

文章编号: 1000-8152(2008)01-0066-05

具有深度自适应估计的视觉伺服优化

武 波, 李惠光, 徐 鹏

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 在手眼机器人视觉伺服中, 如何确定机器人末端摄像机移动的速度和对物体的深度进行有效的估计还没有较好的解决方法. 本文采用一般模型法, 通过求解最优化控制问题来设计摄像机的速度, 同时, 利用物体初始及期望位置的深度估计值, 提出了一种自适应估计的算法对物体的深度进行估计, 给出了深度变化趋势, 实现了基于图像的定位控制. 该方法能够使机器人在工作空间范围内从任一初始位置出发到达期望位置, 实现了系统的全局渐近稳定且不需要物体的几何模型及深度的精确值. 最后给出的仿真实例表明了本方法的有效性.

关键词: 视觉伺服; 全局稳定性; 最优化控制; 自适应深度估计

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Optimization for visual servoing with depth adaptation

WU Bo, LI Hui-guang, XU Peng

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: How to design the moving speed of a camera and effectively estimate the depth of the observed object have not been solved properly for visual servoing with eye-in-hand configuration. The GMC(generic model control) is introduced to confirm the output trajectory of the system, and an optimization controller is designed for controlling the moving speed of the camera. In the case of unknown object depth, an adaptive update law is proposed to estimate the depth of selected features based on the approximate depth values of these features at the initial and desired positions. Under the driving of the controller, the camera can reach any desired location from any initial position in the robot workspace while the system is globally asymptotically stable. The method does not need any knowledge of a three-dimensional model of the object. Finally, a simulation is carried out to show its validity.

Key words: visual servoing; global stability; optimization control; depth adaptation

1 引言(Introduction)

近几年来, 手眼机器人视觉伺服在机器人界已经引起广泛和越来越多的关注. 粗略地讲, 手眼机器人视觉伺服就是在闭环控制系统中利用物体视觉特征的当前图像特征及其期望图像特征引导摄像机从任一初始位置运动到另一个期望的位置^[1]. 目前国内外已经提出了不少的理论方法来处理这个问题, 但大部分都集中在深入理解从图像空间到笛卡儿空间的投影几何关系上着手来进行视觉伺服控制, 如由最初的基于位置的视觉伺服^[2], 基于图像的视觉伺服^[3], 到近几年做的比较好的将旋转与平移解耦分别进行控制的基于位置和图像的混合视觉伺服^[4], 及最近的能够产生弧形轨迹的具有大的摄像机位移情况下的视觉伺服^[5]. 但是, 基于位置的控制精度很难保证且计算量比较大, 基于图像的控制设计较困难, 它的收敛域仅限制在期望点附近, 混合视觉

伺服虽然对基于位置的和基于图像的两种结构进行取长补短, 系统的稳定性和收敛性都有所提高, 但需要在线实时计算图像间的单应性矩阵以及对其进行分解, 单应性矩阵的求解精度直接影响着控制效果, 文[5]虽然能够把物体限制在视域之内, 且能实现全局稳定性, 但也需要计算单应性矩阵以及对其进行分解, 且对摄像机的空间定标要求较严格.

本文考虑视觉伺服的具体特点, 以物体上的几个点作为视觉特征, 引进一般模型法(generic model control)使得系统的图像特征点尽可能地按照预定的轨迹运行, 采用最优化控制的方法设计控制器(摄像机的平移和旋转速度), 基于图像误差实现定位控制, 同时, 利用初始及期望深度估计值设计了深度自适应控制规律, 给出了深度变化趋势, 确保了系统的全局渐近可稳定性. 该方法不需要物体的几何模型及计算单应性矩阵, 也不需要深度的精确值, 仿真实

例表明了该方法的有效性.

2 符号及问题描述(Notation and problem formulation)

如图1所示, F, F^* 分别代表摄像机当前、及期望位置的摄像机坐标系. $R \in SO_3, t \in \mathbb{R}^3$ 分别代表期望位置摄像机坐标系相对于当前位置摄像机坐标系的旋转和平移. $P_i(P_i^*) \in \mathbb{R}^3$ 为物体上某点在 $F(F^*)$ 中的坐标. $p_i(p_i^*) \in \mathbb{R}^2$ 为物体上点 $P_i(P_i^*)$ 在图像平面上的像素坐标. $m_i(m_i^*) \in \mathbb{R}^2$ 为 $P_i(P_i^*)$ 在图像平面中的尺寸坐标. $\omega_c, v_c \in \mathbb{R}^3$ 为摄像机的旋转和平移速度.

假定物体是静止的, 摄像机的内参数已知, 物体始终处于摄像机的视域之内, 且物体的各特征点的深度大于零, 物体上所选择的一些特征点首先从期望位置 F^* 被观察, 其次相应的这些点在初始位置 F 被观察, 视觉伺服就是控制摄像机从某个初始位置向期望位置实时移动(平移和旋转)最终使 F 与 F^* 重合, 即 $m - m^* = 0$.

3 主要结果(Main result)

根据文献[6], 图像平面点 $m_i = [x_i \ y_i]^T$ 的速度与摄像机的速度 ω_c, v_c 之间有如下关系:

$$\dot{m}_i = J_i(m_i, Z_i)u. \quad (1)$$

其中: $u = [v_c^T \ \omega_c^T]^T$ 为机器人的控制输入, $J_i(m_i, Z_i)$ 为图像雅可比矩阵, 其表达式为

$$J_i(m_i, Z_i) = [\theta_i A_i(m_i) \ B_i(m_i)],$$

$$A_i(m_i) = \begin{bmatrix} -f & 0 & x_i \\ 0 & -f & y_i \end{bmatrix},$$

$$B_i(m_i) = \begin{bmatrix} \frac{x_i y_i}{f} & -\frac{x_i^2 + f^2}{f} & y_i \\ \frac{y_i^2 + f^2}{f} & -\frac{x_i y_i}{f} & -x_i \end{bmatrix},$$

$\theta_i = 1/Z_i$, Z_i 为物体的特征点的深度. 因此, 由物体上的 N 个特征点构成的视觉伺服系统状态方程如下

$$\dot{m} = J(m, Z)u = [\theta A(m) \ B(m)]u. \quad (2)$$

其中:

$$m = [m_1^T \ \cdots \ m_N^T]^T,$$

$$\theta = \text{diag}\{\theta_1, \theta_1, \cdots, \theta_N, \theta_N\},$$

$$J(m, Z) = [J_1^T(m_1, Z_1) \ \cdots \ J_N^T(m_N, Z_N)]^T,$$

$$A(m) = [A_1^T(m_1) \ \cdots \ A_N^T(m_N)]^T,$$

$$B(m) = [B_1^T(m_1) \ \cdots \ B_N^T(m_N)]^T.$$

引进如下输出方程

$$y = m. \quad (3)$$

其中: $y = [y_1^T \ y_2^T \ \cdots \ y_N^T]^T \in \mathbb{R}^{2N}, y_i \in \mathbb{R}^2$, 则由式(2)和(3)构成的整个系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{m} = [\theta A(m) \ B(m)]u, \\ y = m, \end{cases} \quad (4)$$

对输出方程(3)求导可得

$$\dot{y} = \dot{m} = [\theta A(m) \ B(m)]u = \theta A(m)v_c + B(m)\omega_c. \quad (5)$$

采用一般模型方法引导系统输出按照预定的轨迹从一个初始状态到终止状态. 考虑如下微分方程确定的轨迹:

$$\dot{y}_r = k[y^* - y_r]. \quad (6)$$

其中: y_r 是参考轨迹, y^* 是设定值(也就是图像平面特征点的期望坐标 m^*), k 是 y_r 和 y^* 之间的算子. 为了能够使得系统的输出快速地趋向于其稳态值(设定值) y^* , 并且为了减少干扰, 抑制超调, 得到较小的跟踪误差, 选择算子为比例微分器的形式, 即

$$k[\varepsilon] = K_1 \varepsilon + K_0 \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (7)$$

$$K_1 = \text{diag}\{K_{11}, K_{11}, K_{12}, K_{12} \cdots K_{1N}, K_{1N}\},$$

$$K_0 = \text{diag}\{K_{01}, K_{01}, K_{02}, K_{02} \cdots K_{0N}, K_{0N}\},$$

K_1, K_0 为正定对角矩阵. 进一步, 则有

$$\dot{y}_r = K_1(y^* - y_r) + K_0 \frac{d(y^* - y_r)}{dt}, \quad (8)$$

$y_r(0) = y_0$ 为初值, 显然上式是一阶微分系统, 可以按照经典控制理论中的方法对相应的单回路选择合适的系数 K_{1i}, K_{0i} , 使得系统具有合适的暂态性能指标.

通过求解如下式的最优化控制问题, 选择 u 使得系统的输出尽可能地跟踪预定轨迹, 即, 令 $y = y_r, (y(0) = y_r(0))$,

$$\begin{cases} \min_u \int_0^{t_f} [a(x, u)^T W a(x, u)], \\ \text{s.t. } \dot{m} = [\theta A(m) \ B(m)]u, \\ |u| \leq \beta, \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$a(x, u) = \dot{y} - \dot{y}_r = [\theta A(m) \ B(m)]u - K_1(m^* - m) - K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt}, \quad (10)$$

W 是一个正定的加权阵. 如果控制量满足式(9)中 $|u| \leq \beta$, β 的值由实际控制对象的最大速度来确定, 那么上面最优问题的解化为求下式:

$$[\theta A(m) \ B(m)]u - K_1(m^* - m) -$$

$$K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt} = 0, \quad (11)$$

则有

$$\theta A(m)v_c + B(m)\omega_c - K_1(m^* - m) - K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt} = 0. \quad (12)$$

对上式重新安排, 以估计值 $\hat{\theta}$ 代替 θ 有分别含摄像机平移和旋转速度的两个等价控制器表达式

$$\hat{\theta} A(m)v_c = \lambda K_1(m^* - m) + K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt}, \quad (13)$$

$$B(m)\omega_c = (1 - \lambda)K_1(m^* - m). \quad (14)$$

其中 $0 < \lambda < 1$, 进而有

$$v_c = \text{pinv}(A(m))\hat{\theta}^{-1}(\lambda K_1(m^* - m) + K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt}), \quad (15)$$

$$\omega_c = \text{pinv}(B(m))(1 - \lambda)K_1(m^* - m). \quad (16)$$

$\text{pinv}(A(m))$ 及 $\text{pinv}(B(m))$ 是分别求矩阵 $A(m)$ 和 $B(m)$ 的伪逆.

根据式(4)(15)以及式(16), 利用李雅普诺夫方法给出有关深度调整律及稳定性条件的定理.

定理 1 对于给定的系统(4)和控制(15)(16), 存在光滑的存储函数

$$V(m, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_N) = \frac{1}{2}(m - m^*)^T(m - m^*) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \tau_i (\theta_i^{\frac{1}{2}}(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*))^2, \quad (17)$$

在物体的各特征点深度的倒数 θ_i 的估计值 $\hat{\theta}_i$ 具有调整率式(18)的情况下, 系统是全局渐进可稳定的.

$$\begin{aligned} &(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*)\dot{\hat{\theta}}_i = \\ &-\frac{1}{\tau_i \hat{\theta}_i} \left(\frac{1}{2} K_{0i} - \lambda K_{1i} \right) (m_i - m_i^*)^T (m_i - m_i^*) - \\ &\frac{1}{2\tau_i \hat{\theta}_i} K_{0i} \left(\frac{d(m_i^* - m_i)}{dt} \right)^T \left(\frac{d(m_i^* - m_i)}{dt} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $K_{0i} \geq 2\lambda K_{1i}$, $\hat{\theta}_i^*$ 是 F^* 坐标系中 θ_i^* 的估计值, 假设已知, $\tau_i > 0$ 为常数.

在证明定理之前, 先介绍一个引理^[7].

引理 1 对具有适当维数的任意的向量或矩阵 X, Y 和任意正常数 $\mu > 0$, 有如下不等式成立:

$$Y^T X + X^T Y \leq \mu X^T X + \frac{1}{\mu} Y^T Y.$$

证 求存储函数式(17)的微分得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (m - m^*)^T [\theta A(m) \quad B(m)] u + \\ &\sum_{i=1}^N \tau_i \theta_i (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*) \dot{\hat{\theta}}_i, \end{aligned}$$

把 $u = [v_c^T \quad \omega_c^T]^T$ 及(13)(14)代入上式得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (m - m^*)^T \hat{\theta}^{-1} (\lambda K_1(m^* - m) + \\ &K_0 \frac{d(m^* - m)}{dt}) + \sum_{i=1}^N \tau_i \theta_i (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*) \dot{\hat{\theta}}_i + \\ &(m - m^*)^T (1 - \lambda) K_1(m^* - m) = \\ &\sum_{i=1}^N (m_i - m_i^*)^T \theta_i \hat{\theta}_i^{-1} \lambda K_{1i} (m_i^* - m_i) + \\ &\sum_{i=1}^N (m_i - m_i^*)^T \theta_i \hat{\theta}_i^{-1} K_{0i} \frac{d(m_i^* - m_i)}{dt} + \\ &\sum_{i=1}^N \tau_i \theta_i (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*) \dot{\hat{\theta}}_i + \\ &(m - m^*)^T (1 - \lambda) K_1(m^* - m), \end{aligned}$$

根据引理1, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \theta_i \hat{\theta}_i^{-1} K_{0i} - \theta_i \hat{\theta}_i^{-1} \lambda K_{1i} \right) (m_i - m_i^*)^T \times \\ &(m_i - m_i^*) + \sum_{i=1}^N \tau_i \theta_i (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*) \dot{\hat{\theta}}_i + \\ &\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \theta_i \hat{\theta}_i^{-1} K_{0i} \left(\frac{d(m_i^* - m_i)}{dt} \right)^T \frac{d(m_i^* - m_i)}{dt} - \\ &(m - m^*)^T (1 - \lambda) K_1(m - m^*), \end{aligned}$$

由定理条件式(18)可得

$$\dot{V} \leq -(m - m^*)^T (1 - \lambda) (m - m^*) \leq 0,$$

所以, 由(4)(15)(16)可得, 当 $u = 0, y = m^*$ 时, $m \rightarrow m^*$, 则可知系统的期望位置点是可检测的, 那么根据La Salle不变集定理, 该系统期望位置点 m^* 的渐近稳定性得证.

证毕.

利用式(18)估计物体深度时, 不同的特征点, 可以选择不同的参数 τ_i , 为了保证 $\hat{\theta}_i$ 有界, 通过调整参数 τ_i , 可以在 $\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^* = 0$ 之前, 使得 $\|m_i - m_i^*\| = 0$ 达到要求的误差范围之内.

4 仿真实例(Simulation)

考虑如图2所示的处在 F 坐标系中正方体正面5个特征点的初始图像特征向量及其如图3所示的 F^* 中期望图像特征向量分别为

$$\begin{aligned} p(0) &= [400 \quad 50 \quad 824 \quad 50 \quad 616 \\ &\quad 266 \quad 400 \quad 474 \quad 824 \quad 474]^T, \\ p_d &= [32 \quad 50 \quad 400 \quad 50 \quad 216 \\ &\quad 242 \quad 32 \quad 434 \quad 400 \quad 402]^T, \end{aligned}$$

单位均为像素, 摄像机的焦距为0.016 m, 图像平面 x 轴和 y 轴方向的分辨率均为80000 pixels/m, 物体上各特征点初始深度约为0.3 m, 期望深度约分别为0.32, 0.35, 0.33, 0.32, 0.35 m, 采样周期为0.1 s,

$$\lambda = \frac{1}{9}, \tau_1 = \frac{1}{13080}, \tau_2 = \frac{1}{45500},$$

$$\tau_3 = \frac{1}{21300}, \tau_4 = \frac{1}{12500}, \tau_5 = \frac{1}{45000},$$

$$K_0 = K_1 = 0.25 \text{diag}\{1, 1, \dots, 1, 1\} \in \mathbb{R}^{10},$$

摄像机的平移速度限制在0.5 cm/s, 旋转速度限制在0.1 rad/s, 那么在图像平面上物体特征点的运动轨迹及其误差曲线如图4,5所示(图4中: 圆圈代表初始位置, 黑点代表期望位置), 图6, 7是摄像机的平移及旋转速度, 图8是各特征点的深度变化曲线. 本仿真的最初设计方案是与文献[4]相似的, 让摄像机绕着其当前坐标系Y轴顺时针旋转30度, 同时, 沿着X轴负方向平移8 cm, 绕着X轴逆时针旋转10度, 摄像机具有较大的位移, 其运动过程如图1所示, 从仿真结果可以看出, 1000步后, 由于计算误差及本文所采用的分辨率比较高等原因, 图像特征点的最大误差在10个像素以下, 控制效果比较好, 另外, 在所给参数的情况下, 过渡过程经过400步后基本完成, 暂态过程比较快. 因此, 利用本方法设计给出的控制器(摄像机的平移和旋转速度), 能够很好地驱使摄像机稳定地由任一初始位置向期望位置运动, 动态调节过程较快, 定位误差较小.

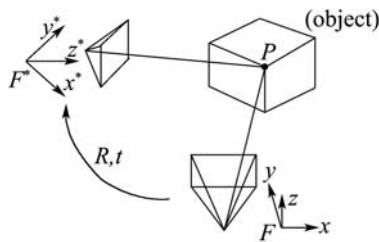


图 1 问题图示说明
Fig. 1 Problem illustration

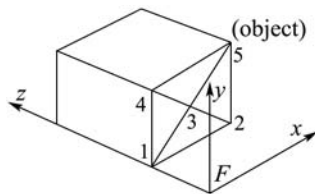


图 2 物体在F坐标系中的空间位置
Fig. 2 The position of the object in F

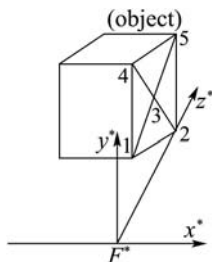


图 3 物体在F*坐标系中的空间位置
Fig. 3 The position of the object in F*

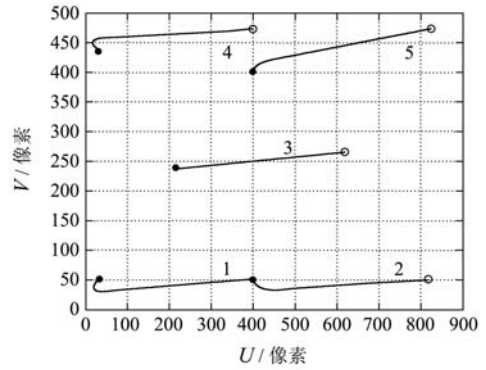


图 4 图像平面特征点的运动轨迹
Fig. 4 Trajectories in the image of the target points

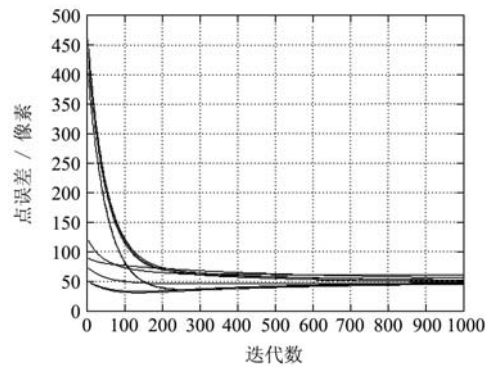


图 5 图像平面特征点误差曲线
Fig. 5 Error in image points coordinates

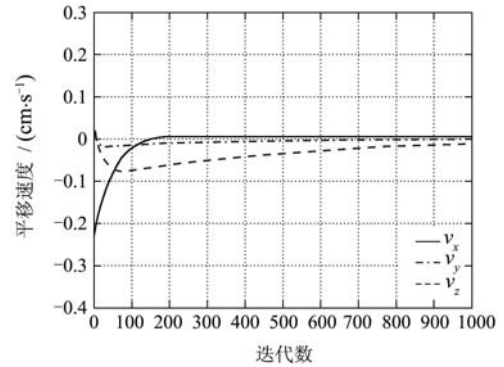


图 6 摄像机平移速度
Fig. 6 Translational velocity of the camera

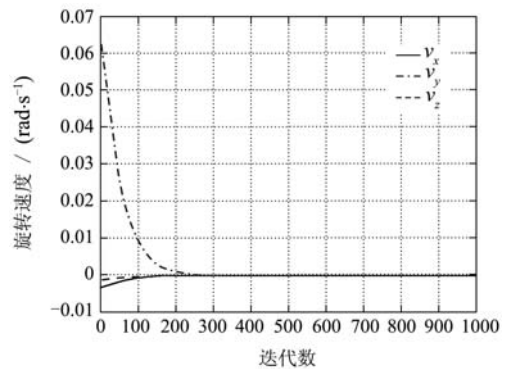


图 7 摄像机旋转速度
Fig. 7 Rotational velocity of the camera

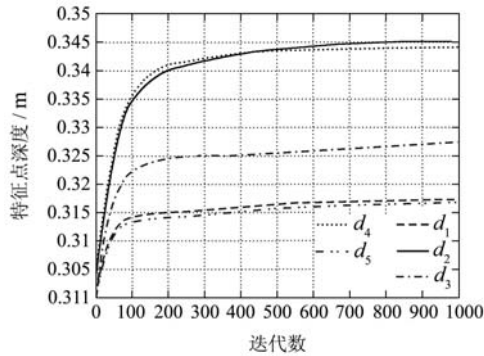


图8 特征点深度变化曲线

Fig. 8 Points depth

5 结论(Conclusion)

针对手眼机器人视觉伺服系统, 本文利用一般模型法及优化控制的方法设计视觉伺服控制器, 基于图像误差实现定位控制, 在不需物体精确深度、物体的几何模型、计算单应性矩阵的情况下, 给出了摄像机的平移和旋转速度, 并且利用自适应更新律方法对深度进行了估计, 给出深度变化趋势, 使得系统具有大范围内的渐近稳定性, 利用本方法设计的控制器具有设计简单, 容易实现的特点, 仿真结果说明了该方法的有效性。

参考文献(References):

[1] HUTCHINSON S, HAGER G, CORKE P. A tutorial on visual servo control[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12(10):

651 – 670.

[2] WILSON W, HULLS C, BELL G. Relative end-effector control using Cartesian position-based visual servoing[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12(10): 684 – 696.

[3] FEDDEMA J, MITCHELL O. Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1989, 5(10): 691 – 700.

[4] MALIS E, CHAUMETTE F, BOUDET S. 2 1/2-D visual servoing[J]. *IEEE Trans on Robotics Automation*, 1999, 15(4): 238 – 250.

[5] GRAZIANO C, ANTONIO V. Visual servoing for large camera displacements[J]. *IEEE Trans on Robotics Automation*, 2004, 20(8): 724 – 735.

[6] HASHIMOTO K, KIMOTO T, EBINE T, et al. Manipulator control with image based visual servoing[C] // *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Sacramento, California: IEEE Press, 1991: 2267 – 2272.

[7] 李惠光, 武波, 李国友, 等. Delta算子控制及其鲁棒控制理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(LI Hui-guang, WU Bo, LI Guo-you, et al. *Delta and Its Robust Control Theory*[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2005.)

作者简介:

武波 (1968—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为鲁棒控制、视觉伺服, E-mail: wubo_ysu@126.com;

李惠光 (1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究兴趣为采样系统理论、Delta算子理论、机器人视觉伺服, E-mail: ydlhg@163.com;

徐鹏 (1981—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为机器人视觉伺服, E-mail: xupeng208@yahoo.com.