

仿人机器人稳定步行控制研究

彭秀艳¹, 李一丹², 吕淑萍¹, 赵希人¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江科技学院 电气工程与信息学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要:介绍了仿人机器人运动控制研究现状, 通过对步行机器人稳定性判据 ZMP 分析, 提出通过控制踝关节转动角度来调节 ZMP 的位置, 以保证机器人行走的稳定性. 根据模糊控制理论, 设计出步行机器人踝关节二维模糊控制系统及模糊控制器. 仿真结果表明步行机器人能够通过控制踝侧向关节的相对转动调节 ZMP 点的位置, 实现机器人的稳定步行.

关键词: ZMP 稳定判据; 模糊控制; 踝关节运动

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2008)06-0536-05

Research on the control of stable gaits in humanoid robots

PENG Xiu-yan¹, LI Yi-dan², LÜ Shu-ping¹, ZHAO Xi-ren¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Electrical Engineering and Information, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: This paper introduces the status of current research on control of humanoid robot motion. After analyzing the criterion for stability in walking robots, we concluded that adjusting the zero movement point (ZMP) by controlling the rotational angle of the ankle joint guarantees walking stability. A two-dimensional fuzzy control system for ankle joints and a corresponding fuzzy controller were designed according to fuzzy control theory. A simulation was then done. The simulation results verified that walking robots have stable motion when the position of the ZMP point is adjusted by controlling the relative angular motion of the ankles.

Keywords: ZMP stability criterion; fuzzy control; ankle joint motion

双足机器人从工程角度来模仿人类固有的动态行为, 如步行、学习功能等, 有诸多问题需要解决. 国内外研究者们已针对仿人机器人的稳定行走问题, 从自由度配置、机械传动、运动学建模、动力学分析、稳定性判据、步态规划、地面碰撞、控制理论与技术、控制系统、驱动方式、传感器系统等多方面, 进行了大量研究.

机器人控制从广义上讲主要包括任务规划、路径规划和运动控制. 运动控制是根据给定的路径点及机器人的运动学和动力学特性, 求出适当的关节力矩来产生所需的运动. 机器人常用的控制方法大体上可分两类, 一类是传统的基于模型的控制方法;

另一类是智能控制方法^[1]. 智能控制方法主要有: 模糊控制(fuzzy control, FC)与神经网络控制(neural network control, NNC); 还有一些复合控制方法如: 1) 模糊控制和变结构控制相结合; 2) 神经网络和变结构控制相结合; 3) 模糊控制和神经网络控制相结合等其他结合方法.

模糊理论是在美国伯克利加州大学电气工程系 Zadeh 教授率先提出的. 1965 年他首先提出了模糊集合的概念, 用模糊集合来描述模糊事物. 自从 Zadeh 提出模糊集合论以后, 一种应用模糊集合论来建立系统数学模型、控制器的新型控制理论——模糊控制也相应诞生了. 模糊控制理论的核心是利用模糊集合论, 把人的控制策略的自然语言转化为计算机能够接受的算法语言所描述的算法. 但它的控制输出却是确定的, 它不仅能成功地实现控制, 而且能够模拟人的思维方式, 也能对一些无法构成数学

收稿日期: 2008-08-26.

基金项目: 黑龙江省科技攻关计划资助项目(GC05A506).

通信作者: 彭秀艳. E-mail: pengxiuyan@hrbeu.edu.cn.

模型的对象进行控制. 1974 年, 英国的 Mamdani 首次用模糊逻辑和模糊推理实现了世界上第一个试验性的蒸汽机的控制, 并取得了比传统的直接数字控制算法更好的效果. 它的成功宣告了模糊控制的问世. 从此, 模糊控制理论发展迅速并大量地开始被应用到各个控制领域.

双足步行机器人是一种具有高度非线性、强耦合的对象, 且具有诸如摩擦、负载变化等不确定因素. 传统的基于对象的控制方法很难精确地控制机器人的跟踪轨迹. 为了获得精确的机器人跟踪轨迹, 许多学者进行了大量的研究工作, 也研究出了许多的方法. 在这些方法中, 模糊控制具有较强的优势, 因为它可以利用人类的专家控制经验来弥补机器人动态特性中的非线性和不确定因素, 具有较强的鲁棒性^[2]. 稳定性判据 ZMP (zero movement point) 在仿人机器人研究中, 被用作重要的静态、动态行走稳定性判据, 如 HONDA 的 P2, P3, ASIMO, 以及 SONY 的 SDR-3X/4X. 当机器人处于动态平衡时, ZMP 定义为: 是地面上一点, 重力与惯性力的合力关于该点的力矩沿水平面内的两个垂直轴方向的分量为零. 若机器人在行走过程中, ZMP 始终位于支撑区域内 (不包括边界), 则步行稳定. 这一条件是机器人步态规划遵循的基本原则^[3,4]. 对双足步行机器人来说, 步行稳定性是首要的问题, 也是双足步行机器人的核心问题, 是实现其他复杂功能的前提和基础; 因为机器人质心高, 稳定域小, 很容易翻倒, 对机构造成不可挽回的损失. 本文主要研究双足步行机器人 ZMP (零力矩点) 轨迹跟踪模糊控制.

1 双足步行机器人稳定性分析

ZMP (零力矩点) 越靠近支撑域的中心, 机器人的动态稳定性越好, 当 ZMP 与支撑域中心重合, 机器人步行稳定裕度最大, 抗颠覆能力最强. ZMP 位置可以通过控制关节力矩的方法进行间接控制, 因为支撑腿踝关节是机器人中离支撑面最近的可控关节, 对 ZMP 的影响最大, 可以通过控制踝关节转动角度来调节 ZMP 的位置, 以保证机器人行走的稳定性^[5,6].

踝关节的前后摆动能够调节 ZMP 在前向 (Y 方向) 的位置, 踝关节的左右摆动能够调节 ZMP 在侧向 (X 方向) 的位置, 如图 1 所示. 由于机器人重心在前向上不存在脱离稳定区域的问题, 只在横向上有可能脱离稳定区域, 所以这里只对侧向 X 向进行分析.

双足步行机器人在动态步行时, 零力矩点 ZMP

是否落在支撑域内决定了其步行的稳定性. 双足步行机器人控制的目的是选取合理的运动参数使 ZMP 随时间变化的轨迹落在支撑范围内. 本文根据 ZMP 变化轨迹控制关节运动轨迹.

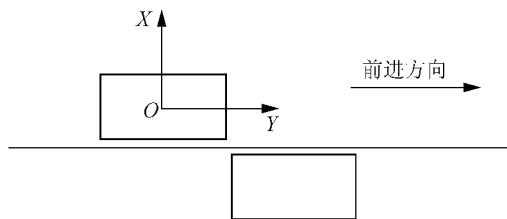


图1 支撑面坐标系

Fig.1 Support surface coordinates

在侧向运动求解时, 假设机器人前向关节不运动, 仅通过侧向关节的运动使机器人 ZMP 在两脚中心线内按正弦规律左右摆动. 保证 ZMP 处在支撑面内, 机器人稳定行走.

根据 ZMP 运动轨迹, 求解踝关节侧向运动曲线, 如图 2 所示. 侧向关节运动轨迹将作为以下踝关节控制的期望运动轨迹.

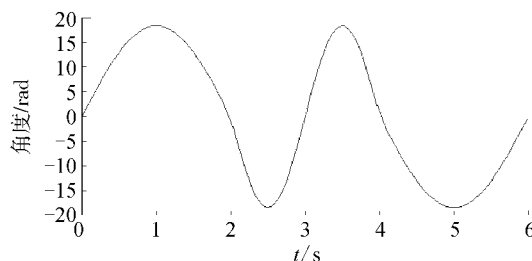


图2 侧向关节转角轨迹

Fig.2 Lateral joint motion curve

2 双足步行机器人模糊控制

2.1 模糊控制系统设计

机器人的控制问题就是要使机器人的末端执行器能够按照给定的轨迹、速度、加速度运动. 根据运动学方程的求解方法和速度、加速度分析方法, 利用上位计算机的计算, 可以将末端执行器的运动分解为各个关节的运动. 这样机器人的控制问题就变成使机器人的各关节按照上位机分解的各关节期望轨迹、速度、加速度来运行^[7]. 双足步行机器人左踝侧向关节控制系统的结构如图 3 所示.

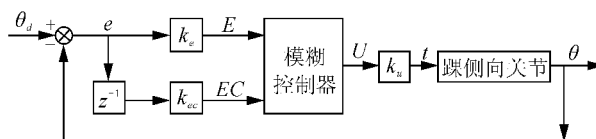


图3 踝侧向关节模糊控制系统

Fig.3 Lateral joint fuzzy control system

表 3 U 的隶属度
Table 3 Membership degree of U

U	μ												
	$u = -6$	$u = -5$	$u = -4$	$u = -3$	$u = -2$	$u = -1$	$u = 0$	$u = 1$	$u = 2$	$u = 3$	$u = 4$	$u = 5$	$u = 6$
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	1	0.4	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1	0.6	0	0	0
Z	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.6	1	0.6	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.4	1	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 模糊控制规则表
Table 4 Fuzzy control rule

EC	U						
	$E = PB$	$E = PM$	$E = PS$	$E = Z$	$E = NS$	$E = NM$	$E = NB$
PB	NB	NB	NB	NM	NS	Z	Z
PM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
PS	NM	NM	NS	NS	Z	Z	PS
Z	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
NS	NS	Z	Z	PS	PS	PM	PM
NM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
NB	Z	Z	PS	PM	PB	PB	PB

建立模糊控制规则(如表 4 所示):
(1) IF $E = PB$ AND $EC = PB$ THEN $U = NB$;
(2) IF $E = PB$ AND $EC = PM$ THEN $U = NB$;
(3) IF $E = PB$ AND $EC = PS$ THEN $U = NM$;
.....
(49) IF $E = NB$ AND $EC = NB$ THEN $U = PB$.

2.2 模糊控制系统仿真

采用 MATLAB6.0 的模糊逻辑工具箱来仿真^[8],先建立模糊推理系统如图 5 所示,然后编辑隶属度函数设置模糊逻辑规则,见图 6.

最后通过工具箱提供的查看器(rule viewer)和表面查看器(surface viewer)来调试建立的模糊推理系统.如图 7 所示,通过移动“ E ”和“ EC ”两条直线所代表的两个输入变量来改变两个输入值,可以发现仿真输出的结果符合预想的效果,如图 8 所示.

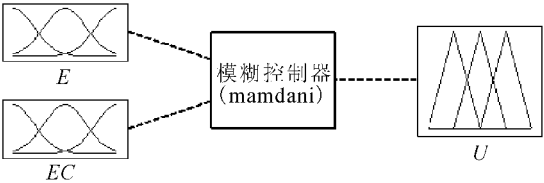


图 5 模糊推理系统
Fig. 5 Fuzzy reasoning system

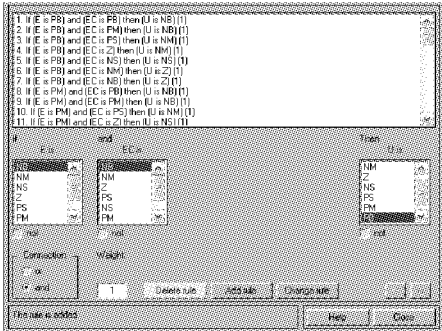


图 6 模糊控制规则编辑器
Fig. 6 Fuzzy control rule editor

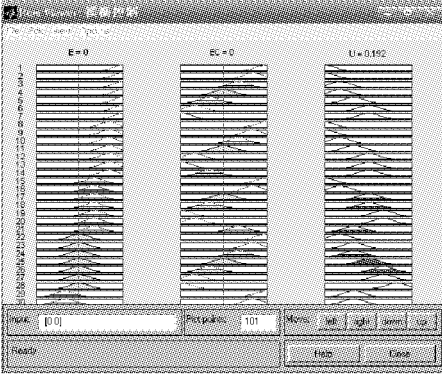


图 7 规则查看器窗口
Fig. 7 Rule viewer window

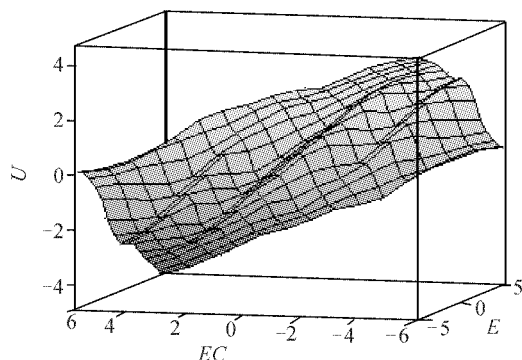


图8 仿真结果

Fig. 8 Simulation results

仿真结果表明,双足步行机器人能够通过各个关节的相对转动调节 ZMP 点的位置,实现机器人的动态步行,并能够保证机器人的稳定。

3 结束语

通过对 ZMP 点的分析,指出 ZMP 点趋于支撑面的中心,则机器人更加稳定。而机器人的踝关节对 ZMP 点的位置起调节作用。根据模糊理论,设计出双足步行机器人关节二维模糊控制系统及机器人稳定性模糊控制器。并利用 MATLAB 对其进行模拟。仿真结果表明双足步行机器人能够通过踝侧向关节的相对转动调节 ZMP 点的位置,保障机器人的稳定步行。仿真结果验证了所设计的模糊控制系统的有效性。模糊控制具有较强的鲁棒性的同时也有其本身的缺点,其综合定量知识的能力差,控制规则和隶属函数一经确定便无法修改,从而限制了其自适应能力。可以把人工神经网络与模糊控制结合起来,利用神经网络的学习能力来达到调整模糊控制的目的,一方面使模糊控制具有一定的自适应能力,另一方面也使神经网络获得了模糊控制的推理归纳能力。

参考文献:

- [1] 张 锐, 吴成东. 机器人智能控制研究进展[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2003, 19(1): 61-64.
ZHANG Rui, WU Chengdong. Some recent progress in robotic intelligent control[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute: Natural Science, 2003, 19(1): 61-64.
- [2] 王耀南. 机器人智能控制工程[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 287-300.
- [3] WANG Guang, HUANG Qiang, GENG Juhong, et al. Cooperation of dynamic patterns and sensory reflex for humanoid walking [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Tapei, China, 2003, 2: 2472-2477.
- [4] 柯显信. 仿人形机器人双足动态步行研究[D]. 上海: 上海大学, 2005.
- [5] LEE B J, STONIER D, KIM Y D, et al. Modifiable walking pattern generation using real-time ZMP manipulation for humanoid robots [C]//Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA, 2007: 4221-4226.
- [6] HONG S, OH Y H, CHANG Y H, et al. An omni-directional walking pattern generation method for humanoid robots with quartic polynomials [C]//Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA, 2007: 4207-4213.
- [7] CHESTNUTT J H, LAN M, CHEUNG G, et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 629-634.
- [8] 张国良, 曾 静, 柯熙政, 等. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

作者简介:



彭秀艳, 女, 1962 年, 教授, 主要研究方向为随机系统估计与控制、复杂系统建模及预测。获省部级科技进步奖 5 项。发表学术论文 40 余篇, 其中多篇被 EI、ISTP 检索。



李一丹, 女, 1964 年, 副教授, 主要研究方向为电气传动、柔性交流输电系统及工业电气自动化。IEEE 会员。作为访问学者在加拿大瑞尔松大学主持完成加拿大 NSERC (加拿大自然科学基金与工程研究基金) 及校企合作科研课题 3

项。获得黑龙江省科技进步二等奖 1 项。发表学术论文 10 余篇, 其中被 SCI、EI、ISTP 检索 5 篇。出版专著 1 部。



吕淑萍, 女, 1963 年, 教授, 主要研究方向为模式识别与智能控制、控制理论及其应用。