莱映射上的固定点,所以步态的稳定性研究可简化为对庞加莱映射固定点的稳定性研究。其计算过程是在极限环附近对机器人的状态引入小的扰动,然后计算敏感矩阵的特征值。若所有的特征值都在单位圆内,则轨道渐进稳定。

Grizzle[21]等人用扩展的庞加莱映射方法,从混杂系统的角度分析了无足双腿机器人的动态行走问题,并在法国科学研究中心(CNRS)研制的样机 Rabbit[22]上实现了无足动态步行。Mombaur[23]等人利用 Floquent 乘子进行了步态稳定性的数值优化。

由于双足机器人动力学的复杂性,通常无法得到庞加莱映射的解析形式,只能借助于数值方法计算庞加莱返回映射,找到固定点。目前,该方法还仅限于简单模型的被动机器人、无足双腿机器人和基于简单模型的跳跃机器人。

3　控制策略

3.1　时变控制策略

双足运动的控制策略是双足机器人框架中的又

一核心理论问题。其可分为时变控制策略与定常控制策略。

目前,绝大多数的步行机都采用时变的控制策略。其基本思想是:根据一定的约束条件,离线规划出各个关节相对时间的运行轨迹 $q_d(t)$,机器人实际行走时跟踪各个关节轨迹。必要时,根据机器人内部的传感器信息和外部的环境信息,适当修正理想的关节轨迹,如图4中虚线所示。

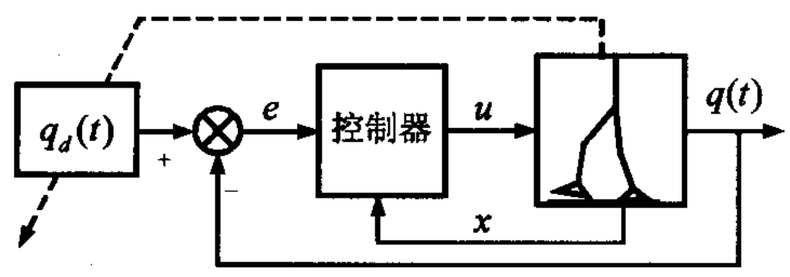

图4 时变控制策略

为了控制 Meltran II 的行走,Kajita[24]等人以近似倒立摆的模型来规划关节轨迹,采用 PID 算法来跟踪期望轨迹。Furusho[25]等人对 3D 步行机器人 BLR-G2 在径向平面和切向平面进行解耦控制。在切向平面,采用 PID 控制来保证躯干的竖直状态;在径向平面,将机器人视为倒摆模型,采用轨迹跟踪来调节机器人的角动量。为了控制三自由度的平面机器人的行走,Grishin[26]等人首次提出离线轨迹规划和在线姿态调整的概念。为了控制一个五自由度平面机器人稳定行走,Mitobe[27]等人采用计算力矩法来调节机器人的质心和摆动腿的位置。为了实现在崎岖路面上稳定行走,Huang[28]等人采用了离线轨迹规划与在线姿态调整的方法,通过优化髋关节两个位置参数,来保证 ZMP 在期望的有效稳定区域内部,通过躯干姿态控制器、落地时间控制器以及实际 ZMP 控制器,来实时地修正期望的关节轨迹,如图5所示。

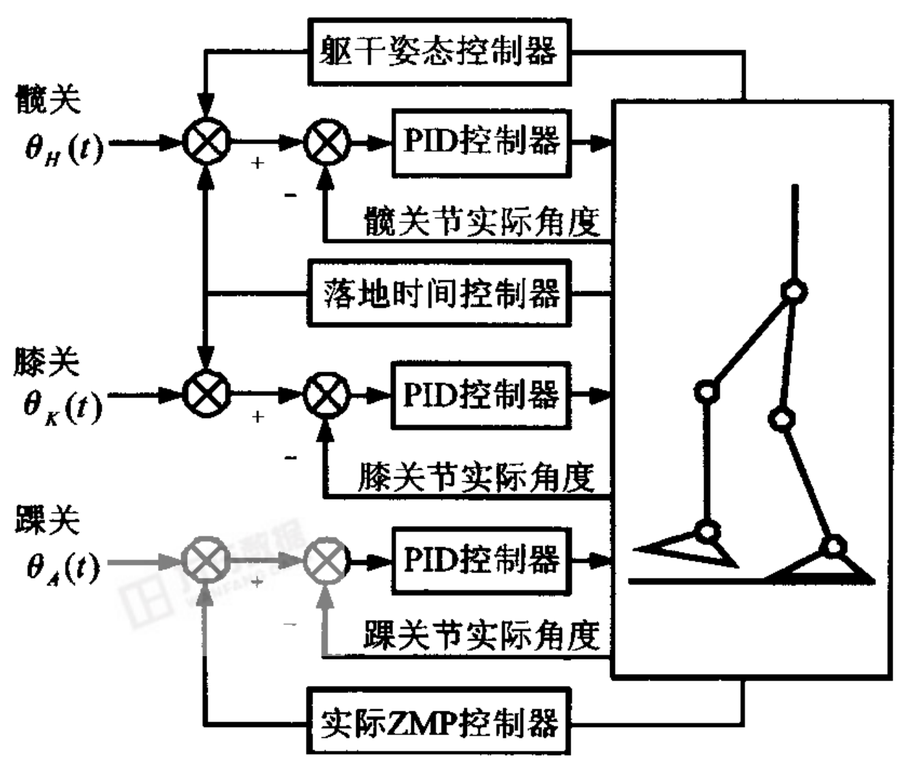

图5 离线轨迹与在线调整

基于轨迹跟踪的时变的控制策略可以实现崎岖路面上行走和爬楼梯等复杂移动功能。但另一方面,这种控制策略对系统强制施加了一个外部时钟,导致系统是时变的,使得对闭环系统的深入分析变得异常困难,无法给出大闭环系统稳定性的严格证明,而且这种方法的控制器参数是通过大量的实验确定的,缺乏一般的指导意义。

3.2 定常控制策略

除了上述的基于轨迹跟踪的时变控制策略,还有一种定常控制策略,其结构体系如图6所示。定常控制策略的核心思想是将步行运动规划为一个完整的虚拟约束[21,22,29],使得各个关节的运行轨迹同步于系统内部的一个参数 $\theta(q)$,而不是外部时间。最后通过反馈控制渐进稳定地实现预设的虚拟约束。

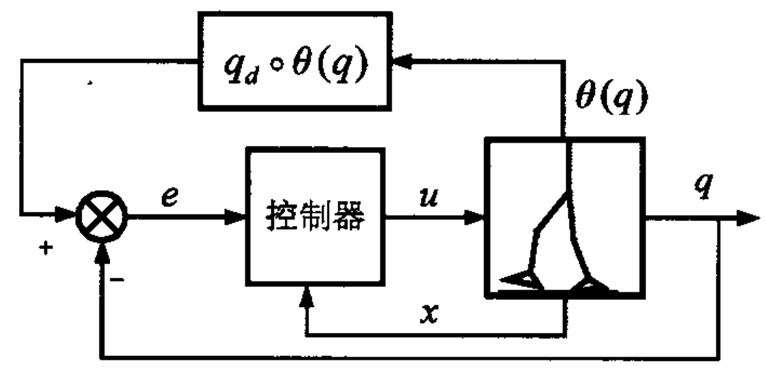

图6 定常控制策略

在仿真的环境下,Hurmuzlu[30]对平面5自由度无足双腿机器人的行走状态,施加了一系列参数化的虚拟约束,研究了在特定条件下的步态和稳定特性。为了能够使 Spring Flamingo 在崎岖路面上行走,MIT 的 Pratt[31]等人提出了虚拟模型的控制方法。这种方法比较直观,但是无法解释系统鲁棒性和高效性是怎样获得保证的,无法给出这些的步行机理性问题的深入解释。

Takahashi[32]通过设定躯干和摆动腿的函数关系,成功地控制了四杆平面机器人的稳定行走。在这种算法的控制下,身高为0.8m的步行机器人能够以0.29m/s的速度稳定行走。

Chevallereau[33]和 Westervelt[29]等人针对 Rabbit 样机[17],采用了时不变的轨迹优化算法。为了得到精确的理论分析结果,Grizzle[21]等人采用了一个独特的模型:一个平面三杆的无足机器人,机器人与地面之间没有驱动器,机器人总是处于欠驱动状态。通过施加一系列的虚拟完整约束,行走过程可以被参数化成机器人系统状态的单调递增函数。

由于没有直接规划各个关节相对于外部时间的

运动轨迹,这种控制策略通常能够给出闭环系统的稳定性分析结果。但目前该方法还仅限于少自由度的双足步行机器人和平面无足双腿机器人。

4 结论与展望

综上所述,近年来机器人领域的研究人员对双足机器人的稳定性与控制策略进行了大量的研究,取得了一系列的重要进展。但是在以下几个方面还需要更进一步研究。

第一,双足运动的动态稳定与控制机理。稳定性是仿人机器人的核心问题,目前基于 ZMP 的准动态理论的不能满足双足机器人今后的发展需要,也无法解释自然界双足生物的复杂运动。因此迫切需要一套具有更广应用范围的、适合双足机器人的动态运动的稳定性理论体系。

第二,双足步行运动的固有鲁棒性机理。双足步行的鲁棒性问题是仅次于稳定性的另一个重要研究领域。双足生物对路面环境、对自身的力学参数都具有很强的鲁棒性。而目前的双足机器人的步行运动对环境和自身的力学参数依赖性很大,因此给出这种鲁棒性的数学意义上的内蕴解释和严格证明就显得十分重要。

第三,实时步态规划与控制。目前双足机器人步态规划的研究主要集中在离线的产生,这种规划模式在一定程度上限制了步行的灵活性。因此,需要采用在线步态合成方法解决双足机器人对不同环境的适应性问题。计算机技术的发展在一定程度上解决了计算速度的瓶颈问题,因而实时步态规划与基于传感器的大闭环反馈控制是未来的研究方向。

参考文献

[1] Dickinson M, Farley C, Full R, et al. How animals move: an integrative view. *Science*, 2000, 288(5463):100-106

[2] Honda Corporation. ASIMO website. http://world.honda.com/ASIMO/. 2005

[3] Vukobratovic M, Borovac B, Surla D, et al. Scientific fundamentals of robotics 7: Biped locomotion. New York: Springer, 1990

[4] Raibert M H. Legged robots that balance. Cambridge, MA: MIT Press, 1986

[5] Willis C. World's greatest android projects. http://androidworld.com/prod01.html: Android World Inc., 2005

[6] Balaguer C. Humanoid robots catalog. http://www.uc3m.es/uc3m/dpto /IN/dpin04/indexrob.html: Robotics Lab of the University Carlos III of Madrid, 2003

[7] Kajita S. Biped robot database. http://staff.aist.go.jp/s.kajita/bipedsite-e.html :AIST, 2005

[8] Berns K. The walking machines catalogue. http://www.walking-machines.org: Technical University of Kaiserslautern, 2005

[9] Kimura H. Legged robots sites. http://www.kimura.is.uec.ac.jp/faculti es/legged-robots.html: Kimura Lab, 2001

[10] Pratt G A. Legged robots at MIT: What's new since Raibert. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2000, 7(3): 15-19

[11] Brogliato B. Some perspectives on the analysis and control of complementarity systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 918-935

[12] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280-289

[13] Vukobratovic M, Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1969, 16(1): 1-6

[14] 张永学, 麻亮, 强文义. 基于多传感器信息的双足机器人步行系统的研究. 高技术通讯. 2001, 11(126): 66-69

[15] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. A realtime pattern generator for biped walking. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington D.C., USA. May 2002: 31-37

[16] Goswami A. Foot Rotation Indicator (FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Detroit, USA. May 1999: 47-52

[17] Garcia E, Estremera J, Santos G. A classification of stability margins for walking robots. In: Proceedings of the 5th International Conference on Climbing and Walking Robots. Paris, France. 2002: 25-27

[18] Vukobratovic M, Branislav B. Zero moment point: Thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2004, 1(1): 157-173

[19] Kajita S, Nagasaki T, Yokoi K, et al. Running pattern generation for a humanoid robot. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington D. C., USA. May 2002: 2755-2761

[20] Li Z H, Huang Q, Li K J, et al. Stability criterion and pattern planning for humanoid running. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, USA. April 2004: 1059-1064

[21] Grizzle J W, Abba G, Plestan F. Asymptotically stable walking for biped robots: Analysis via systems with impulse ef-

fects. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46 (1): 51-64

[22] Chevallereau C, Abba G, Aoustin Y, et al. RABBIT: A testbed for advanced control theory. *IEEE Control System Magazine*, 2003, 38(2): 1-51

[23] Mombaur K D, Bock H G, Schloder J P, et al. Human-like actuated walking that is asymptotically stable without feedback. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul, Korea. May 2001: 4128-4133

[24] Kajita S, Yamaura T, Kobayashi A. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(4): 431-438

[25] Furusho J, Sano A. Sensor-based control of a nine-link biped. *The International Journal of Robotics Research*, 1990, 9(2): 83-93

[26] Grishin A A, Formalsky A M, Lensky A V, et al. Dynamical walking of a vehicle with two telescopic legs controlled by two drives. *The International Journal of Robotics Research*, 1994, 13(2): 137-147

[27] Mitobe K, Mori N, Aida K, et al. Nonlinear feedback control of a biped walking robot, In: Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Nagoya, Japan. April 1995: 2865-2870

[28] Huang Q, Kaneko K, Yokoi K, et al. Balance control of a biped robot combining off-line pattern with real-time modification. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, USA. April 2000: 3346-3352

[29] Westervelt E R, Grizzle J W, Koditschek D E. Hybrid zero dynamics of planar biped walker. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 42-56

[30] Hurmuzlu Y. Dynamics of bipedal gait. *Journal of Applied Mechanics*, 1993, 60(2): 331-343

[31] Pratt J E, Chee M C, Torres A, et al. Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20 (2): 129-143

[32] Ono K, Takahashi R, Shimada T. Self-excited walking of a biped mechanism. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(12): 953-966

[33] Chevallereau C, Aoustin Y. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*, 2001, 19 (5): 557-569

Research progress on stability and control strategy for biped robots

Fu Chenglong, Chen Ken

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper surveys the latest progress of researches on stability and control strategy for biped robots. The inherent properties of biped systems which are subject to unilateral constraints, hybrid, and topology-variant are analyzed. Posture stability criterion based on ZMP (Zero Moement Point) and gait stability criterion based on Poincaré map are introduced. The classification of biped locomotion, based on dynamic level, is proposed. The time-variant control strategy based on trajectory planning and the time-invariant control strategy based on virtual constraints are both reviewed. Some suggestions about the future research are also presented.

Key words: biped robots, hybrid system, unilateral constraints, stability, control strategy