

基于图像视觉伺服的模糊比例积分微分控制系统

王 胜, 陈 宁*

(集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

(*通信作者电子邮箱 cn1972@jmu.edu.cn)

摘 要:针对传统比例积分微分(PID)参数难整定、控制性能不理想等问题,将模糊控制理论与PID控制器相结合,构成模糊PID控制器。采用Eye-to-Hand视觉模型,引入图像视觉伺服机制,通过图像获取误差信号来实现对PID控制器三个参数 K_p 、 T_i 和 T_d 的实时在线自适应调整。最后在以PC机、CompactRIO、NI-9401、互补金属氧化物半导体(CMOS)摄像头、电机驱动器及无刷直流(DC)电机组成的打孔机视觉伺服运动控制系统上完成了实验。结果表明,基于图像的视觉伺服模糊PID控制器相对于传统PID控制器响应速度提高了60%,超调量降低了80%,鲁棒性也更好;不仅能提高孔的定位精度,还能边加工边检测。

关键词:视觉伺服;模糊比例积分微分控制器;Eye-to-Hand视觉模型;CompactRIO;CMOS摄像头;无刷直流电机

中图分类号: TP273.4 **文献标志码:** A

Fuzzy-proportion integration differentiation control system based on image visual servo

WANG Sheng, CHEN Ning*

(College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: In view of the hard parameter tuning and unsatisfactory control performance, a fuzzy-Proportion Integration Differentiation (fuzzy-PID) controller which combined Proportion Integration Differentiation (PID) controller with the fuzzy control theory was proposed. The control system applied Eye-to-Hand visual model, introduced visual servo mechanism, and realized real-time, online and adaptive adjustment for three parameters K_p , T_i and T_d of the PID controller by getting errors in image. The experiment was performed on punching machine visual servo motion control system which composes of PC, compactRIO, NI-9401, Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) camera, motor driver and brushless Direct Current (DC) motor. The results show that, compared with traditional PID controller, the speed of response of the fuzzy-PID controller based on image visual servo is increased by 60%, the overshoot is reduced by 80%, and it has better robustness. It can not only improve the positioning accuracy of hole, but also process and detect holes nearly at the same time.

Key words: visual servo; fuzzy-Proportion Integration Differentiation (fuzzy-PID) controller; Eye-to-Hand visual model; CompactRIO; Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) camera; brushless Direct Current (DC) motor

0 引言

电动机在工农业生产、家用电器、航空航天等领域得到了广泛应用。传统的比例积分微分(Proportion-Integration-Differentiation, PID)控制算法只有在非时变系统模型参数下才可能获得较好的控制效果。实际上由于电动机是一个强耦合的非线性被控对象,容易受到各种内外因素干扰而引起参数的变化,从而导致控制效果不理想。由于不能在线调整参数导致自适应能力不强。对此,文献[1-3]分别设计了基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络、模糊控制和模糊神经网络的PID控制器,但对于时变的被控对象,系统鲁棒性还有待提高。文献[4]对基于图像视觉伺服的自动导引车辆(Automatic Guided Vehicle, AGV)动力学控制作了研究,文献[5]设计了一种基于图像视觉伺服的飞行器控制系统,但都没有与智能控制结合起来,系统的智能化水平有待提高。另外,文献[6]研究了一种基于无标定显微视觉伺服的

零件微装配技术;文献[7]对视觉系统在超声波打孔机中的应用作了理论探讨;文献[8]搭建了一个基于视觉的打孔机运动控制系统,但缺少理论上的研究。当目标及其位姿均固定时,传统的打孔机通过编程可以很好实现,但在目标位姿经常发生变化的情况下通过编程是无法实现的。针对以上不足,本文提出了一种基于图像视觉伺服的模糊PID(fuzzy-PID)控制系统,并通过实验对其控制性能进行验证。

1 视觉伺服与fuzzy-PID控制器

视觉伺服也称为视觉反馈,是指通过视觉为运动系统的执行机构提供闭环位置控制。视觉伺服系统根据反馈信号的不同类型可以分为基于位置的视觉伺服(Position Based Visual Servo, PBVS)和基于图像的视觉伺服(Image Based Visual Servo, IBVS)^[9]。根据视觉模型是否固定分为Eye-to-Hand视觉模型和Eye-in-Hand视觉模型。

基于位置的视觉伺服(3D视觉伺服)的误差信号定义在

收稿日期:2014-10-21;修回日期:2014-11-27。

作者简介:王胜(1991-),男,湖北应城人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉、自动控制; 陈宁(1972-),男,河南洛阳人,副教授,博士,主要研究方向:机器视觉、工程机器人

3D笛卡儿坐标系中,它对摄像机标定误差和用于目标位置估计的3D模型误差非常敏感。而基于图像的视觉伺服(又称2D视觉伺服)的误差信号定义在图像特征空间,由图像特征信息直接控制运动系统。后者相对于前者的计算复杂小,鲁棒性强,系统实时性也更容易保证。另外,相对于传统传感器而言,基于图像的视觉伺服在机器人控制中也具有明显优势:更高的灵活性、更高的精度,对机器人标定误差具有更强的鲁棒性等^[10],因此受到广泛关注。

智能控制是在无人干预的情况下能自主地驱动智能机器实现控制目标的自动控制技术。模糊控制是一种相对于比较成熟的智能控制方法,近年来受到了众多研究者的重视^[11-13]。本文拟将模糊控制理论应用到PID控制器中,以实现PID控制器增益参数 K_p 、 T_i 和 T_d 的实时在线自适应调整。通过这种方式不断自动调整各个参数的大小来获得最佳的系统响应,从而增强控制器在复杂环境下的适应能力。

2 图像视觉伺服 fuzzy-PID 控制器的设计

为了改善传统PID控制器在控制性能上的不足(如动态性能相对较差、恢复时间长、超调量大以及参数整定困难等^[14]),提高系统的鲁棒性和适应性,本文拟利用LabVIEW软件及其两个开发工具包:Vision and Motion和PID and Fuzzy Logic Toolkit设计一个基于图像视觉伺服的fuzzy-PID控制器,并在硬件平台上验证其伺服控制的有效性。

其原理简述如下:通过摄像头不断采集图像,经处理分析后定位目标在图像坐标系中的像素位置;将此值传递至运动控制循环,经过误差比较后控制器发送控制指令对电机的运行状态(包括正转、反转、停转、加速、减速)进行实时自适应控制。工作台X运动方向的程序执行流程如图1所示,Y方向类似。

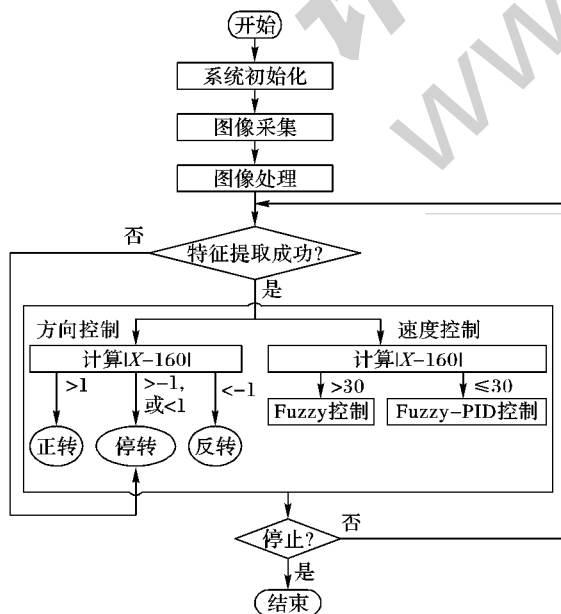


图1 程序流程

2.1 软件开发

2.1.1 软件开发平台

LabVIEW是一种图形化的编程语言,具有无需编写文本代码、良好的人机交互性、易学易用等优势。Vision and

Motion工具包可方便地构建完整的视觉软件系统,包括图像采集、图像处理和图像分析等。PID and Fuzzy Logic Toolkit工具包是一种专门用于PID和模糊控制器设计的开发模块。

2.1.2 视觉系统软件开发

视觉系统是整个视觉伺服fuzzy-PID控制系统信息获取的关键环节,其性能的好坏将直接影响整个系统的运行效能。本文基于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工业相机设计了一个图像采集、处理和分析软件。需要说明的是,它并不是一成不变的,需要根据环境作出相应的调整,以获得最佳的控制效果。

2.1.3 fuzzy-PID控制器的设计

本文在LabVIEW2011专业开发版和附带的PID and Fuzzy Logic Toolkit工具包上完成。这里以X方向的运动控制来说明整个设计流程。基于图像视觉伺服的fuzzy-PID控制系统结构如图2所示。

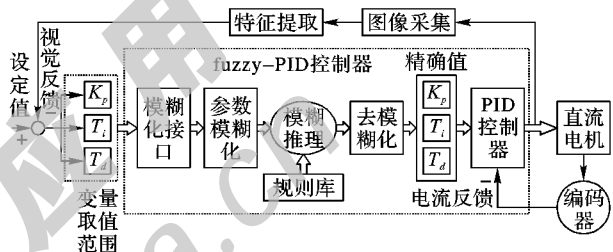


图2 基于图像视觉伺服的fuzzy-PID控制器结构

1) 确定输入输出变量及其论域。

输入变量是像素距离,定义为 S ,单位为pixel。它表示目标中心点X方向坐标,根据先期整定经验设定其论域范围为 $S=0 \sim 36$ (取实际像素距离的1/10)。模糊语言定义为“近”“中近”“中”“中远”“远”5个级别,分别对应于5个集合。

输出变量是PID增益的三个参数 K_p 、 T_i 、 T_d 。根据控制效果的需要进行多次实验后确定三个参数的论域范围分别是: $K_p=5 \sim 25$,模糊语言定义为:“ K_p 小”“ K_p 中”“ K_p 大”; $T_i=0.01 \sim 0.1$ min,模糊语言定义为:“ T_i 小”“ T_i 中”“ T_i 大”; $T_d=0.0005 \sim 0.005$ min,模糊语言定义为:“ T_d 小”“ T_d 中”“ T_d 大”。各有3个集合与之对应。

2) 隶属度函数与输入输出空间的模糊分割。

利用隶属度函数将输入输出空间作模糊分割得到对应的模糊集合。隶属度函数有多种形状,常用的有三角形、梯形和高斯型。本文为了计算简单,在满足要求的前提下选择三角形和高斯型隶属度函数。

利用隶属度函数将输入输出空间作如图3的模糊分割。

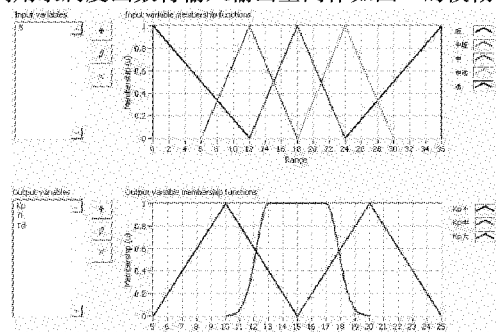


图3 变量定义与模糊分割(单输入多输出)

3) 规则库的建立。

模糊控制规则库是由一系列“IF-THEN”型的模糊条件句构成,条件句的前件为输入变量,后件为输出变量。根据输出要求,本文建立了如下规则库:

①IF 'S' IS '近', THEN 'K_p' IS 'K_p 小' ALSO 'T_i' IS 'T_i 大' ALSO 'T_d' IS 'T_d 大'。

②IF 'S' IS '中近', THEN 'K_p' IS 'K_p 中' ALSO 'T_i' IS 'T_i 大' ALSO 'T_d' IS 'T_d 中'。

③IF 'S' IS '中', THEN 'K_p' IS 'K_p 大' ALSO 'T_i' IS 'T_i 小' ALSO 'T_d' IS 'T_d 中'。

④IF 'S' IS '中远', THEN 'K_p' IS 'K_p 中' ALSO 'T_i' IS 'T_i 中' ALSO 'T_d' IS 'T_d 小'。

⑤IF 'S' IS '远', THEN 'K_p' IS 'K_p 中' ALSO 'T_i' IS 'T_i 小' ALSO 'T_d' IS 'T_d 小'。

4) 模糊推理及去模糊化。

模糊推理又称近似推理,是从不精确的前提集合 IF 中得出可能的不精确结论 THEN 的推理过程。此处采用的模糊推理方法为最大最小(Max-Min)法。

经过模糊推理得到的结论仍然是模糊的,不能作为控制量输出,需要通过一种去模糊化算法得到精确的数值。LabVIEW中提供了多种去模糊化方法,常用的是面积重心

(Center of Area)法。该方法对模糊输出量中各元素及其对应的隶属度求加权平均值后作为输出结果。

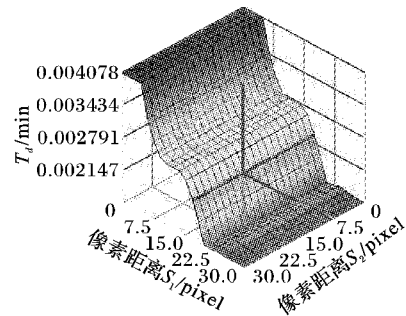


图4 模糊控制器测试界面

5) 模糊控制系统软件设计。

fuzzy-PID 控制器设计完成后先保存为 .fs 文件,然后在 LabVIEW 程序框图中通过 Load Fuzzy System. vi 来调用。

程序根据输入值 S, 运用模糊算法将 PID 控制器的三个输入参数 K_p、T_i 和 T_d 分别进行模糊化计算, 然后将去模糊化后的精确结果传给 PID. vi。其输出结果作为脉冲间隔时间, 它是指每个脉冲的持续时间(脉冲宽度)。其值越大, 表示脉冲频率越低, 从而被控电机转速就越慢。本文就是利用这点来控制电机转速的。

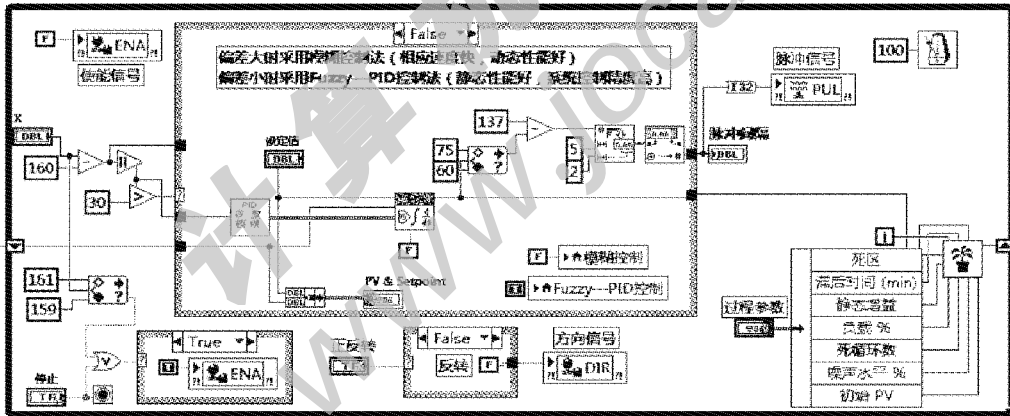


图5 fuzzy-PID 控制器程序框图

上位机将脉冲信号发给下位机 Compact-RIO, 它由两部分构成: 实时控制器和处理器, 它们分别通过实时控制器 (Real-Time, RT) 下的共享变量“ENA”“DIR”和现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 处理器下的用户自定义变量“PUL”来实现与主机的通信。

2.2 硬件实验平台搭建

实验平台硬件主要由上位机 (PC)、下位机 (嵌入式 CompactRIO 平台)、直流电机驱动器、无刷直流电机、打孔机和直流电源组成。其中: 上位机用于发送电机控制指令, 数据显示与人机交互; 下位机接收上位机控制指令, 产生脉冲控制信号并通过数字 I/O 口将信号传至直流电机驱动器; 驱动器完成三环 (位置、速度、力矩) 闭环控制, 并将信号功率放大以驱动电机工作; 电机作为执行器, 接收到驱动器的控制信号后作出相应的动作, 并将信号反馈到驱动器进行比较, 完成整个闭环控制过程, 从而实现对工作台位移的精确控制。硬件结

构如图 6 所示。

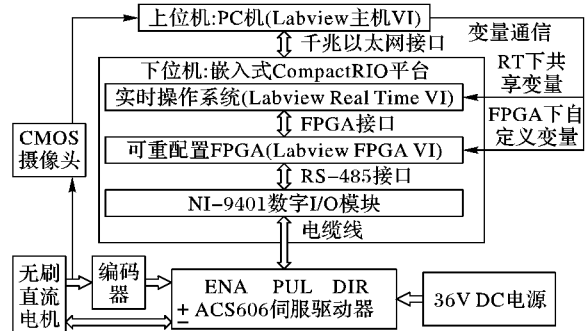


图6 硬件系统结构

实验中打孔机仅在 Z 轴方向移动, XY 方向的平面运动是通过电机驱动工作台来实现的。由于摄像头与打孔机位置均固定, 因此所得图像坐标系与钻头坐标系仅存在平移变换关系, 如图 7 所示。

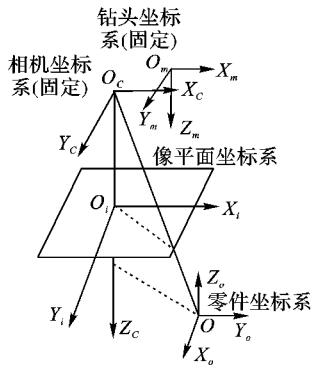


图7 坐标关系示意图

3 实验与分析

基于图像的视觉伺服很关键的一步就是获取所需的目标图像特征。在背景不是很复杂的情况下,本实验采用自适应阈值分割法实现了对目标的分割,对环境的适应性较强。利用颜色定位和形状匹配相结合的识别与追踪方法,结果表明此方法对目标的平移、旋转、缩放具有较强的不变性,同时还具有一定的仿射不变性,因此能够准确提取到所需目标特征(即目标几何中心像素坐标值);然后将目标特征输入到控制器,通过比较来选择相应的控制方法。这样,目标的运动信息就可以通过视觉反馈机制来控制电机的运行状态,具有较快的系统响应和较高的自适应控制能力。程序的前面板如图8所示,图像尺度发生变化后追踪结果如图9所示。

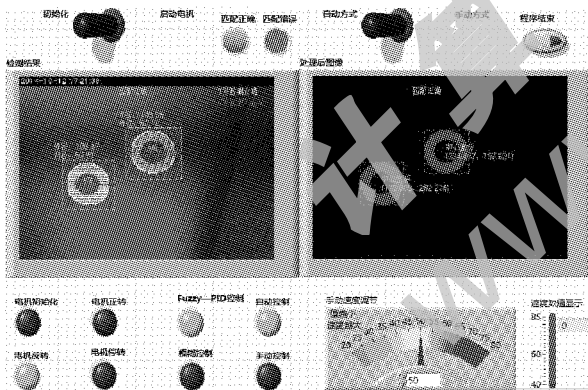


图8 程序前面板

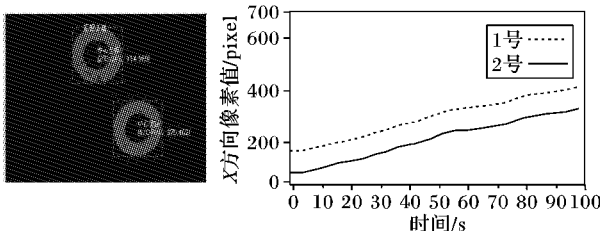


图9 变化的目标和追踪到的X

根据输入像素距离的变化,模糊PID控制器能够自适应调整 K_p 、 T_i 和 T_d 三个参数的输出,而传统PID参数的整定过程复杂,耗时较长,有时会出现跟踪迟滞现象。模糊PID参数在线自整定结果如图10所示。

经过多次调试后还得到了普通PID控制器与基于图像的视觉伺服fuzzy-PID控制器的动态响应图和阶跃信号响应(见图11~14),通过对比来验证本文方法的优越性。

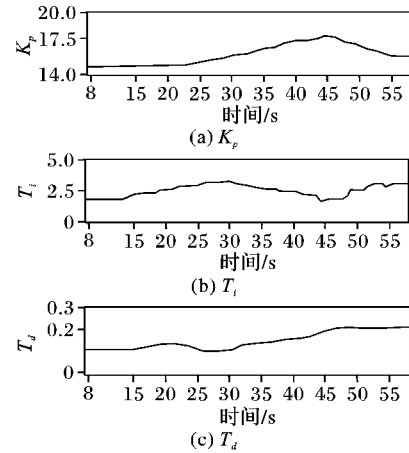


图10 模糊PID参数在线自整定

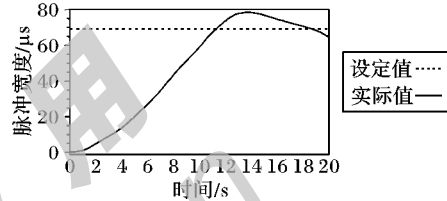


图11 PID控制器动态响应

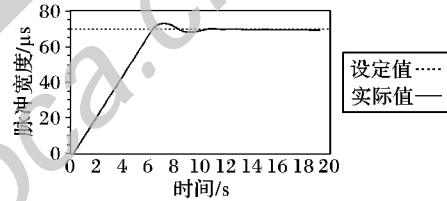


图12 基于IBVS的fuzzy-PID控制器动态响应

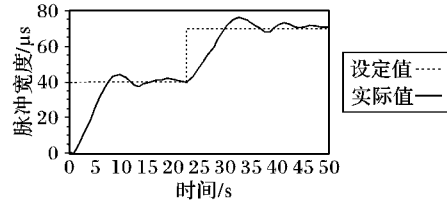


图13 PID控制器阶跃信号响应

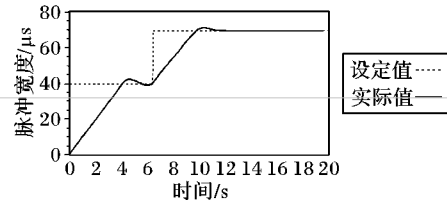


图14 基于IBVS的fuzzy-PID控制器阶跃信号响应

4 结语

针对传统PID控制器性能上的不足,本文设计了一种fuzzy-PID控制器。采用Eye-to-Hand视觉模型构建了一个基于图像的视觉伺服控制系统,并且在硬件平台上完成了实验。实验结果表明,基于图像的视觉伺服fuzzy-PID控制器克服了传统PID控制器的不足,具有超调量小(传统PID约为5%,本文方法约为1%)、调节时间短(传统PID至少需要大约20s,本文方法仅需约8s)、动态响应快、稳态误差小等优点,实现了对工作台的快速、平稳、自适应控制。基于视觉伺服的控制系统在理论上的定位精度可以达到亚像素级别,并且能够实现边加工边检测,以保证零件质量,提高自动化水平。

本文对基于图像视觉伺服控制的应用作了初步探索,后

面可在此基础上研究结合 Eye-in-Hand 视觉模型的视觉伺服智能控制系统, 以实现动态目标的实时定位、跟踪与捕捉。

参考文献:

- [1] HAN M, LIU J. RBF neural network PID control of permanent magnet linear motor [J]. *Electric Machines and Control Application*, 2012, 39(6): 29 - 32. (韩明文, 刘军. 永磁同步直线电机 RBF 神经网络的 PID 控制[J]. *电机控制与应用*, 2012, 39(6): 29 - 32.)
 - [2] LYU D, WANG X. Servo motor system based on fuzzy PID control [J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(S1): 166 - 168. (吕东阳, 王显军. 基于模糊 PID 控制的电机转台伺服系统[J]. *计算机应用*, 2014, 34(增刊1): 166 - 168.)
 - [3] AHMEND R, PAUL Y. EKF-based PI-/PD-like fuzzy-neural-network controller for brushless drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(6): 2391 - 2401.
 - [4] LI H, ZHANG Z, SHAO N, *et al.* Image-based visual servo control based on dynamic model of an AGV [J]. *Control Engineering of China*, 2012, 19(1): 56 - 59. (李慧光, 张占领, 邵暖, 等. 基于图像视觉伺服的 AGV 动力学控制[J]. *控制工程*, 2012, 19(1): 56 - 59.)
 - [5] MAHONY R, HAMEL T. Image-based visual servo control of aerial robotic systems using linear image features [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(2): 227 - 239.
 - [6] ZENG X, HUANG X, WANG M. Micro-assembly of parts based on uncalibrated microscope visual servo [J]. *Information and Control*, 2009, 38(2): 182 - 186. (曾祥进, 黄心汉, 王敏. 基于无标定显微视觉伺服的零件微装配[J]. *信息与控制*, 2009, 38(2): 182 - 186.)
 - [7] LI J, LI L, SUN X, *et al.* Application of vision system to ultrasonic drilling machine [J]. *Electronics Process Technology*, 2009, 30(2): 110 - 112. (李俊岭, 李岚, 孙晓波, 等. 视觉系统在超声打孔机中的应用[J]. *电子工艺技术*, 2009, 30(2): 110 - 112.)
 - [8] ZHANG L, WU X, YUAN P, *et al.* Design and realization of vision based motion control system for PCB board drill [C]// *University Communication Faculty Symposium: Volume One*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 24 - 27. (张连山, 吴忻生, 袁鹏, 等. 基于视觉的 PCB 板打孔机运动控制系统的设计与实现[C]//中国高校通信类院系学术研讨会论文集: 上册. 北京: 电子工业出版社, 2008: 24 - 27.)
 - [9] FIORAVANTI D, ALLOTTA B, RINDI A. Image based visual servoing for robot positioning tasks [J]. *Meccanica*, 2008, 43: 291 - 305.
 - [10] WANG L, XU D, TAN M. Survey of research on robotic visual servoing [J]. *Robot*, 2004, 26(3): 277 - 282. (王麟琨, 徐德, 谭民. 机器人视觉伺服研究进展[J]. *机器人*, 2004, 26(3): 277 - 282.)
 - [11] SRIVASTAVA S, SUKUMAR V, BHASIN P S, *et al.* A laboratory testbed for embedded fuzzy control [J]. *IEEE Transactions on Education*, 2011, 54(1): 14 - 23.
 - [12] DAS S, PAN I, DAS S, *et al.* A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, 25: 430 - 442.
 - [13] YE J, LI D, YE F. Dual reinforcement learning adaptive fuzzy control of wheeled mobile robot [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology*, 2014, 44(3): 742 - 749. (叶锦华, 李迪, 叶峰. 轮式移动机器人的双强化学习自适应模糊控制[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2014, 44(3): 742 - 749.)
 - [14] ZHAO D, YANG F, LI G. Fuzzy control system design of a DC motor based on LabVIEW [J]. *Micro-Computer Information*, 2007, 23(6): 58 - 59. (赵建军, 杨帆, 李国平. 基于 LabVIEW 的直流电机模糊控制系统设计[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(6): 58 - 59.)
-
- (上接第 1195 页)
- [4] WANG B, YANG H. Study on model and algorithm of periodic train diagram generation [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2007, 29(5): 1 - 6. (汪波, 杨浩. 周期运行图编制模型与算法研究[J]. *铁道学报*, 2007, 29(5): 1 - 6.)
 - [5] XU H, MA J, LONG J, *et al.* Study on model and method of train working diagram of urban rail transit [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University: Natural Science*, 2006, 30(3): 10 - 14. (许红, 马建军, 龙建成, 等. 城市轨道交通列车运行图编制的数学模型及方法[J]. *北京交通大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(3): 10 - 14.)
 - [6] SHI C. Analysis on use and development of train working diagram computerized drawing system [J]. *Railway Transport and Economy*, 2013, 35(2): 26 - 28. (史常庆. 列车运行图计算机编制系统的运用与发展分析[J]. *铁道运输与经济*, 2013, 35(2): 26 - 28.)
 - [7] GAO Z. The train diagram's designing and assessment of urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (高强周. 城市轨道交通列车运行图设计实现与评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.)
 - [8] QU M. Study on urban rail transit overtaking plan [J]. *Railway Transport and Economy*, 2012, 34(4): 79 - 82. (屈明月. 城市轨道交通快慢车方案研究[J]. *铁道运输与经济*, 2012, 34(4): 79 - 82.)
 - [9] PAN H. Express/slow train on urban rail transit line based on carrying capacity [J]. *Urban Mass Transit*, 2009(10): 48 - 51. (潘寒川. 市域轨道交通快慢车组合运营的通行能力研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2009(10): 48 - 51.)
 - [10] SONG J, XU R, MIAO H. Problems of operating the express/slow train on the regional urban rail transit line [J]. *Urban Mass Transit*, 2006, 9(12): 23 - 27. (宋键, 徐瑞华, 缪和平. 市域快速轨道交通线开行快慢车问题的研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2006, 9(12): 23 - 27.)
 - [11] SUN Y. Study and practice of operating express/slow trains on urban railway lines [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2013(2): 14 - 17. (孙元广. 市域线快慢车组合运营模式研究与实践[J]. *都市轨道交通*, 2013(2): 14 - 17.)
 - [12] ZHU X. Research on the metropolitan rail transit plan [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (祝晓波. 市域轨道交通快速线开行方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.)
 - [13] CHEN X. Study on multiple-train operation mode in regional line of urban rail transit [J]. *Modern Urban Transit*, 2010(6): 50 - 52. (陈祥. 城轨交通市域线多车种运营模式研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2010(6): 50 - 52.)
 - [14] WANG F, WANG L. Setting of entrance/exist tracks of depot of urban transit system [J]. *Modern Urban Transit*, 2006(2): 36 - 37. (王分线, 汪履直. 城市轨道交通车辆段出入段线的设置[J]. *现代城市轨道交通*, 2006(2): 36 - 37.)
 - [15] YUAN G, LIU B. The CAD script technology in the road engineering design application [J]. *China Water Transport*, 2007(10): 55 - 58. (原桂海, 刘标林. 浅谈 CAD 脚本技术在道路工程设计中的运用[J]. *中国水运*, 2007(10): 55 - 58.)