

基于图像雅可比矩阵的智能机器人视觉跟踪

刘 丁,郭蓝彬,杨延西  
(西安理工大学 信控中心,陕西 西安 710048)

**摘 要:**根据智能机器人视觉伺服的要求,建立了固定眼结构的 MOTOMAN-SV3XL 型工业机器人无标定视觉伺服系统.研究了目前在机器人视觉伺服研究领域中使用最为广泛的一类方法,即基于图像雅可比矩阵的方法.针对图像雅可比矩阵的特点,设计了一种基于简化 Sage-Husa 自适应滤波的图像雅可比矩阵在线估计算法,并将其应用于机器人视觉反馈控制任务中,实现了对二维平面上运动目标的跟踪,实验结果表明了该算法的有效性.  
**关键词:**智能机器人;无标定视觉伺服;图像雅可比矩阵;Sage-Husa 自适应滤波  
**中图分类号:**TP301;TP342 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2006)01-0057-05

Image Jacobian-based intelligent robot visual tracking

LIU Ding, GUO Lan-bin, YANG Yan-xi  
(Information & Control Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** MOTOMAN-SV3XL industrial robot visual servoing control system was constructed with the fixed eye according to the requirement of intelligent visual servoing. The image Jacobian-based measure, which has been used most extensively in current robot visual servoing field, was studied. And based on the succinct Sage-Husa adaptive filter theory, an on-line estimation algorithm for image Jacobian matrix was designed and applied in the tasks of the robot visual feedback control, which performed the tracking of moving objective in the 2D platform. The results show the validity of the algorithm.  
**Keywords:** intelligent robot; uncalibrated visual servoing; image Jacobian matrix; Sage-Husa adaptive filter

智能机器人视觉伺服控制是人工智能技术、实时图像处理、机器人运动学、控制理论、计算机技术以及实时计算等领域的融合,是计算机视觉研究前沿的一个重要分支.视觉作为人类最重要的获取信息的方式,也被认为是能够反映机器人智能程度的要素之一.利用视觉传感器得到的图像作为反馈信息,可构造机器人的闭环控制,即视觉伺服(visual servoing)<sup>[1]</sup>.但传统的机器人视觉伺服大都是基于系统标定技术的,包括摄像机内部参数标定、机器人运动学标定、手眼关系标定<sup>[2]</sup>.本文在无标定 MOTOMAN-SV3XL 型工业机器人视觉伺服系统下,采用 Sage-Husa 自适应滤波算法对图像雅可比矩阵进行在线估计,完成了二维平面上运动目标的跟踪任务.

1 图像雅可比矩阵

基于图像雅可比矩阵的方法是目前在智能机器人视觉伺服研究领域使用最为广泛的一类方法<sup>[1]</sup>.假设  $f \in R^m$  为图像特征参数矢量( $\dot{f}$  为在图像特征空间中相应的速度量),  $p \in R^n$  为机器人末端执行器在任务空间中的坐标( $\dot{p}$  为任务空间中相应的速度量).则图像雅可比矩阵为从机器人任务空间到图像特征空间的一个映射变换,如式(1)所述:

$$\dot{f} = J_r(p) \cdot \dot{p}, \tag{1}$$
$$J_r(p) = \left[ \frac{\partial f}{\partial p} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(p)}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(p)}{\partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(p)}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial f_m(p)}{\partial p_n} \end{bmatrix}_{m \times n}. \tag{2}$$

此模型首先由 Weiss 提出<sup>[3]</sup>,  $J_r(p) \in R^{m \times n}$  即为图像雅可比矩阵<sup>[2]</sup>,也可称之为特征敏感阵、变换阵、B

收稿日期:2006-02-28.  
基金项目:教育科学技术研究重大项目(204181);陕西省自然科学基金资助项目(2003F31).

矩阵、Composite Jacobian 及 visual-motor Jacobian 等.它反映了机器人运动空间与所选择的图像特征空间的微分映射关系.

假定一个 6DOF 机器人手眼系统,  $P$  为固定在此末端执行器上一点,  ${}^cP = [x \ y \ z]^T$  为该点在摄像机坐标系中的坐标.根据图 1 所示小孔成像模型,该点在摄像机图像平面上的坐标  $[u \ v]^T$  为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{f}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中:  $f$  为摄像机焦距.

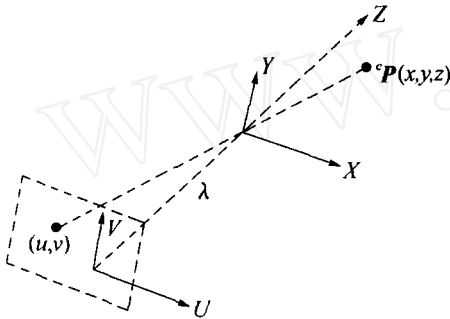


图 1 小孔成像模型

Fig. 1 Pinhole camera model

而机器人末端执行器相对于一个固定的摄像机坐标系中作平移运动  ${}^cT = [T_x \ T_y \ T_z]$  和旋转运动  ${}^cR = [\alpha \ \beta \ \gamma]$ .根据机器人末端执行器的运动,可以得到如下关系:

$${}^c\dot{P} = {}^c\dot{X}P + {}^cT. \quad (4)$$

将  ${}^cP = [x \ y \ z]^T$  代入式(4)可得到  ${}^cP$  的微分:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= z \dot{y} - \frac{yz}{z} \dot{z} + T_x, \\ \dot{y} &= \frac{uz}{z} \dot{z} - \frac{z}{z} \dot{z} + T_y, \\ \dot{z} &= -\frac{z}{z} (v \dot{x} - u \dot{y}) + T_z. \end{aligned} \quad (5)$$

由式(3)可得

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{z \dot{x} - x \dot{z}}{z^2} = \\ &= -\frac{T_x}{z} - \frac{u}{z} T_z - \frac{uv}{z} \dot{z} + \frac{2+u^2}{z} \dot{z} - v \dot{z}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{v} = -\frac{T_y}{z} - \frac{v}{z} T_z - \frac{2+v^2}{z} \dot{z} + \frac{uv}{z} \dot{z} + u \dot{z}. \quad (7)$$

经过整理,最后可以得到如下等式:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{z} & 0 & -\frac{u}{z} & -\frac{uv}{z} & \frac{2+u^2}{z} & -v \\ 0 & -\frac{1}{z} & -\frac{v}{z} & -\frac{2+v^2}{z} & uv & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

定义系统图像特征为  $f = [u \ v]^T$ ,将机器人空间运动  $\dot{p}$  定义为  $\dot{p} = [T_x \ T_y \ T_z \ x \ y \ z]^T$  (即将机器人看作理想的笛卡儿运动器件,不考虑关节运动控制),可以得到系统的图像雅可比矩阵如下

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{1}{z} & 0 & -\frac{u}{z} & -\frac{uv}{z} & \frac{2+u^2}{z} & -v \\ 0 & -\frac{1}{z} & -\frac{v}{z} & -\frac{2+v^2}{z} & uv & u \end{bmatrix}. \quad (9)$$

从式(9)可以看出,图像雅可比矩阵的值与机器人末端执行器相对于摄像机坐标系的当前位置及摄像机内部参数有关,并随执行器位置的变化而变化.所以,有必要对图像雅可比矩阵进行在线估计.

## 2 采用 Sage-Husa 自适应滤波对雅可比矩阵进行在线估计

如果构造一个系统,以待估计的雅可比矩阵参数作为系统的状态,那么对雅可比矩阵的估计将转变为对此系统状态的观测.根据图像雅可比矩阵的定义,将其离散化,则有

$$f(k+1) = f(k) + J(p(k)) \cdot p(k). \quad (10)$$

为实现对  $J(p)$  矩阵各个元素的估计,定义如下  $m \times 1$  维观测向量:

$$s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p} & \frac{\partial f_2}{\partial p} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial p} \end{bmatrix}^T.$$

式中:  $\frac{\partial f_i}{\partial p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial p_n} \end{bmatrix}$ ,  $(i = 1, 2, \dots, m)$  为雅可比矩阵  $J(p)$  的第  $i$  行向量.

同时定义雅可比矩阵的观测向量  $s(k)$  为系统状态,而手爪运动所引起的图像特征变化为系统输出,即  $y(k) = f(k+1) - f(k)$ .得到如下状态方程:

$$\begin{cases} s(k+1) = s(k) + (k), \\ y(k) = C(k) \cdot s(k) + v(k). \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $(k)$ ,  $v(k)$  分别为状态噪声和图像观察噪声,假定为高斯白噪声.

$$C(k) = \begin{bmatrix} p(k)^T & 0 \\ & \ddots \\ 0 & p(k)^T \end{bmatrix}_{m \times mn}. \quad (12)$$

由于在系统状态噪声方差阵和观测噪声方差阵均未知时,得到的估值与真实值之间有较大误差<sup>[4]</sup>,故根据系统的特点和工程应用实际,设只有观测噪声方差阵未知,参照 Kalman 滤波<sup>[5]</sup>,建立简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法,其递推方程为

给定初值:  $s(0)$ ,  $P(0)$ ,  $b$ ,  $k = 1$ .

计算加权系数:  $d(k) = (1 - b) / (1 - b^k)$ .

状态一步预测:

$$\hat{s}^-(k+1) = \hat{s}(k). \quad (13)$$

一步预测均方误差:

$$Q(k+1) = P(k) + R.$$
 (14)

观测噪声方差阵:

$$R_v(k) = (1 - d(k)) R_v(k-1) + d(k) \cdot \{ [y(k+1) - C(k) \cdot \hat{s}(k)] \cdot [y(k+1) - C(k) \cdot \hat{s}(k)]^T - C(k) \cdot Q(k+1) \cdot C^T(k) \}.$$
 (15)

增益矩阵:

$$K(k+1) = Q(k+1) \cdot C^T(k) \cdot [C(k) \cdot Q(k+1) \cdot C^T(k) + R_v(k)]^{-1}.$$
 (16)

状态估计方程:

$$\hat{s}(k+1) = \hat{s}^-(k+1) + K(k+1) \cdot [y(k+1) - C(k) \cdot \hat{s}(k)].$$
 (17)

估计均方误差:

$$P(k+1) = [I - K(k+1) \cdot C(k)] \cdot Q(k+1).$$
 (18)

式中:  $R$  为状态噪声方差阵, 根据实际的噪声情况设定,  $R_v$  为图像观察噪声方差阵, 需实时估计. 遗忘因子  $b$  依照噪声统计变化情况而定, 文中将其取为 0.99.  $P(k)$  为状态估计误差方差阵. 而状态估计的

初值  $\hat{s}(0)$  (即  $\hat{s}(0)$ ) 可采用如下最小二乘方法获得. 在手爪的初始位置任意给定  $n$  步线性无关的试探运动  $p_1 \dots p_n$ , 观察相应的图像特征变化  $f_1 \dots f_n$ , 从而获得初始的雅可比矩阵估计值<sup>[6]</sup>:

$$\hat{s}(0) = [f_1 \dots f_n] \cdot [p_1 \dots p_n]^{-1}.$$
 (19)

然后用  $\hat{s}(0)$  构成  $\hat{s}(0)$ . 在整个递推估计过程中只需在系统初始时给出步  $n$  试探运动, 此后在雅可比矩阵的估计中直接使用机器人已完成的跟踪运动所获得的信息, 不需引入任何试探运动.

3 视觉反馈控制

假定图像上观察到的运动目标的位置为  $f^o(t) = [u_o(t) \quad v_o(t)]^T$ , 机器人末端位置为  $f^s(t) = [u_g(t) \quad v_g(t)]^T$ , 定义系统误差为<sup>[7]</sup>

$$e_g(t) = f^o(t) - f^s(t).$$
 (20)

定义机器人运动控制量  $U = \dot{p}^s$ , 建立 PI 反馈控制:

$$U(t) = J_g^{-1} [k_1 \cdot e_g(t) + k_2 \int e_g(t) dt].$$
 (21)

式中:  $k_1, k_2$  分别为比例系数与积分系数. 其控制结构图如图 2 所示.

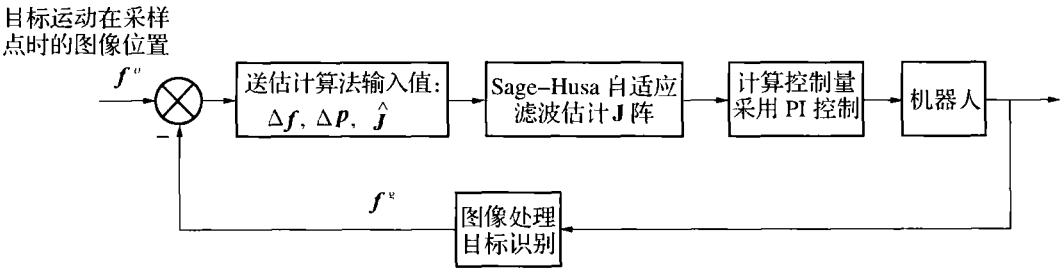


图 2 视觉跟踪系统结构图  
Fig 2 Diagram of visual tracking system

4 实验

根据以上结论, 在 MOTOMAN-SV3XL 机器人视觉伺服系统上分别进行了如下的几组运动目标的无标定跟踪试验. CCD 摄像头固定在机器人的正上方, 内外参数不作任何标定, 机器人末端执行器只做二维平面运动, 其高度固定为 110.116 mm. 为简化图像处理和目标识别, 手爪的位置用一个安装在手爪上并伸出一定长度的红色块标识, 而目标为一个涂有绿色的木块, 以色块的中心坐标作为目标和手爪的图像位置. 实验过程中采用 VC++ 编写机器人视觉伺服控制系统, 系统控制界面如图 3 所示.

在运动目标的跟踪实验中, 滤波估计算法中  $R$  的取为  $0.5I_4$ ,  $R_v$  的初始值取为  $0.5I_2$ .  $P$  矩阵的初

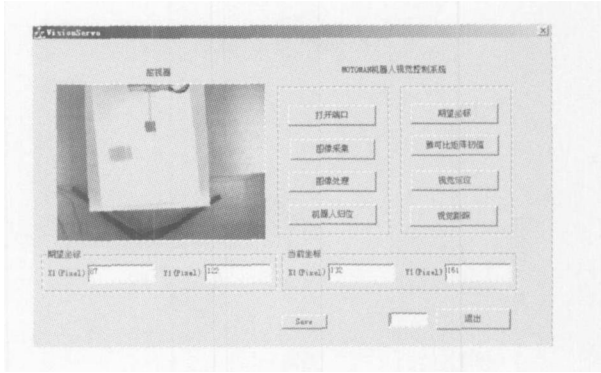
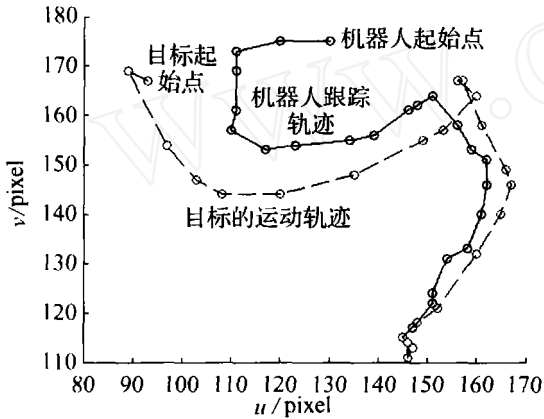


图 3 机器人视觉伺服控制系统  
Fig. 3 Robot visual servoing control system

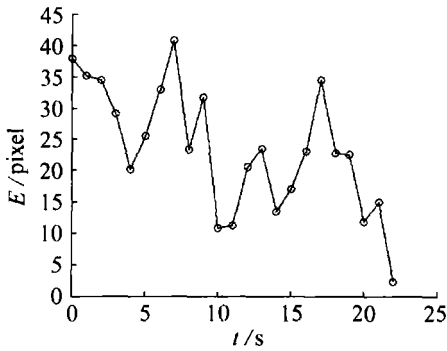
始值可取  $P(0) = 10^5 \cdot I_n$  ( $I_n$  意为  $n$  维单位阵). 图像雅可比矩阵的初值  $\hat{s}(0)$  通过一开始作任意 2 步

试探运动得到,将其构成  $s(0)$ , 取  $s(0) = [0.05 \ 0.955 \ -1.011 \ 0.08]^T$ . 将图像误差  $e(f)$  取其范数,得到总的误差  $E = \sqrt{e(f) \cdot e(f)^H}$ . 在以下实验中,考虑误差  $E$  在 5 个 pixel 范围内视为已跟踪上目标.

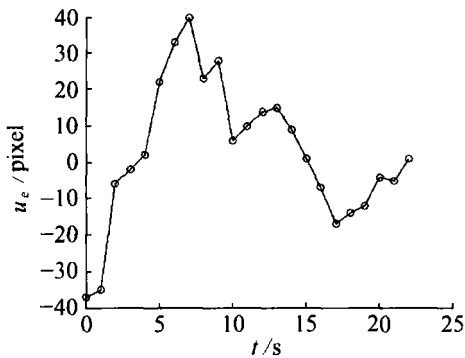
实验 1 实验中,运动目标在工作空间内作任意二维平面运动,手爪在图像坐标上的起始位置为  $[130, 175]$ , 终点位置为  $[147, 117]$ . 运动目标在图像坐标上的起始位置为  $[93, 167]$ , 终点位置为  $[147, 113]$ .



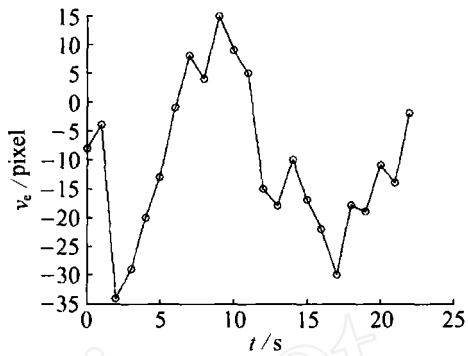
(a) 目标与机器人运动轨迹



(b) 误差变化曲线



(c)  $u$  轴误差变化曲线

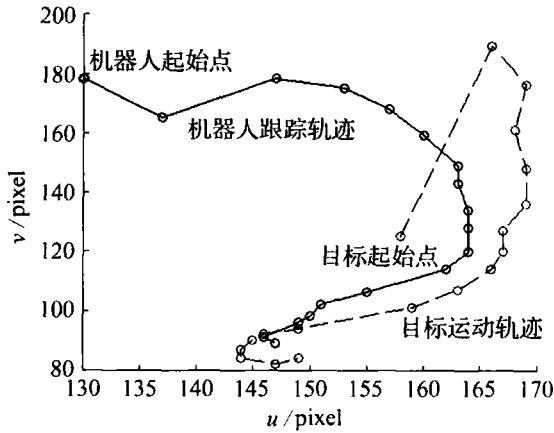


(d)  $v$  轴误差变化曲线

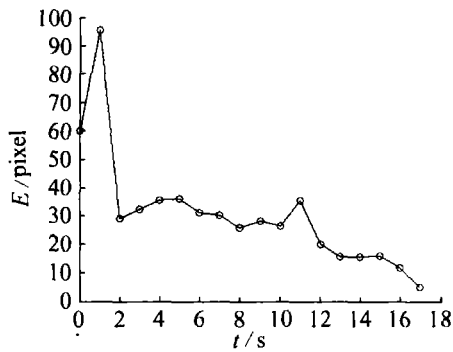
图 4 跟踪实验 1

Fig. 4 Tracking experiment 1

实验 2 运动目标在工作空间内作任意二维平面运动,手爪在图像坐标上的起始位置为  $[130, 178]$ , 终点位置为  $[147, 89]$ . 运动目标在图像坐标上的起始位置为  $[158, 125]$ , 终点位置为  $[149, 85]$ . 误差在 5 个 pixel 范围内.



(a) 目标与机器人运动轨迹



(b) 误差变化曲线

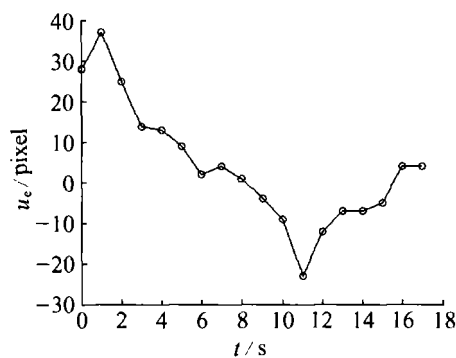
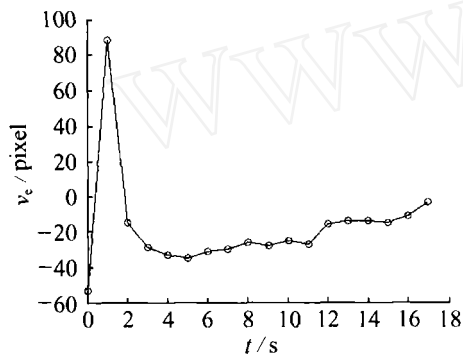
(c)  $u$  轴误差变化曲线(d)  $v$  轴误差变化曲线

图 5 跟踪实验 2

Fig. 5 Tracking experiment 2

从以上 2 个实验可以看出,机器人对目标的任意运动都能很好地跟踪上.最后的误差都能稳定在允许范围之内.由于目标作任意运动,故得到的误差曲线真实反映了机器人与目标间的运动情况.

## 5 结束语

本文分析了智能机器人视觉伺服系统的基本原理,研究了图像雅可比矩阵,并采用 Sage-Husa 自适应滤波算法进行在线估计,实现了二维平面上机器人对任意运动目标的跟踪,实验结果显示了该方法的有效性.下一步将结合眼在手的结构对机器人视觉伺服系统进行研究.

## 参考文献:

- [1] HU TCHINSON S, HAGER G D, CORKE P I. A tutorial on visual servo control [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 651 - 670.

- [2] SUTANTO H, SHARMA R, VARMA V. Image based autodocking without calibration [A]. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Albuquerque, New Mexico, 1997.
- [3] WEISS L E, SANDERSON A C, NEUMAN C P. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback [J]. IEEE Journal of Robotics and Automations, 1987, 3(5): 404 - 417.
- [4] 岳晓奎,袁建平.一种基于极大似然准则的自适应卡尔曼滤波算法[J].西北工业大学学报,2005,23(4):469 - 474.
- YUE Xiaokui, Yuan Jianping. An adaptive Kalman filtering algorithm based on maximum likelihood criterion [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(4): 469 - 474.
- [5] WELCH G, BISHOP G. An introduction to the Kalman filter [OL]. 2004, 4, 5 <http://www.cs.unc.edu>.
- [6] JAGERSAND M, FUENTES O, NELSON R. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision manipulation [A]. In Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Albuquerque, New Mexico, 1997.
- [7] 杨延西,刘 丁,闫振杰.图像反馈机器人视觉伺服系统仿真[J].系统仿真学报,2003,15(12):1737 - 1740.
- YANG Yanxi, LIU Ding, YAN Zhenjie. Simulation of image feedback robot manipulator visual servo system [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(12): 1737 - 1740.

### 作者简介:



刘 丁,男,1957 年生,教授,博士生导师,西安理工大学控制理论与控制工程学科带头人.中国人工智能学会常务理事,在国内外学术期刊及国际学术会议上发表学术论文 100 余篇,其中被 SCI、EI 等检索收录 30 余篇.

E-mail: liud @xaut.edu.cn



郭蓝彬,男,1980 年生,硕士研究生,研究方向为机器人视觉伺服控制.



杨延西,男,1975 年生,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为机器人轨迹规划和视觉伺服控制.在国内外学术期刊及国际学术会议上发表学术论文 20 余篇,其中被 EI 等检索收录 10 余篇.