

基于模糊 PID 的助行外骨骼机器人控制研究*

钟翠华, 沈林勇*, 任昭霖, 邵文韞
(上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘要: 为了研究外骨骼机器人的步态控制, 提出了一种基于模糊 PID 的算法, 首先给出机器人的一般增量式 PID 控制算法, 然后根据机器人关节角度误差和误差变化量的参数, 选择了隶属函数, 最后结合实际操作经验, 建立了模糊规则表, 完成了对 PID 参数的在线自整定。试验结果表明, 模糊 PID 控制方法能够使外骨骼机器人平稳运动, 初步实现了机器人的步态控制。

关键词: 模糊比例-积分-微分; 助行外骨骼机器人; 步态控制

中图分类号: TP242.6; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)07-0839-04

Fuzzy PID-based control of the walk-aided exoskeleton robot

ZHONG Cui-hua, SHEN Lin-yong, REN Zhao-lin, SHAO Wen-yun

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to realize the gait control, the fuzzy PID-based control algorithm was proposed. Firstly, the general incremental PID control algorithm of the robot was given. Then, the membership functions were selected according to the parameters of the angle error and the variations of the error of the robot. Finally, the table of fuzzy control was established for the online auto-tuning of the PID parameters based on the actual operating experience. The test results show that the fuzzy PID control could make the exoskeleton robot walk steadily and finish the gait control of the robot preliminarily.

Key words: fuzzy proportion-integration-differentiation (PID); walk-aided exoskeleton robot; gait control

0 引言

随着科学技术的不断进步, 人们研究各种各样的代步工具来改善老年人和残疾人的生活质量, 提高老年人和下肢残疾人的行动自由度。

近几年, 在外骨骼机器人领域, 国内外学者投入了大量的研究时间, 取得了一定的成果, 如日本筑波大学的山海嘉之教授用了十几年的时间开发出的 HAV 系列外骨骼机器人^[1-2], 上海大学的钱晋武教授开发出的下肢康复外骨骼机器人^[3]等, 都达到了较高的研究水平。对于外骨骼机器人控制方法的研究, 人们已经提出了多种方法, 如基于肌电信号的控制方法、基于肌肉硬度检测的控制方法等^[4], 这些方法虽然取得了一定

的成果, 但是它的控制效果还是不够理想, 因此, 本研究提出的基于模糊 PID 的助行外骨骼机器人步态控制方法, 不仅具有现实的社会意义, 而且也具有一定的科学研究意义。

本研究拟结合老年人和残疾人的步态特点, 应用模糊 PID 的控制算法, 初步实现步行外骨骼机器人的步态控制。

1 助行外骨骼机器人

本研究设计了一种助行外骨骼机器人, 它是专门针对下肢力量减弱的老年人和残疾人的助行装置, 如图 1 所示。它由一对 3 自由度外骨骼机械腿、辅助框架、电机驱动器、限位开关、传感器和控制箱组成。为

收稿日期: 2011-02-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)先进制造技术领域重点资助项目(2006AA04Z224)

作者简介: 钟翠华(1984-), 男, 湖北仙桃人, 主要从事机器人控制系统方面的研究. E-mail: zhonghua8410@163.com

通信联系人: 沈林勇, 男, 副研究员. E-mail: shenlycn@163.com

了提高行走的安全性,设计的时候在外骨骼机械腿上安装了可以随机器人移动的外围框架。每条机械腿有 3 个自由度,分别对应人腿的 3 个关节:髋关节、膝关节和踝关节。

外骨骼机器人控制系统框图如图 2 所示,本研究通过力传感器采集脚底受力情况,确定重心位置,判断机器人是否安全,利用限位开关保证每个关节在允许的范围内运动,通过光电编码器实时采集机器人关节角度的变化,采用模糊 PID 的控制算法,对电机进行实时控制,实现了机器人的步态控制,使机器人能够缓慢平稳行走。

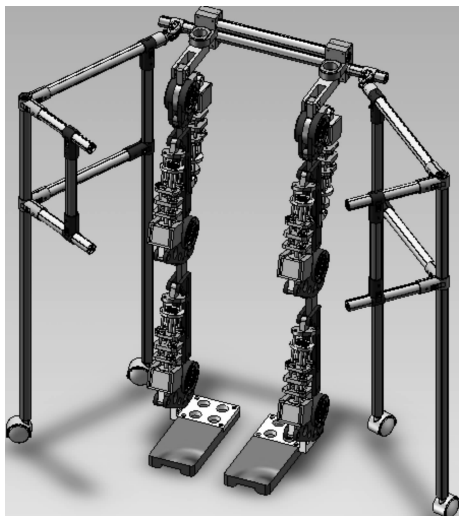


图 1 助行外骨骼机器人

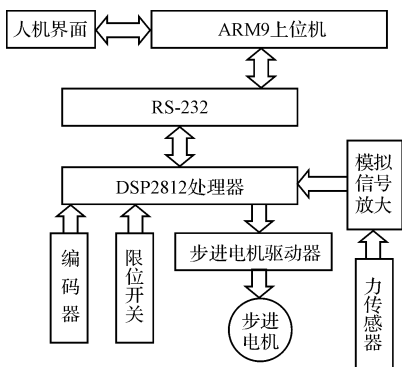


图 2 机器人控制系统框图

2 模糊 PID 控制算法设计

外骨骼机器人控制的目的是使机器人能够按照理论规划的步态轨迹平稳行走。由于控制平台是数字化的 DSP 系统,在算法设计时,应该先对步态数据进行离散化处理,即将一个步态周期 T 分为若干个离散时间 Δt 。考虑到在电机的传动过程中和在机械腿的执行机构中必然存在误差的原因,机器人系统加入了编码器来实时采集关节的角度信息,然后反馈到控制器

中,通过控制器的计算,实时减小因误差带来的实际步态与理论步态的差异。

机器人在行走时,从步进电机的输出到执行机构推动关节的过程,系统是非线性的,并且当步进电机的速度变化时,系统的误差也会变化,导致系统的数学模型也是不确定的,所以这里采用了模糊 PID 控制方法。模糊 PID 是在 PID 算法的基础上,通过计算当前系统误差 $E(k)$ 和误差变化量 $\Delta E(k)$,然后利用模糊规则进行模糊推理,最后查询模糊矩阵表进行 PID 参数的在线自整定^[5]。

在 Δt 时间内,本研究将机器人的理论步态角度与光电编码器实测的步态角度的偏差以及偏差变化作为控制器的输入,机器人步态角度的增量作为控制器的输出。模糊 PID 控制结构框图如图 3 所示。

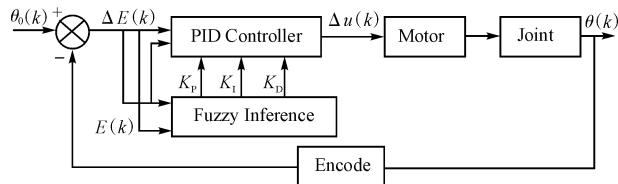


图 3 模糊 PID 控制系统结构框图

$\theta_0(k)$ —当前时刻给定的步态角度; $\theta(k)$ —机器人关节处的当前实测步态角度; $E(k)$ 和 $\Delta E(k)$ —当前时刻测得的关节步态角度误差和误差变化量; K_p 、 K_i 、 K_d —模糊 PID 控制器的修正量; $\Delta u(k)$ —PID 控制器输出量。

本研究中的外骨骼机器人驱动器为步进电机,所以这里选择一般增量式 PID 控制算法^[6],其传递函数为:

$$\Delta u(k) = k_p \Delta E(k) + k_i E(k) + k_d [\Delta E(k) - \Delta E(k-1)] \tag{1}$$

式中: $E(k)$ 和 $\Delta E(k)$ —PID 控制器的输入量,且 $\Delta E(k) = E(k) - E(k-1)$ 。

2.1 确定隶属函数以及输入量的模糊化

直线函数能够快速调整较大误差,钟形和 Bell 型函数变化平滑,有利于控制的平稳性^[7]。为了保证机器人步态控制的准确性,这里采用了直线函数中的三角形隶属函数,如图 4 所示。

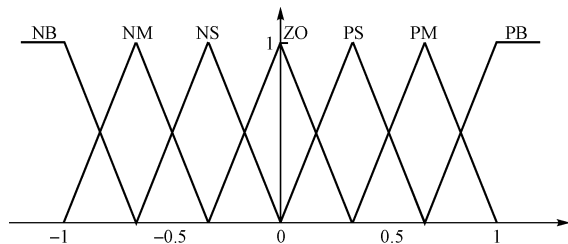


图 4 输入量和输出量的隶属函数

由于输入量具有相同的变化特性,它们采用了相同的隶属函数。为了便于模糊规则的确定,这里将三

角形隶属函数的论域定位 $[-1,1]$ 。所以需要先对输入量进行量化处理,使其在量化后的值在论域范围内。

机器人关节处的当前实测角度为 $\theta(k)$,理论角度为 $\theta_0(k)$,则关节步态角度误差为:

$$E(k) = \theta(k) - \theta_0(k) \quad (2)$$

假设上一离散时间关节角度误差为 $E(k-1)$,则当前机器人关节角度误差变化为:

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3)$$

本研究对输入量的量化处理方法如下:对机器人进行多次实验,记录每次实验的所有数据,经比较可以得到机器人关节处的每个离散时刻的 $E(k)$ 和 $\Delta E(k)$ 的最大值,记为 $E(k)_{\max}$ 和 $\Delta E(k)_{\max}$ 。根据实验测得的最大值,可以对每个通过光电编码器测得的关节角度值进行归一化处理:

$$e(k) = E(k)/E(k)_{\max} \quad (4)$$

$$\Delta e(k) = \Delta E(k)/\Delta E(k)_{\max} \quad (5)$$

当某次实验测得值大于 $E(k)_{\max}$ 和 $\Delta E(k)_{\max}$ 时,可以将其视为最大值,在算法中是可以通用的。

在模糊控制规则中, $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的模糊子集划分如下7个值:“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”和“正大”,分别用NB、NM、NS、ZO、PS、PM和PB表示。

2.2 建立模糊规则表

模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验,建立合适的模糊规则表,得到针对 K_p 、 K_i 、 K_d 3个参数分别整定的模糊规则表^[8],如表1~3所示。

表1 K_p 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

2.3 解模糊化

由 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数可知,当输入值一定时,本研究需要寻找一个可以最能代表模糊集合的精确量。这里笔者采用重心法来表示这个精确值^[9]:

$$P = \frac{\int u_i p_i}{\int u_i} \quad (6)$$

式中: p_i —模糊变量值, u_i —模糊变量值对应的隶属度。

由于每个变量最多有7种取值,上述公式可以变为如下形式:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^7 u_i p_i}{\sum_{i=1}^7 u_i} \quad (7)$$

由式(7)即可得到各个PID参数的精确值。

表2 K_i 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表3 K_d 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3 试验

3.1 试验平台介绍

该试验的目的是对上述控制方法进行试验验证,并且与理论步态轨迹进行比较和误差分析。试验平台如图5所示。



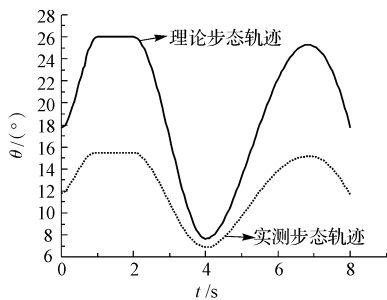
图5 外骨骼机器人样机

为了方便试验数据的采集,试验时本研究将外骨骼

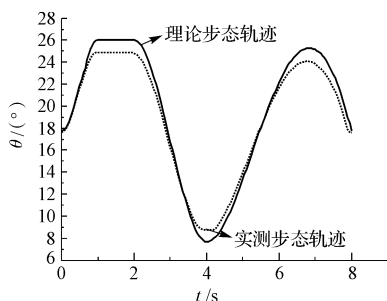
机器人悬挂,让它在原地行走,通过运动捕捉仪器就可以测得机器人的实际步态轨迹。运动捕捉仪是一种位置传感器,它可以捕捉到贴在机器人关节处的金属标志点,当机器人运动时,可以通过标志点实时采集关节的空间坐标,该数据处理后就可以得到关节的步态轨迹了。

3.2 试验结果

本研究通过运动捕捉仪器对机器人膝关节处运动角度的实时测量,得到两组数据,如图 6 所示,虚线代表规划步态轨迹,实线代表实测步态轨迹。机器人行走时膝关节处的规划步态轨迹与无模糊控制时的实测步态轨迹的对比图如图 6(a) 所示,规划步态轨迹是预先根据老年人和残疾人的步态规律规划的,符合老年人和残疾人步幅小、速度平缓的特点^[10]。机器人在模糊算法控制下的实测步态角度与规划步态轨迹的对比图如图 6(b) 所示。根据实验结果可以看出,当没有加入模糊算法、机器人在开环控制系统下运动时,其实测步态角度与规划步态角度有较大的误差。从步态周期、步态幅度、最大步态角度以及最小步态角度比较,在模糊控制算法时,误差均得到较大减小。如规划步态角度最大步态幅度为 18.338° ,而实测为 8.592° ,其误差达到 53%。机器人在闭环控制系统下运动时,实测步态角度与规划步态角度的误差较小,基本与规划步态角度一致。如规划步态角度最大步态幅度为 18.338° ,而实测为 17.432° ,其误差仅为 4.9%,在设计误差范围之内。由实验分析可得,模糊 PID 控制算法实现了机器人的步态控制,达到助步的要求。



(a) 机器人膝关节无模糊 PID 控制时的实测步态轨迹



(b) 机器人膝关节基于模糊 PID 控制的实测步态轨迹

图 6 机器人膝关节处步态数据

4 结束语

本研究通过实验分析了助行外骨骼机器人在两种控制状态下的运动情况,经过比较得出模糊 PID 控制算法起到了很好的步态控制作用,不仅弥补了开环控制的失步问题,而且通过闭环模糊 PID 控制的实时反馈,使机器人更加平稳安全的运动。

研究表明,模糊 PID 控制算法能有效提高外骨骼机器人的步态控制能力,增强了机器人的抗干扰能力、稳定性和安全性,对于外骨骼机器人的医疗应用具有一定的实际意义。

参考文献 (References):

- [1] KASAOKA K, SANKAI Y. Predictive Control Estimating Operator's Intention for Stepping-up Motion by Exoskeleton Type Power Assist System HAL [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu; [s. n.], 2001;1578-1583.
- [2] KAWAMOTO H, SANKAI Y. Comfortable Power Assist Control Method for Walking aid by HAL-3 [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems. Man and Cybernetics; [s. n.], 2002;4-6.
- [3] WEN Zhong, QIAN Jin-wu, SHEN Lin-yong, et al. Experimental Research on Trajectory Control of Walking Rehabilitation Training Robot [C]//2010 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering. Chengdu; [s. n.], 2010;576-581.
- [4] 杨智勇,张静,归丽华,等. 外骨骼机器人控制方法综述 [J]. 海军航空工程学院学报, 2009(9):520-526.
- [5] RUBAAI A, CASTRO-SITIRICHE M J, OFOLI A R. DSP-based laboratory implementation of hybrid fuzzy-PID controller using genetic optimization for high performance motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008(9):1977-1986.
- [6] 郭伟斌,陈勇. 基于模糊控制的除草机器人自主导航 [J]. 机器人, 2010,32(3):204-209.
- [7] 牛彬. 可穿戴式的下肢步行外骨骼控制机理研究与实现 [J]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院, 2006.
- [8] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [9] 张建斌. 移动机器人模糊 PID 控制器的研究与实现 [D]. 西安:西北大学信息科学技术学院, 2009.
- [10] 沈林勇,王代芹,章亚男,等. 可直立行走的电动助步轮椅的步态分析 [J]. 机械设计, 2007,24(8):15-19.

[编辑:李辉]