

双足机器人步态控制研究方法综述

胡凌云 孙增圻

(清华大学计算机科学与技术系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)
(huly02@mails.tsinghua.edu.cn)

Survey on Gait Control Strategies for Biped Robot

Hu Lingyun and Sun Zengqi

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As humanoid robots shift from research lab to human living environment, biped robots play a more important role in recent research. Peoples are attracted by biped robots for the difficulties in gait control since their dynamic equations are high-order highly-coupled and nonlinear. This paper presented the basic concepts in biped gait and major research methods in the filed of biped gait optimization and control. Characters of three major models including inverted pendulum, passive gait model and mass-spring model are thoroughly discussed. Advantages and disadvantages of all these three models are exhibited by comparison. Followed with it, the two kinds of usually used constraints, stability criterion and energy constraint are introduced with abundant examples. For stability criterion, zero moment point (ZMP) criterion as the most useful constraints in biped gait generation research is emphasized. Finally three intelligent control methods (neuron network, fuzzy logic and genetic algorithm) with their combination methods (fuzzy neuron network, genetic neuron network and so on) were introduced at the end of this paper.

Key words biped robot; model; constraint; intelligent control

摘 要 概括地介绍了双足机器人步态控制领域内的主要研究思路. 详细阐述了基于双足动力学特征的 3 种建模方法, 包括倒立摆模型、被动步态模型、质量弹簧模型的特点. 另外讨论了两种常用的约束条件(稳定判据与能量约束)和 3 种智能控制方法(神经元理论、模糊逻辑与遗传算法)在双足机器人步态控制中的研究情况.

关键词 双足机器人; 模型; 约束; 智能控制

中图法分类号 TP18

1 引 言

双足机器人是一门由仿生学、机械设计和加工、计算机控制理论和人工智能等多种学科形成的交叉

学科. 与轮式和多足机器人相比, 双足机器人更加适应于复杂的地形并且具有更加灵活的运动方向和速度变化范围, 因此得到了广大研究学者的关注. 但是双足机器人更加精巧的机械结构对机器人的稳定控制也提出了更高的要求.

文献[1]在1995年总结了6条有腿机器人动态控制的难点,包括非线性化的状态空间、重力场的作用、未知环境的影响、复杂的多输入多输出控制、随时间而变化的动态特性和连续与离散相结合的控制方法。

而双足机器人作为腿数比较少的一种多腿机器人,有分析和控制自身运动的难点。首先双足机器人是一个多自由度的复杂机械结构,其动力学方程具有非线性、高阶和强耦合的特点,现有的数学模型和解析算法不足以得到完整和精确的步态解。另外除可控的有驱动自由度以外,双足系统脚板与地面之间存在无驱动的自由度^[2]。这个自由度的控制对机器人的姿态稳定具有重要的意义。最后双足机器人不同特性的步态周期切换也是自然步态生成中的一个难点。双足机器人的步态由静态的双脚支撑期和动态的单脚支撑期组成。在步行过程中,双足机器人从稳定的双脚支撑过渡到不稳定的单脚支撑,相应的控制结构从闭环切换到开环。另外从机器人的跑步运动我们可以看到,机器人在腾空状态依然可以保持动态平衡,也就是说机器人的步行控制不能平行的移植到机器人的跑步控制当中。这为多模型系统的稳定控制和平滑控制制造了更多的困难。

这里提到的动静态步行是评价步态的一个基本参数。从重心位置出发,静态步行定义为重心的投影处于支撑腿组成的多边形中;动态步行则对重心的投影没有位置要求。另一种定义则是从占空比出发。其中占空比定义为双脚支撑期在整个步态周期中所占比例^[3]。当占空比达到一定标准时,认为这种步态属于静态步行,具体标准值和实际机器人物理参数有关。通常认为静态步行 β 的下限值是0.25。另外为了提高机器人步行速度和能量利用效率,一般设计 $\beta \leq 0.2$ 。实验证明,当双脚支撑期只占一个步态周期的20%以下时,可以获得比较满意的步速和能量利用效率。

2 研究方法

迄今为止,对双足机器人的基本研究思路可以分为基于仿生学原理和基于动态控制原理两种类型。这两种不同思路的研究方法在双足机器人的步态设计和规划中都有广泛应用。

2.1 仿生学原理

基于仿生学的双足步态研究主要通过测量和分

析人类的步行运动,研究双足步行的基本原理,将得到的一些基本步态特征运用到双足步行机器人控制当中。早在1901年文献[4]通过观察人类和40多种动物的运动过程,研究了包括马等8种动物的运动步法,得到了它们的步态模式。他的研究揭示了动物的简单步法模型,开辟了从仿生学角度研究双足步态的先河。随后文献[5]将行为模仿的思想运用到机器人VT的控制方法当中。通过模仿学习表达非线性动力学差分方程,形成控制策略。采用的局部权重回归算法保证了学习的收敛性。这种研究的思路也被本田公司运用到阿西莫机器人的步态规划当中,通过离线研究人类步态运动的特性,形成简单的步态模式,然后经过在线调整误差控制机器人最终步态。

另一个仿生学的重要贡献是在大多数动物脑组织中发现控制运动节奏的中央模式发生单元(central pattern generator)。这促使一部分研究学者^[6]尝试将这一结构引用到双足步态中。1999年文献[7]用中央模式发生器控制机器人手臂运动完成简单的杂耍动作,这位学者还从人类步行机构得到启示,设计了弹性关节解决了双足步行关节冲击的问题。他们的成功吸引了越来越多的学者开始这一方向的研究。

2.2 动态控制原理

基于仿生学原理算法的可行性完全依赖于步态数据。而机器人的具体步态和实际物理参数相关,要得到大量适用于已知机器人的步行数据并不是一件容易的事情。并且各个不同机器人之间的数据不具有共享性,因此算法不具有适用性。这使得大量学者转而开始机器人动态控制的研究。这种研究思路从各个关节力矩的控制方面考虑双足机器人的步态控制,通过研究刚性连杆结构的动力学特征对各个关节施加驱动力矩带动机器人步行运动。在这种研究思路下,众多的研究群体又提出了基于模型和非模型两种步态规划和控制策略。

2.2.1 基于模型的控制

基于模型的双足控制借鉴已知的物理模型特性对双足机器人模型进行大胆简化,建立了倒立摆模型、被动步态模型、质量弹簧模型和Acrobot模型等实用的控制模型。

倒立摆模型是Hemami等人^[8]于20世纪70年代后期提出的一种双足机器人控制模型。最初的模型在二维空间借鉴一阶倒立摆,将倒立摆的杆和机器人的腿进行对应,将双足机器人踝关节的力矩驱

动看做是倒立摆的基底关节驱动,从而把双足机器人的步行过程和倒立摆的直立摆动过程对应起来. 1984 年文献[9]首次以函数的形式表达机器人的步态,并通过单步的反馈控制拟合倒立摆模型 biper 的动力学控制参数. 1987 年文献[10]设计了具有倒立摆特性的双足机器人,用状态反馈控制双足机“MeltranII”的质心沿约束线运动,使得其水平动力学方程近似为线性倒立摆模型. 在随后的应用中,倒立摆模型逐步发展为 3 维情况下多级倒立摆,并逐步加入对踝关节和脚板的考虑,模型也越来越接近实际机器人的双足模型. 但是鉴于倒立摆的特性,该模型只适用于腿部质量和惯量都非常小的情况. 而实际机器人一般不能达到这个要求,因此该模型一般用于生成双足的参考步态轨迹. 在此基础上通过结合其他控制算法对轨迹进行稳定性和能量消耗等方面的修正.

加拿大的 McGeer^[11]是最早开始被动式双足机器人研究的学者之一,早期采用被动步态理念设计的双足机器人双腿为直杆结构,没有膝关节. 每条腿上一个电机用来控制腿部的伸缩. 在没有任何主动控制和能量供给的情况下,可完全通过重力作用实现斜坡上的动态步行. 此后文献[12]在 Geer 的被动式机器人基础上增加了膝关节和相应的控制系统,并开始 3 维空间的被动式步态研究. 他们的研究表明,在机器人下肢质量分布没有达到理想状态的情况下,需要附加控制系统完成神经肌肉的功能来保证机器人的稳定性,由此可见,下肢质量和长度的分布对机器人步态有非常明显的影响. 一些机器人的理想质量分布在 1984 年^[13]从更加有利于动力学方程线性化和稳定性控制的角度进行了明晰的阐述.

质量弹簧模型是 MIT 的 Pratt^[14]提出的一种非常新颖的双足机器人结构模型. MIT 有腿实验室最初的机器人设计采用的是液压式动力机构,通过压缩空气或者机械弹簧产生腿部行走需要的弹力. 这种结构能够快速产生比较高的能量密度和力,但需要良好的密封装置和较大的阻尼控制. 考虑到这些缺陷,他们转而开发了质量弹簧模型. 这种新设计的机构由弹簧和阻尼单元组成,信噪比小,零飘小,并且解决了常用的电机-连杆模型中不可连续变速的问题. 而且将力的控制转换成了位置的控制,消除了高扭矩力下冲击力对齿轮和电机的不良作用. 在这个弹性关节结构上,Pratt 等人设计的虚拟模型控制(virtual model control)的策略用于将高

层的任务级指令解析成底层的可执行控制命令,各部件需要的力矩由对应的虚拟单元产生. 这一控制策略被运用到机器人 Spring Turkey 和 Spring Flamingo 上,由于采用了虚拟现实的一些技术,机器人的步态自然、稳定,这在其他机器人身上是难以做到的.

除了基于模型的控制以外,另一个重要的研究方向是基于非模型的双足步态控制策略.

2.2.2 基于非模型的控制

基于非模型的控制策略从机器人步行运动的约束入手,一般从机器人的稳定性和能量两个方面对双足步行运动加以控制.

(1) 稳定性约束

为实现稳定的双足步态,众多的研究学者提出了适用于不同模型的稳定判据,如 CoP(中心压力判据)、ZMP(零力矩点判据)和 FRK(脚板转动指示法)等^[15]. 其中,Vukobratovic^[16]提出的 ZMP 稳定判据是应用最广泛的一种.

人类动态行走过程方面的研究表明,人类动态的行走平衡不是因为具有比较大的脚底支撑面,而是因为身体各部分复杂的协调作用. 因为在考虑动态平衡时,地面的反作用力最终可以等效成一对力 N 和力矩 M 对脚底的作用. 这个支撑点就是零力矩点(ZMP 点). 这里 M 依赖 ZMP 的选择,如果能够使得 ZMP 取在双脚支撑范围以内,就可以使 M 变为 0. 换句话说,机器人的动态平衡完全取决于 ZMP 点的位置,而与重心位置无关.

ZMP 稳定判据为人们研究动态稳定提供了可行的法则. 通常的研究预先离线设定理想 ZMP 轨迹,然后通过调整关节扭矩力或者动量补偿使得实际 ZMP 轨迹和理想 ZMP 轨迹吻合. 日本早稻田大学的 WL-12RIII 是最早使用 6 维力传感器获得双足 ZMP 轨迹的机器人. 但是由于结构和重量的问题,传感器安装在小腿,需要通过数学转换消除踝关节的影响才能获得实际 ZMP. 日本本田公司的 P 系列机器人也都是采用 6 维力/力矩传感器构建 ZMP 测量系统的. 文献[17]通过学习上身的轨迹修正实际 ZMP 轨迹的方法. 文献[18]根据预定踝关节轨迹调整髋关节的两个参数获得具有最大 ZMP 稳定余度的 ZMP 轨迹. 文献[19]通过预测机器人行为和 ZMP 的变化防止翻滚现象. 他们的实验结果充分证明了 ZMP 稳定判据的可靠性.

(2) 能量约束

除了稳定性以外,机器人的能量消耗也被不少

研究学者作为机器人的一种约束对双足步态进行控制研究。早在1989年,文献[20]就研究了能量与关节角度和肌肉模型的关系,随后,文献[21]描述了理想双足机的一类特殊轨迹“势能守恒轨道”。1987年,文献[22]对双足机器人在单脚支撑期和双脚支撑之间过渡期的碰撞过程进行了详细的建模,建立了碰撞冲击力与碰撞前后关节角度变化的关系函数,通过线性的关节角速度控制和非线性的位置控制实现了机器人SD-2平稳的着地过程。2001年,文献[23]研究了被动步态的能量消耗和稳定性,提出了虚拟被动动态步行的概念。在水平面上通过对机器人施加虚拟重力作用,在没有其他扭矩力作用情况下使其完成步行。由于虚拟重力场非常接近实际行走需要的最小作用,机器人的步态呈现非常自然的状态。但是这种方法将虚拟重力作用作为惟一的控制输入,没有涉及其他如稳定的因素,随后Yamakita改进了算法,在双足约束中加入对ZMP位置的约束形成了新的控制策略。

以上介绍的各个研究方法的分类并非完全独立的,鉴于各个算法都存在一定的优势和缺陷,目前实际机器人采用的步态控制算法一般都结合了两种或者两种以上的研究思路。例如,文献[24]将倒立摆模型和ZMP稳定判据结合起来提出采用重力补偿的倒立摆模型计算机器人步行所需扭矩力。随后依据倒立摆模型的启示,他又设计出对站立腿进行扭矩力计算(快变子系统)而对摆动腿实施阻尼控制(慢变子系统)的混和控制方法,并将其中的慢变子系统简化成一阶倒立摆模型。另外文献[25]提出了通过多种稳定约束修正起始参考轨迹的方法,这个算法由于过于复杂,不适于快速的动态步行。

3 智能控制算法

以上提到的研究思路为实际机器人的步态规划搭建了合理的研究模型和理论背景,在此之上,正确的引入智能化的控制算法无疑将改进算法的适用性和鲁棒性。鉴于传统智能控制算法如连接主义、模糊逻辑、遗传算法具有强大的自学习、自适应和容错能力,它们都被逐步引入到各个模型的控制中。

神经网络由于具有大量平行计算和非线性映射的能力,被广泛应用到双足步行的控制及动静态平衡和不同地形环境的适应中。1988年文献[26]通过倒立摆模型得到完整步态的动力学模型来优化Hopfield网完成控制器的设计。1992年文献[27]将

机器人SD-2的每个关节用一个关节神经元加以表达,通过学习,神经网络完成脚底力与对应关节角需要调整角度之间的关系。同年文献[28]在一个三连杆的简单机器人上面实现了分层神经网络控制器,对应于3个杆,3个神经网络分别用于控制身体姿态、脚的着地和在脚在空中的姿态。文献[29]的作者是运用神经网络对机器人步态进行控制最成功的学者之一。最初他采用监督学习训练3个CMAC神经网络的自适应学习,分别控制机器人前后平衡、左右侧摆和位姿的连续变化。为了实现变速的快速步行,在新一代的UNH上Miller增加了加速度传感器和两个固定状态的陀螺仪、在结构上增加了步态发生器、动力学模块和两个CMAC神经网络。这5个CMAC网中一个负责纠正左右倾斜,一个负责纠正前后髋关节,两个负责调整机器人速度以符合前设的轨迹要求,最后一个负责改变踝关节左右滚动。由于采用了前设轨迹、反馈控制和在线TD(temporal difference)学习,机器人速度可以达到0.12m/s。另外一些用神经网络控制步态轨迹的例子包括在线性倒立摆模型上用时间反向传播神经网络生成关节轨迹^[30]。

除了神经网络以外,由于模糊逻辑在知识表达方面的优势也被不少学者运用到双足步态的生成和控制上面。文献[31]利用模糊变增益控制机器人双脚支撑期;文献[32]利用机器人运动参数选择模糊控制增益;文献[33]在再励学习中引入模糊反馈,对“快跌倒”、“比较稳定”、“很慢”等状态进行表达;文献[34]将模糊控制器引入机器人位置和力的控制中,研究了恶劣地形下机器人步态的生成。

另一个重要的智能控制方法是遗传算法。文献[35]和文献[36]都以最小能量消耗和ZMP稳定判据作为约束,通过遗传算法自动生成双足步态轨迹。文献[37]研究了通过遗传算法调整双足步态生成中PD控制的局部增益。由于遗传算法一般需要比较长的进化过程,对于双足机器人这样一个对时间要求比较高的系统来说,如果不解决进化速度问题,只适用于离线规划中。

对比这3种智能控制算法可以看到,由于神经网络适用性广,功能强大而获得比较多的应用,在高阶动力学和逆动力学函数拟合、模型函数和误差学习以及轨迹参数在线规划方面都有成功的应用。而对于I型模糊逻辑如果没有合理设计隶属度函数,往往无法正确地表达人类步行规律,因此需要结合神经网络对模糊逻辑的具体隶属度函数的参数进行学习和调整,这使得一些研究人员把目光转向II型模糊

逻辑和模糊神经网络^[38]. 相对前两者智能算法, 遗传算法在双足机器人步态控制方面的应用比较少, 这和遗传算法本身的速度和资源消耗有很大关系, 如果不对遗传算法做适应性改进, 是很难应用到双足系统的实时控制当中. 不过把遗传算法作为寻找能量和稳定性最优解仍然是一个不错的离线步态规划的方法.

另外根据实际机器人步态规划的需要, 各个智能控制算法的结合体如模糊神经网络、神经元模糊逻辑、神经元遗传算法等也相继出现在双足步态的控制当中.

4 总 结

本文概括地介绍了双足步态控制的3种模型、2种约束和3种智能控制算法. 除了代表性的研究模型以外, 各约束的具体应用内容和智能控制算法的特点也在本文有详细阐述. 值得指出的是, 除了列举的国外的研究情况以外, 国内对于双足机器人的研究也取得了令人鼓舞的成就. 其中包括北京理工大学开发的 BHR-1, 国防科技大学开发的“先行者”, 清华大学开发的 THBIP-1 等. 这都激励着更多的同行研究人员投入到双足机器人的研究中来, 为国内的双足系统研究做出更大的贡献.

参 考 文 献

- 1 J. E. Pratt. Virtual model control of a biped walking robot: [master's dissertation]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1995
- 2 A. Goswami. Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator point. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(6): 523~533
- 3 H. Adachi. Development of quadruped walking robots and their gait study. Journal of Robotics and Mechatronics, 1993, 6(5): 548~560
- 4 E. Muybridge. Animals in Motion. New York: Dover Publications, 1901
- 5 A. J. Ijspeert. Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots. In: Proc. the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. Omnipress: United states of America, 2002. 1398~1403
- 6 G. Taga. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion in emergency of basic gait. Biological Cybernetics, 1995, 73(2): 97~111
- 7 M. M. Williamson. Robot arm control exploiting natural dynamics: [Ph. D. dissertation]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1999
- 8 H. Hemami. Reduced order models for biped locomotion. IEEE Trans. Systems Man Cybernetics, 1978, 8(4): 321~351
- 9 H. Miura. Dynamic walk of a biped. International Journal of Robotics Research, 1984, 3(20): 60~74
- 10 S. Kajita, K. Tani. Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain: Derivation and application of the linear inverted pendulum mode. IEEE Int'l Conf. on Robotics Automation, Sacramento, California, 1991
- 11 T. McGeer. Passive dynamic walking. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 62~82
- 12 S. H. Collins. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7): 607~615
- 13 S. Kajita. Balancing a humanoid robot using back drive conserved torque control and direct angular momentum feedback. In: Proc. Int'l Conf. Robotics and Automation. Korea: Kyung Hee Information Printing Co., Ltd, 2001. 3376~3382
- 14 J. E. Pratt. Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots: [Ph. D. dissertation]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- 15 D. Katic, M. Vukobratovic. Survey of intelligent control techniques for humanoid robots. Journal of Intelligent and Robotics Systems, 2003, 37(2): 117~141
- 16 M. Vukobratovic. Bipedal locomotion dynamics, stability, control and application. In: Scientific Fundamentals of Robotics. New York: Springer-Verlag, 1990
- 17 Q. Li. Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on ZMP stability criterion. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 1992
- 18 Q. Huang. Stability compensation of a mobile manipulator by manipulator motion feasibility and planning. Advanced Robotics, 1999, 13(1): 25~40
- 19 D. A. Rey. On-line automatic tip over prevention for mobile manipulators. IEEE/RSJ Int'l Conf. Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France, 1997. 1273~1278
- 20 M. G. Pandy, N. Berme. Quantitative assessment of gait determinants during single stance via a three-dimensional model-Par1 Normal gait. Journal of Biomechanics, 1989, 22(6-7): 717~724
- 21 S. Kajita. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1992. 431~438
- 22 Y. F. Zheng, F. R. Sias. Design and motion control of practical biped robots. International Journal of Robotics and Automation, 1988, 3(2): 70~78
- 23 M. Yamakita, F. Asano. Extended passive velocity field control with variable velocity fields for a knee biped. Advanced Robotics, 2001, 15(2): 139~168
- 24 J. H. Park, K. D. Kim. Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control. In: Proc. the IEEE Int'l Conf. Robotics and

- Automation. Omnipress : United States of America , 1998. 3528 ~ 3533
- 25 Yokoi , *et al.* . Experimental study of humanoid robot HRP-1S. International Journal of Robotics Research , 2004 , 23(4/5) : 351 ~ 362
- 26 S. Kitamura. Application of the neural network for the trajectory intelligence. The IEEE/SME Int 'l Conf. Advanced Intelligent , Mechatronics , Atlanta , Georgia , USA , 1999
- 27 W. Salatian. Reinforcement learning for a biped robot to climb using neural networks in static learning. The IEEE Int 'l Conf. Robotics and Automation , Nice , France , 1992
- 28 H. Wang. A neuromorphic controller for a three controller for a three link biped robot. IEEE Trans. Systems Man and Cybernetics , 1992 , 22(10) : 164 ~ 169
- 29 W. T. Miller III. Real-time neural network control of a biped walking robot. IEEE Control System Magazine , 1994 , 14(2) : 41 ~ 48
- 30 J. G. Juang , C. S. Lin. Gait synthesis of a biped robot using back propagation through time algorithm. The IEEE Int 'l Conf. Neural Networks , Washington , DC , USA , 1996
- 31 C. L. Shih. Fuzzy logic force control for a biped robot. The IEEE Int 'l Symposium on Intelligent Control , Arlington , Virginia , USA , 1991
- 32 E. Kubica , D. Wang , D. Winter. Feedforward and deterministic fuzzy control of balance and posture during human gait. In : Proc. the IEEE Int 'l Conf. Robotics and Automation. Korea : Kyung Hee Information Printing Co , Ltd , 2001. 2293 ~ 2298
- 33 C. Zhou , Q. Meng. Dynamic balance of a biped robot using fuzzy reinforcement learning agents. Fuzzy Sets and Systems , 2003 , 134(1) : 169 ~ 187
- 34 A. Yang , K. H. Loe. Fuzzy position/force control of a robot leg with a flexible gear system. In : Proc. the 2001 IEEE Conf. Robotics and Automation. Korea : Kyung Hee Information Printing Co , Ltd , 2002. 2159 ~ 2164
- 35 A. J. Ijspeert. Trajectory formation for imitation with nonlinear dynamical systems. In : Proc. the IEEE/RSJ Int 'l Conf. Intelligent Robots and Systems. Maui , Hawaii , USA : IEEE Operations Center , 2001. 752 ~ 757
- 36 G. Capi. A neural network implementation of biped robot optimal gait during walking generated by genetic algorithm. The 9th Mediterranean Conf. Control and Automation , Dubrovnik , Croatia , 2001
- 37 K. Nagasaka. Acquisition of visually guided swing motion based on genetic algorithms and neural networks in two-armed bipedal robot. In : Proc. the IEEE Int 'l Conf. Robotics and Automation. Korea : Kyung Hee Information Printing Co , Ltd , 2001. 2944 ~ 2948
- 38 J. G. Juang. Fuzzy neural networks approaches for robotic gait synthesis. IEEE Trans. Systems Man Cybernetics , 2000 , 30(4) : 594 ~ 601



Hu Lingyun , born in 1979. Received her master 's degree in computer science and technology department , Xi 'an Jiaotong University , Shannxi , China in 2002. She has been a Ph. D. candidate in the Department of Computer Science and Technology , Tsinghua University since 2002. Her current research interests include stable gait planning and intelligent learning for biped robot , stability criterion extraction and generation.

胡凌云 , 1979 年生 , 博士 , 主要研究方向为双足机器人稳定步态规划与智能学习、稳定判据的提取与生成。



Sun Zengqi , born in 1943. He is currently a senior IEEE member and a professor in Tsinghua University. His main research interests are computer control theory and application , network control , intelligent control and robot.

孙增圻 , 1943 年生 , 教授 , 博士生导师 , 主要研究方向为计算机控制理论及其应用、网络控制、智能控制、机器人学。

Research Background

The control of bipedal walking robots has been a research topic for about 3 decades. Various kinds of intelligent methods like neural network , fuzzy logic and evolution algorithm have been introduced into this research area with different kinds of robot model such as inverted pendulum , passive gait model and so on. In this paper , survey of current research in this area is briefly introduced. Based on it , our lab has designed a biped robot LUNA for the humanoid game in RoboCup competition. This small robot has totally 12 degree freedom and can carry out straight walking , turning , kicking and other skills required for robot soccer game. A stable gait generation algorithm based on T-S type fuzzy learning net method is proposed on the biped plant. More research work related to it is being under way in our lab. This work is jointly supported by the National Key Project for Basic Research of China (grant No. G2003cb312205) and the National Science Foundation of China (grant No. 60174018 , 90205008 , 60305008).