

文章编号: 1000-8152(2007)04-0565-04

基于Adept机器人的视觉伺服控制系统

杜建军, 王学影, 赵万生, 李彩花

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 机器人视觉伺服控制在理论和应用等方面还有许多问题需要研究, 例如特征选择、系统标定和伺服控制算法等。针对Adept机器人, 提出了一种简单快速的不需要精确标定摄像机内外部参数的摄像机标定方法, 完成了从被观测物体表面所在的视觉平面坐标系到机器人基坐标系的坐标变换。使用图像的全局特征, 即图像矩特征进行伺服跟踪; 利用所推导的图像雅可比矩阵, 设计了由图像反馈与目标运动自适应补偿组成的视觉伺服控制器。将算法对静态目标的定位实验进行了验证, 然后又将其应用到移动目标的跟踪上, 通过调节和优选控制参数, 实现了稳定的伺服跟踪和抓取。实验结果表明采用图像矩作为图像特征能够避免复杂的特征匹配过程, 并且能够获得较好的跟踪精度。

关键词: 机器人; 图像矩; 视觉伺服; 目标跟踪

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A

A visual servoing system based on Adept robot

DU Jian-jun, WANG Xue-ying, ZHAO Wan-sheng, LI Cai-hua

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: For robot visual servoing, the influences of characteristics extraction, system calibration and control algorithm on tracking speed and precision are important. A simple and fast camera calibration algorithm is proposed, by which the internal and external parameters of camera need not be calibrated precisely. The image moments that are global image descriptors are used for servoing tracking. With the moment-based image Jacobian matrix, the visual servoing controller composed of image-based feedback and adaptive motion compensation is designed to track the moving target. The validity of the control method is first validated in the experiment where the camera is repositioned with respect to a static target. This work is extended to the tracking of moving objects. By adjusting and optimizing the control parameters, the stable servoing tracking can be realized. The experiment results show that using image moment as image characteristics can avoid the complex characteristics matching process, and acquire a satisfactory tracking accuracy.

Key words: robot; image moments; visual servoing; object tracking

1 引言(Introduction)

视觉伺服的概念最早由Hill等引入, 是用视觉信息来实现机器人闭环控制, 以区别于早期把图像摄取和运动规划分开的工作方式^[1], 主要包括基于位置的视觉伺服控制^[2]和基于图像的视觉伺服控制^[3]。近年来, 国内的学者针对视觉伺服控制展开了大量的研究^[4~6], 但在伺服速度、稳定性等问题上还有待于进一步研究^[7]。本文运用基于图像特征的视觉伺服控制方法, 成功实现了基于Adept机器人手眼协调视觉伺服控制的实验系统。

2 图像特征提取(Image feature extraction)

在进行跟踪时首先要对图像进行特征提取, 由于二值化图像分析的算法非常简单, 所需的内存很小,

且二值图像中的许多运算是逻辑运算而不是算数运算, 所需的处理时间很短。另外, 由于本系统跟踪的目标为一圆形物体, 图像和背景比较简单。综合考虑, 采用二值化图像算法以适应伺服系统高实时性的要求。

3 机器人平面手眼标定及变换关系(Calibration and transformation of plane hand-eye robot)

本系统采用Adept机器人, 为四自由度SCARA型机器人, 摄像机安装在外臂上, 为平面手眼视觉关系。本文在基于文献[8]提出的直接将视觉平面坐标映射到机器人参考坐标的“黑箱”思想, 结合本系统的平面手眼特性, 提出了改进的视觉系统标定方

收稿日期: 2005-05-17; 收修改稿日期: 2006-07-17。

基金项目: 哈尔滨工业大学深圳研究生院科学研究基金资助项目(200401)。

法,从而在不标定摄像机内外参数的情况下,从视觉平面坐标直接计算出目标相对于机器人基坐标的三维空间位置。

机器人基坐标系原点定义在基座上。机器人外臂的坐标系定义如图1所示,视觉平面坐标系定义在物体表面上(即被观测表面),其 XV , YV 轴平行于图像坐标系, ZV 轴指向上方。在Adept机器人系统中,物点的空间坐标系 XO , YO , ZO 定义为绕基坐标系的Y轴旋转 180° ,如图1所示。在本系统中,还需要考虑末端执行器的工具补偿误差,即计算所得的物点与实际拾取点的差值变换矩阵 G :

$$G = \begin{bmatrix} R_{\text{grip}} & P_{\text{grip}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中由本系统物点坐标系的旋转坐标递归性,则可逆推得工具补偿误差的旋转变换矩阵 R_{grip} , P_{grip} 可以通过手持控制器得到。设视觉平面坐标中的点 vS ,将其映射到机器人外臂参考坐标中的点 LS ,则有如下变换关系存在:

$$^LS = \begin{bmatrix} {}^L R_c & {}^L P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} vS. \quad (2)$$

其中: ${}^L R_c$ 为视觉平面坐标系到外臂坐标系的 3×3 旋转变换矩阵(含有视觉平面绕外臂的 Z_L 轴的旋转角度 β ,为未知量), ${}^L P_{xyz}$ 为视觉平面坐标系的原点在外臂坐标系下的三维坐标值(即 x_c, y_c, z_c ,为未知量)。

设外臂参考坐标系中的点 LS ,将其映射到机器人基坐标系下的点 oS ,则有如下变换关系存在:

$$^oS = \begin{bmatrix} {}^o R_L & {}^o P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} {}^LS. \quad (3)$$

其中: ${}^o R_L$ 为外臂坐标系到机器人基坐标的 3×3 的旋转映射矩阵, ${}^o P_{xyz}$ 为外臂坐标系原点在基坐标下的三维坐标值。另视觉平面坐标系中的点运用齐次变换表示为

$$^vS = \begin{bmatrix} {}^o R_L & {}^o P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & x_v \cdot k_x \\ y_v \cdot k_y & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: $[x_v, y_v]^T$ 为物点在视觉平面中的二维坐标值(单位:像素), k_x 与 k_y 为摄像机在 X_V 与 Y_V 方向采样时的量化因子。

综合得到

$$^oS = \begin{bmatrix} {}^o R_L & {}^o P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L R_c & {}^L P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} E & x_v \cdot k_x \\ y_v \cdot k_y & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\text{grip}} & P_{\text{grip}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中 k_x, k_y 为图像采样时的量化因子。

根据式(5),采用最小二乘法,通过多次移动机器人外臂观察同一物体,即可求解 $\beta, x_c, y_c, z_c, k_x, k_y$ 6个未知参数,从而完成标定,无须精确标定摄像机焦距、图像主点坐标等内外部参数。同时,利用上述原理可以把视觉平面中的二维空间点变换到基坐标系下。

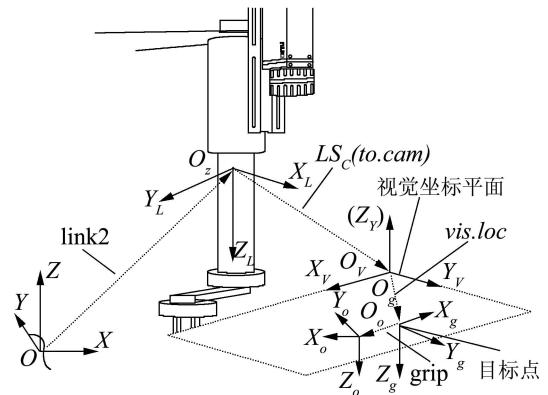


图1 视觉系统中各坐标系建立

Fig. 1 Three-dimensional plot of all coordinates

4 基于图像矩的视觉伺服控制(Visual servoing based on image moments)

由于全局特征可以避免局部特征超出现域所带来的问题,也不需要在参考特征与观察特征之间进行匹配,适用范围较广,具有更好的鲁棒性。本文选取图像矩集合特征作为图像特征信息,并采用基于图像矩的控制方法实现跟踪控制。一幅 $N \times M$ 图像的 $p+q$ 阶图像矩定义为

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M x^p y^q g(x, y), p, q = 0, 1, 2, \dots. \quad (6)$$

式中: x, y 为图像平面中像素点的坐标; $g(x, y)$ 为图像上点 (x, y) 处像素的灰度值。

那么当固定了摄像机平面和目标平面之间的距离时,由 m_{10}, m_{01} 就可以反映出摄像机与目标之间的相对平动。对 m_{10}, m_{01} 求微分,可以得出

$$J = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中:

$$J_{11} = p1 \times (m_{(p1-1)q1}^0 - m_{(p1-1)q1}),$$

$$J_{12} = q1 \times (m_{p1(q1-1)}^0 - m_{p1(q1-1)}),$$

$$J_{21} = p2 \times (m_{(p2-1)q2}^0 - m_{(p2-1)q2}),$$

$$J_{22} = q2 \times (m_{p2(q2-1)}^0 - m_{p2(q2-1)}).$$

令实时采样图像的图像特征是 $F = [m_{p1q1} \ m_{p2q2}]^T$, 期望图像的视觉特征是 $F^* = [m_{p1q1}^* \ m_{p2q2}^*]^T$, 图像特征误差是 $e = F - F^*$, 则

$$\frac{dF}{dt} = J(T_c - T_o). \quad (8)$$

其中: T_c 为摄像机平动速度, T_o 为目标平移速度.

可见本系统要解决的是一个非线性系统的视觉反馈自适应控制的问题, 而运用李雅普诺夫理论解决问题是研究非线性系统的最一般方法. 则令控制量 $T_c = T_f + \hat{T}_o$, 由视觉反馈控制和运动目标的自适应补偿组成. 建立李雅普诺夫函数

$$S = \frac{1}{2}e^T Q e + \frac{1}{2}(\hat{T}_o - T_o)^T P^{-1}(\hat{T}_o - T_o). \quad (9)$$

式中: $Q = \text{diag}(q_1, q_2)$, P 为对称正定阵.

假设目标匀速运动, 即可得

$$\dot{S} = e^T Q J T_f + (\hat{T}_o^T + e^T Q J P) P^{-1}(\hat{T}_o - T_o). \quad (10)$$

选取运动目标自适应跟踪控制律

$$T_f = -K J^{-1} e, \quad \hat{T}_o = -P J^T Q e. \quad (11)$$

其中: $K = \text{diag}(k_1, k_2)$, $k_1, k_2 > 0$, 由于 J^T 为对角线矩阵, 当目标在控制过程中不超出视场时, 易证矩阵 $Q J K J^{-1}$ 的特征值大于零, 即 $Q J K J^{-1}$ 为正定矩阵, 从而可得

$$\dot{S} = -e^T Q J K J^{-1} e \leq 0. \quad (12)$$

$\dot{S} = 0$ 当且仅当跟踪误差 $e = 0$, 可见所设计的视觉控制器和自适应律能确保跟踪误差渐进趋于0, 即达到渐进跟踪控制. 则摄像机沿 x, y 两个坐标坐标轴的平移速度是

$$T_c = T_f + \hat{T}_o = -K J^{-1} e - P J^T Q e, \quad (13)$$

即 $[T_{xc} \ T_{yc}]^T = -K J^{-1} e - P J^T R Q e.$

5 机器人视觉伺服控制实验(Robot visual servoing control experiment)

本实验系统由Adept Cobra s600型机器人, Adept技术公司的分布式运动及视觉控制器, 日本JAI公司的CV-M1型CCD, PC机构成如图2所示. 摄像机安装在机器人的外臂上, 构成了手眼视觉系统. 整个系统由视觉过程和机器人控制过程两部分组成, 其中视觉过程包括图像采集、图像处理, 向运动控制器传输运动控制量等, 由摄像机、运动控制器、PC机协作完成. 机器人控制过程由机器人本体和运动控制器协作完成.

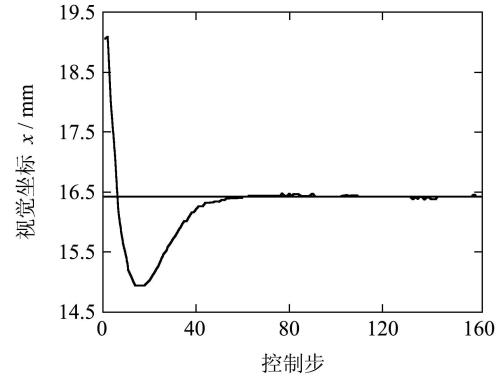


图2 实验系统

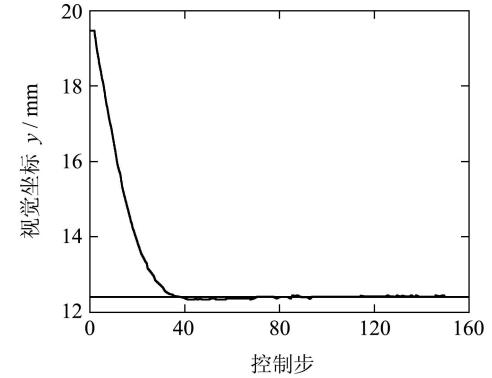
Fig. 2 Diagram of experiment system

5.1 静目标的定位控制(Static object reposition control)

实验引导机械手达到某一位姿, 目标静止落在视场内, 这相当于给视觉伺服系统加上一阶跃扰动, 图像平面中心为(16.4179, 12.3825)(单位: mm), 通过本实验移动机器人使目标快速定位在图像中心, 实验过程记录下实时图像与期望图像之间的目标质心偏移量作为误差显示.



(a) x 向轨迹曲线



(b) y 向轨迹曲线

图3 静目标定位控制曲线

Fig. 3 Orientation track of static object

图3所示为目标初始位置在(19.0519, 19.4546)经过一定的控制步数之后稳定在期望中心的质心轨迹, 图3(a)为 x 向轨迹曲线, 图3(b)为 y 向轨迹曲线. 取

控制参数 $k_1 = k_2 = 0.001$, $p_1 = p_2 = 0.001$, $q_1 = q_2 = 0.0001$, 从图3可以看出系统大约经过60步后趋于稳定. 图4(a)反映系统在60步稳定后 x 向的误差曲线, 图4(b)反映系统在60步稳定后 y 向的误差曲线.

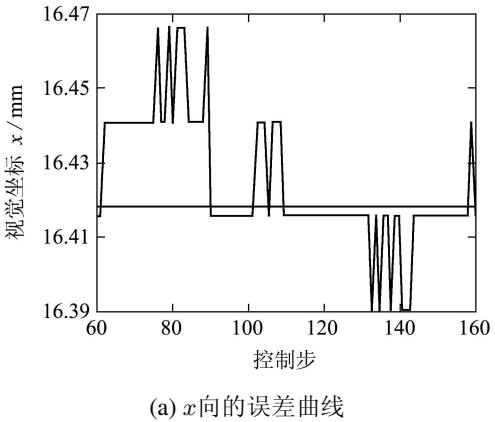
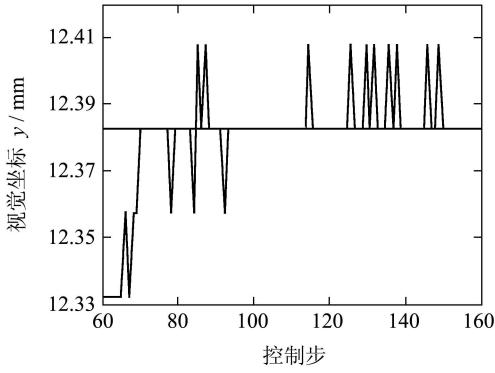
(a) x 向的误差曲线(b) y 向的误差曲线

图4 静态误差曲线

Fig. 4 Errors of static object track

5.2 动目标跟踪控制(Moving object tracking control)

在动目标跟踪实验中, 目标物体做 30 mm/s 匀速直线平面运动, 摄像机位于 300 mm 高处跟踪物体运动, 视觉伺服周期约为 80 ms . 系统跟踪的质心轨迹如图所示, 图5(a)反映了 x 向稳定过程, 图5(b)反映了 y 向稳定过程.

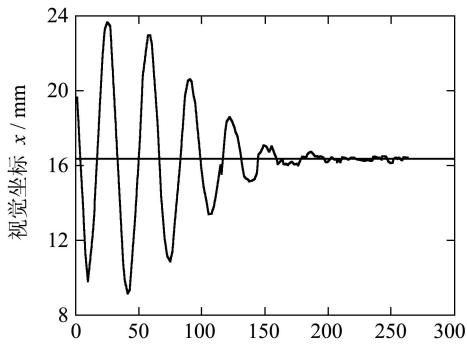
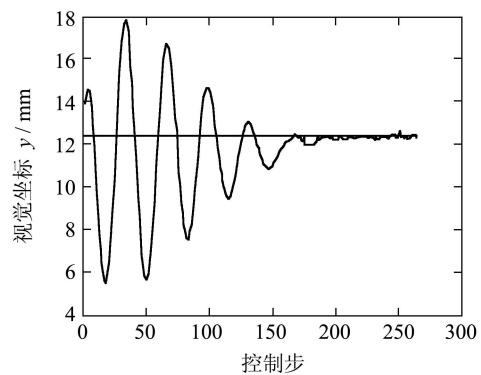
(a) x 向稳定过程(b) y 向稳定过程

图5 动态跟踪曲线

Fig. 5 Curves of moving object track

通过实验结果可以看出系统具有一定的振荡和误差存在, 误差来源主要由以下几方面构成: 二值化过程中阈值的选择会影响到图像分割的效果, 进而影响了目标质心坐标的计算精度; 摄像机分辨率受限引起的量化噪声, 影响视觉信息提取精度; 机器人运动过程中由于支架刚度不够, 有一定的抖动存在, 致使摄像机摄取的图像存在一定的测量噪声.

6 结论(Conclusion)

本文基于Adept机器人提出的平面手眼视觉标定算法, 操作、计算都非常简单快速, 而且不需要精确标定摄像机内外部参数. 采用基于图像矩特征的机器人视觉伺服控制方法, 实现了在摄像机工作空间中对运动目标物体的跟踪. 通过大量实验, 调节和优选了自适应控制参数, 得到了稳定的伺服跟踪性能.

参考文献(References):

- [1] HILL J, PARK WT. Real time control of a robot with a mobile camera[C]//Proc of the 9th Int Symp on Ind Robots. Washington DC: SME, Dearborn, Mich, 1979: 233 – 246.
- [2] WILSON W J, HULLS C C, BELL G S. Relative end-effector control using Cartesian position-based visual servoing[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 684 – 696.
- [3] ESPIAU B, CHAUMETTE F, REVES F. A new approach to visual servoing in robotics[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(3): 313 – 326.
- [4] 赵杰, 李戈, 蔡鹤皋. 基于PUMA机器人的视觉伺服控制实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 620 – 623.
(ZHAO Jie, LI Ge, CAI Hegao. Visual servo control system of PUMA robots[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(5): 620 – 623.)
- [5] 伍雪冬, 王耀南, 李灿飞. 单目视觉中基于IEKF, DD1, 及DD2滤波器的位姿和运动估计[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 35 – 42.
(WU Xuedong, WANG Yaonan, LI Canfei. Pose and motion estimation from monocular vision based on IEKF, DD1 and DD2 filters[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(1): 35 – 42.)
- [6] 林靖, 陈辉堂, 王月娟. 基于图像矩的机器人视觉伺服[J]. 同济大学学报, 2000, 28(4): 438 – 442.
(LIN Jing, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Visual servoing using image moments[J]. J of Tongji University, 2000, 28(4): 438 – 442.)

(下转第580页)

- [10] SAVAGEAU M A. *Biochemical Systems Analysis: A Study of Function and Design in Molecular Biology*[M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1976.
- [11] BRDYŚ M, CHEN S, ROBERTS P D. An extension to the modified two-step algorithm for steady-state system optimization and parameter estimation[J]. *Int J of Systems Science*, 1986, 17(8): 1229 – 1243.
- [12] 万百五. 工业大系统优化与产品质量控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(WAN Baiwu. *Optimization and Product Quality Control of Large-scale Industrial Systems*[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [13] NI T C, SAVAGEAU M A. Model assessment and refinement using strategies from biochemical systems theory: Application to metabolism in human red blood cells[J]. *J of Theoretical Biology*, 1996, 179(4): 329 – 368.
- [14] VERA J, TORRES N V, MOLES C G, et al. Integrated nonlinear optimization of bioprocesses via linear programming[J]. *AIChE Journal*, 2003, 49(12): 3173 – 3187.
- [15] XIU Z L, ZENG A P, DECKWER W D. Model analysis concerning the effects of growth rate and intracellular tryptophan level on the stability and dynamics of tryptophan biosynthesis in bacteria[J]. *J of Biotechnology*, 1997, 58(2): 125 – 140.
- [16] HATZIMANIKATIS V, BAILEY J E. Effects of spatiotemporal variations on metabolic control: Approximate analysis using (log)linear kinetic models[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 54(2): 91 – 104.

作者简介:

徐恭贤 (1976—), 男, 博士研究生, 2000年在辽宁工学院获机械电子工程专业工学学士学位, 2003 年在大连理工大学获运筹学与控制论专业理学硕士学位, 主要从事生化反应过程的建模、优化和控制的研究, E-mail: dutxugx@yahoo.com.cn;

邵 诚 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 1982年在辽宁大学获数学专业理学学士学位, 1987年和1992年在东北大学获工业自动化专业工学硕士和博士学位, 主要从事鲁棒自适应控制、智能学习控制以及化学反应过程的优化和控制等方面的研究, E-mail: cshao@dlut.edu.cn;

修志龙 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 1987年在清华大学获化学工程工学学士学位, 1990年和2000 年在大连理工大学生物化工专业获工学硕士和博士学位, 主要从事生物转化技术、分离工程以及生化反应动力学等方面的研究, E-mail: zhlixiu@dlut.edu.cn.

(上接第568页)

参考文献(References):

- [7] DIRK S, WOLFRAM B. Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association[C]//*Proc of 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation (ICRA)*. Seoul, Korea: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001, 1665 – 1670.
- [8] 熊春山, 黄心汉, 王敏. 手眼立体视觉的算法与实现[J]. 机器人, 2001, 23(2): 113 – 118.
(XIONG Chunshan, HUANG Xinhan, WANG Min. Algorithm for hand-eye stereo vision and implementation[J]. *Robot*, 2001, 23(2): 113 – 118.)

(上接第573页)

参考文献(References):

- [8] ESPANA M, LANDAU I D. Modeling, Reduced order bilinear models for distillation columns[J]. *Automatica*, 1978, 14(4): 345 – 355.
- [9] NARENDRA K S, CHENG Xiang. Modeling, Adaptive control of discrete-time systems using multiple models[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 45(5): 1669 – 1686.
- [10] CHIU S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. *J of Intelligent and Fuzzy Systems*, 1994, 2(3): 267 – 278.
- [11] CHIU S L. A cluster extension method with extension to fuzzy model identification[C] // *Proc of the Third IEEE Conf on Fuzzy Systems*.

New York: IEEE Press, 1994, 2: 1240 – 1245.

作者简介:

贾文君 (1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为复杂工业过程的智能建模与智能控制等, E-mail: jia_wenjun@163.com;

柴天佑 (1947—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事自适应控制、多变量智能解耦控制、流程工业过程综合自动化等方面的研究工作.