

文章编号 : 1000-6893(2005)03-0344-05

基于双圆特征的无人机着陆位置姿态视觉测量方法

张广军, 周富强

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

Position and Orientation Estimation Method for Landing of Unmanned Aerial Vehicle with Two Circle Based Computer Vision

ZHANG Guang-jun, ZHOU Fu-qiang

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 提出了一种无人机自主着陆位置姿态的单目视觉测量方法,建立了机载摄像机的运动和投影模型。设计了新型双圆图案着陆平面靶标,采用双圆的 8 个公切点,产生 21 个具有透视投影不变性的特征点,并提出了在复杂背景中全自动双圆特征的图像提取新方法及标记特征点的方案,实验表明,768 × 576 像素大小的图像,特征提取及标记耗时小于 9ms。仿真试验表明,摄像机距离靶标 10m 左右,噪声偏差达到 1.5 像素时,单轴位置 RMS 误差小于 6cm,单轴姿态 RMS 误差小于 0.7°,所提出的算法具有很强的抗噪声能力,能够满足无人机自主着陆位置姿态实时测量的要求。

关键词: 无人机; 位置; 姿态; 特征点; 透视投影

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Abstract: A novel monocular vision method for landing of unmanned aerial vehicle (UAV) to estimate its state relative to a known two-circle planar target is proposed. The motion and projection model of the camera on-board of UAV is established. Twenty-one control points with invariance of perspective projection are generated with eight common tangent points of two coplanar circles onto the designed target. The position and orientation of the camera can be computed with the world coordinates of twenty-one control points and the corresponding image coordinates. The feature extraction of two circles and control points labeling in a 768 × 576 pixel size image with complex background may be completed within 9ms. Simulation test results show that the proposed vision-based state estimations are accurate to within 6cm referred to each axis of translation and 0.7 degrees referred to each axis of rotation when the distance between the camera and the landing pad is about 10m and the Gaussian white noise level is 1.5 pixels. The proposed technique is robust to noise and reliable, and it can meet the demand of the real time measurements of the position and orientation for control of UAV.

Key words: unmanned aerial vehicle; position; orientation; feature point; perspective projection

无人机的进场着陆是无人机航行的最后阶段,也是整个飞行过程中事关安全的关键阶段。导航控制信号的一部分主要来自于无人机相对于着陆目标的绝对位置和方向信息。因此,在着陆阶段精确地估计无人机的位置和姿态,对控制无人机的自主着陆起着重要作用。无人机的位置姿态估计主要由导航系统完成,现有的(导航方法有:全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(INS)、光电导航系统、视觉导航系统以及各种方式的组合导航系统^[1~4])。视觉导航是三维视觉技术的一个重要内容,以计算机视觉为理论基础的视觉导航系统,具有大视场、非接触、速度快、信息丰富以

及精度适中等优点,特别适合于估计无人机相对于着陆目标的位置姿态。基于视觉导航的无人机自主着陆流程如图 1 所示。着陆控制系统根据视觉导航系统获得的导引信息,控制无人机相对于着陆目标的相对运动。作为导航控制环路的控制信号获取传感装置,视觉导航系统能够单独估计无人机的运动状态,也可以作为其他导航系统的

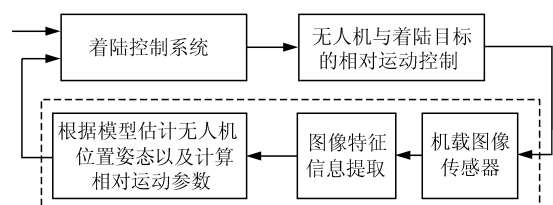


图 1 基于视觉的无人机自主着陆流程

Fig. 1 UAV vision-based landing flowchart

收稿日期:2004-05-13;修订日期:2004-09-20
基金项目:国家杰出青年基金(50125518)资助项目

辅助传感装置,更加精确地估计无人机的运动状态,并作为对其他传感系统的信息补充或者进行误差校正。

基于特征点的视觉导航方法基本原理是,将摄像机装载在无人机上,并在着陆目标平面上预先设置已知的特征点,通过提取特征点对应的图像坐标,根据摄像机的透视投影模型,实时估计出无人机相对于着陆目标的位置姿态。

本文设计一个着陆平面靶标,靶标上设置 2 个黑色圆,以圆的公切点及其衍生交点为特征点,提出一种基于双圆特征的无人机自主着陆位置姿态视觉测量方法。

1 着陆靶标特征图案及特征点的选择

为了实现经过标定过摄像机的位置姿态及相对运动的估计,需要知道特征点的世界坐标及其对应的图像坐标。

对特征图案有 2 个要求,首先要包含足够的信息,使得视觉导航系统可以利用这些提取信息指挥无人机自主着陆所需要的相对位置和姿态信息。其次,特征图案要容易识别,容易区别于其它物体和环境。简单的特征图案使得视觉系统能够以较快的速度处理图像,在工程实际应用中更快的速度不仅易于实现,而且有利于更好更平稳的控制无人机的运动。针对以上要求,为无人直升机自主着陆设计了如图 2 所示双圆靶标。采用带有 2 个黑色共面圆的靶标图案,作为着陆目标,其中 1 个圆的中心为一个白色圆或者其他任意形状的白色斑点,主要用于识别靶标坐标系的原点和 x 轴。

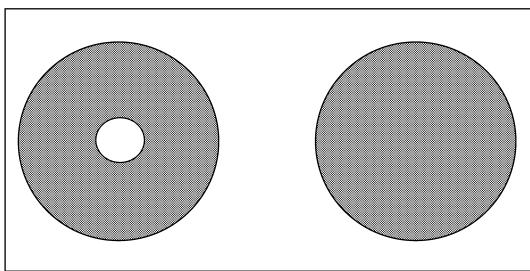


图 2 双圆特征靶标

Fig. 2 Landing planar target with two-circle

圆的透视投影表现为椭圆图像特征,由于透视投影线性畸变的影响,圆的中心不是透视投影不变量,即圆中心点与椭圆图像中心不一致。然而对于任意 2 个共面且不相交的圆或者椭圆,存在 4 条公切线,且公切线具有透视投影不变性^[5]。因此,公切点为透视投影不变量,由任意 2 个公切

点决定的直线及不同直线的交点都具有透视不变性。本文以 2 个圆的 8 个公切点和不同公切点决定的直线的交点为特征点,如图 3 所示,黑色圆点为公切点,圆圈为由公切点衍生的特征点,图中共 21 个已知特征点,还可以产生更多具有透视投影不变性的特征点。世界坐标系定义为:带有小圆的圆心为原点 o_w , x_w 轴水平向右, y_w 轴向下, z_w 由右手法则确定。

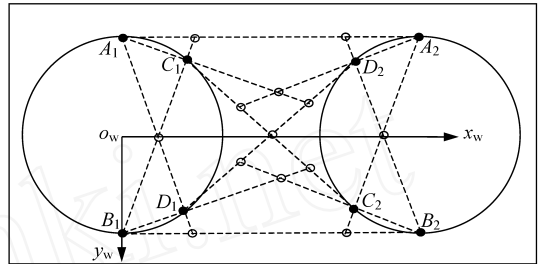


图 3 双圆靶标的世界坐标系定义及特征点

Fig. 3 World coordinate frame and feature points on the two-circle planar target

2 靶标特征点的提取及标记

由图 1 可知,图像特征信息的提取是视觉导航的关键步骤,特征提取的速度、精度和算法的鲁棒性直接决定了导航系统的性能。针对本文所设计的靶标图案,图像处理的基本任务是实时提取摄像机在不同时刻拍摄的靶标图像中的特征点并将其与世界坐标对应。双圆靶标的 21 个特征点的世界坐标,由给定圆的半径和中心可以求出。下面讨论非退化二次曲线(如 2 个圆或者 2 个椭圆)公切线的基本求解算法。

设二次曲线方程为

$$m^T C m = 0 \tag{1}$$

其中: $m = [x \ y \ 1]^T$ 是二次曲线上的任意一点; C 是在相差一个比例因子的意义上定义的 3×3 对称矩阵,因此一个二次曲线方程可以用 5 个独立参数表示。

二次曲线上任意点存在唯一切线,设为 $l = [a \ b \ c]^T$,则切线可以表示为^[6]

$$l \sim C^T m = C m \tag{2}$$

其中: \sim 表示在相差一个比例因子的意义上相等,以下同。由式(1)和式(2),可以得到

$$l^T C^{-1} l = 0 \Rightarrow l^T C^* l = 0 \tag{3}$$

其中: C^* 为由二次曲线的切线轨迹所确定的对偶二次曲线,即二次曲线 C 的切线一定满足二次对偶曲线的方程: $C^{-1} \sim C^*$ 。因此 2 个二次曲线 C_1 和 C_2 的公切线为下列方程组的解

$$\left. \begin{aligned} I^T C^* 1 &= 0 \\ I^T C^* 1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)可以求得双圆靶标的公切线,由公切线与二次曲线的交点获得公切点的世界坐标,由公切点可以求得其他特征点。所有公切点按固定顺序排列。

特征点的图像坐标需要从投影的椭圆中求得,而且图像特征点必须和相应的世界坐标对应。本文提出的双圆特征图像坐标的提取及标记算法主要包括图像阈值化、轮廓跟踪、分割双椭圆及求解参数方程、双椭圆公切点及排序和全部特征点标记等。具体过程如下:

(1)采用自适应阈值化方法^[7]对图像进行阈值化处理,获得二值图像。

(2)在二值图像中,采用8连通方法跟踪轮廓,获得链码表示的轮廓。把像素值为0(或者1)的部分分离出来,将0像素值连接起来组成0连通区域,1像素值连接起来组成1连通区域。

(3)分割着陆靶标上的双椭圆。首先排除断开轮廓,保留封闭连通轮廓; L 为封闭轮廓周长,排除周长小于 T_L (轮廓长度阈值)的轮廓;计算封闭轮廓的密集度 $\phi = 4S/L^2$, S 为面积。考虑到透视投影的特性和图像噪声的影响,实际椭圆的密集度小于1,设置密度级阈值 $T_\phi = 0.7 \sim 1.0$, T_ϕ 从大到小设置。保留密集度大于 T_ϕ 的封闭轮廓。如果保留的封闭轮廓数量小于2,减小 T_ϕ ,重新进行以上过程。

(4)分别将获得的2个封闭轮廓数据,采用最小二乘法拟合成2个椭圆。根据式(4)求2个椭圆的公切点,记为 $p_{u,i}(i=0 \sim 7)$ 。

(5)分别取2个椭圆中心的 9×9 邻域,并计算邻域内的平均灰度值,设灰度值大的邻域对应的椭圆中心为 o_1 ,另一中心为 o_2 ,则 o_1 位于 o_w 的透视投影点的附近, $\vec{o_1 o_2}$ 对应于 $\vec{o_w x_w}$ 的投影。计算 $\vec{o_1 o_2}$ 与图像 x 轴的夹角,设为 α 。将 $o_1 o_2$ 和8个公切点旋转 α ,使得 $o_1 o_2$ 与 x 轴对准,按旋转后的公切点,很容易排定8个公切点的对应顺序,由此也就确定了8个公切点图像坐标与世界坐标的对应关系,利用已知的8对公切点,就可以获得其余13个特征点的对应关系,从而完成了特征点图像坐标的提取以及标记。图4为双圆图像特征提取和标记算法所获得的结果。

3 摄像机运动及投影模型

假定无人机在着陆阶段的运动是相对连续的,

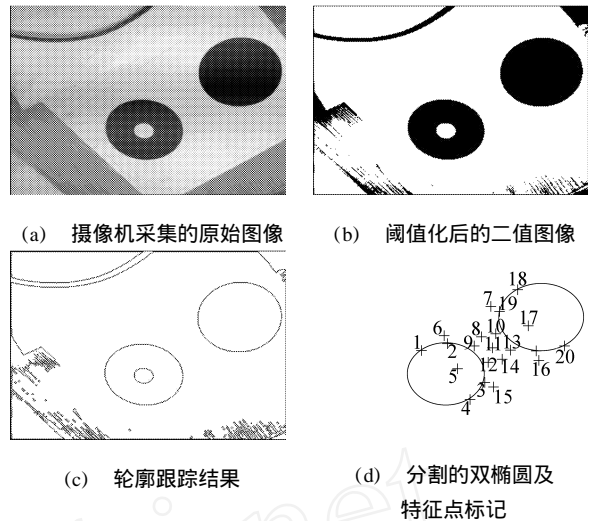


图4 着陆靶标图像特征点的提取

Fig. 4 Feature extraction process for feature points onto the landing target

机载摄像机与着陆平台的基本关系如图5所示。 w 为位于着陆平台上的靶标平面, c 为摄像机的图像平面。 t 时刻的摄像机坐标系为 $o_t x_t y_t z_t$, o_n 为主点(光轴与图像平面的交点),图像坐标系为 $o_u x_u y_u$ 。假定在靶标平面上的三维世界坐标系为 $o_w x_w y_w z_w$ 。定义 $o_t x_t$ $o_u x_u$, $o_t y_t$ $o_u y_u$ 和 $o_t z_t$ $o_w z_w$ 。

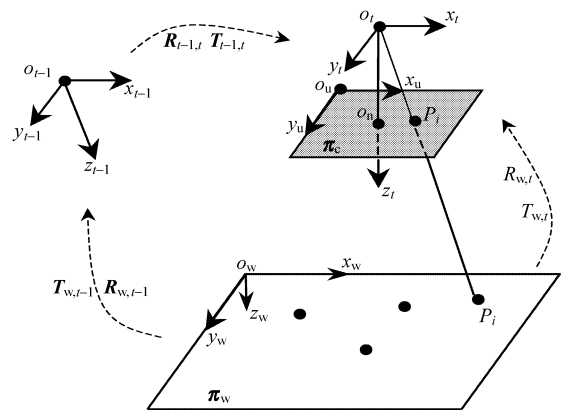


图5 摄像机运动和投影模型

Fig. 5 The Motion and projection mathematical model of the camera on board a UAV

设 w 上任意特征点 P_i 在 c 上的透视投影点为 p_i 。设 P_i 在 $o_w x_w y_w z_w$ 下的齐次坐标为 $\tilde{p}_{w,i} = [x_{w,i} \ y_{w,i} \ z_{w,i} \ 1]^T$,在 $o_t x_t y_t z_t$ 下的齐次坐标为 $\tilde{p}_{t,i} = [x_{t,i} \ y_{t,i} \ z_{t,i} \ 1]^T$,相应的图像齐次坐标为 $\tilde{p}_{u,i} = [x_{u,i} \ y_{u,i} \ 1]^T$ 。则机载摄像机的投影模型可以表示为

$$\tilde{p}_{u,i} = A [R_{w,t} \ T_{w,t}] \tilde{p}_{w,i}, \quad 0 \quad (5)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机内部参数矩阵;

f_x, f_y 为摄像机在 x, y 方向上的有效焦距; u_0, v_0 为摄像机的主点坐标; λ 为任意不为 0 的比例因子; $R_{w,t}$ 为 3×3 单位正交矩阵, 表示世界坐标系到 t 时刻摄像机坐标系之间的旋转; $T_{w,t}$ 为世界坐标系到 t 时刻摄像机坐标系之间的平移。

由于位于靶标平面上的特征点的世界坐标 $z_{w,i} = 0$, 这里仍然采用 $\tilde{p}_{w,i} = [x_{w,i} \quad y_{w,i} \quad 1]^T$ 表示平面上特征点的二维世界坐标, 则由式(1)得到

$$\tilde{p}_{u,i} = H\tilde{p}_{w,i} \quad (6)$$

其中: $H = A [r_1 \quad r_2 \quad T] = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]$; $h_i (i = 1 \sim 3)$ 为 H 的第 i 列, r_i 为矩阵 $R_{w,t}$ 的列向量。 H 矩阵表示了靶标平面和图像平面之间的单应性变换, 由式(6)可知, 需要至少 4 个非共线对应点, 就可以求出带比例因子的 H 矩阵。若摄像机经过标定, 则 A 已知, 由此 $R_{w,t}$ 和 $T_{w,t}$ 为^[8]

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= A^{-1} h_1, r_2 = A^{-1} h_2, r_3 = r_1 \times r_2 \\ T &= A^{-1} h_3 \\ &= 1 / \sqrt{h_1^T h_1} \quad = 1 / \sqrt{h_2^T h_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)计算出的 $R_{w,t}$ 并不满足正交约束, 采用奇异值分解方法将其正交化, 即

$$R_{w,t} = U \text{diag}(1, 1 / UV^T) V^T \quad (8)$$

其中: U, V 为正交矩阵。由式(3)和式(4)求出的 $R_{w,t}, T_{w,t}$, 易受噪声的影响, 为了获得更可靠的结果, 采用图像再投影技术, 由 Levenberg-Marquardt 非线性优化方法求得最优。

根据以上分析可知, 由 4 个以上的靶标平面上的特征点及其对应图像坐标, 就可以估计世界坐标系到时刻摄像机坐标系的三维变换, 即

$$\tilde{p}_{t,i} = \begin{bmatrix} R_{w,t} & T_{w,t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \tilde{p}_{w,i} = M_{w,t} \tilde{p}_{w,i} \quad (9)$$

其中: $M_{w,t} = \begin{bmatrix} R_{w,t} & T_{w,t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$, 则 $(R_{w,t})^T$ 和 $(R_{w,t})^T T_{w,t}$ 表示了 t 时刻摄像机的位置姿态。

同理可得

$$\tilde{p}_{t-1,i} = \begin{bmatrix} R_{w,t-1} & T_{w,t-1} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \tilde{p}_{w,i} = M_{w,t-1} \tilde{p}_{w,i} \quad (10)$$

其中: $M_{w,t-1}$ 表示了 $t-1$ 时刻世界坐标系到摄像机坐标系的变换, 则摄像机坐标系到世界坐标系的变换为

$$\begin{aligned} M_{t-1,w} &= \begin{bmatrix} (R_{w,t-1})^T & - (R_{w,t-1})^T T_{w,t-1} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \\ \tilde{p}_{t,i} &= M_{w,t} M_{t-1,w} \tilde{p}_{t-1,i} = M_{t-1,i} \tilde{p}_{t-1,i} \quad (11) \end{aligned}$$

其中: $M_{t-1,i} = \begin{bmatrix} R_{t-1,i} & T_{t-1,i} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ 表示了 $t-1$ 时刻的

摄像机坐标系到 t 时刻的摄像机坐标系的变换, 即表示了摄像机的相对运动。

由此可知, 如果能够获得至少 4 个靶标平面上的特征点及对应 t 时刻图像坐标, 根据式(6)和(9)就可以估计摄像机在 t 时刻的位置姿态。分别估计出 $t-1$ 时刻和 t 时刻的摄像机位置姿态, 由式(11)就可以估计摄像机的相对运动。如果时间间隔足够小, 就可以根据相对运动, 估计出摄像机的相对角速度和线速度, 即能够获得无人机的运动参数。

4 实验及结论

采用摄像机从不同角度拍摄设计的同一平面靶标, 并利用所提出的图像特征提取及标记算法进行了大量试验, 所采用的摄像机为 WA T-902 H (CCIR) CCD 摄像机、25 mm 镜头, 软件运行在 PIV 2.4 G, 图像大小为 768 \times 576 像素, 单次图像特征提取和标记的平均时间小于 9 ms, 特征点的提取精度能达到亚像素, 且在任意方位都能准确标记点的对应关系。因此, 图像特征点提取算法能够满足无人机自主着陆摄像机位置姿态估计的实时性要求。

采用以下仿真试验验证图像特征点提取算法, 主要步骤为

- (1) 由给定的着陆靶标图案上双圆的基本参数计算 21 个特征点的世界坐标。假定圆的半径为 200 mm, 圆心距为 600 mm。
- (2) 给定摄像机的基本参数: 焦距为 2900 像素 (pixels), 约为 25 mm, 主点坐标取图像中心。图像大小为 768 \times 576 像素。
- (3) 给定摄像机在世界坐标系中的位置和姿态参数。位置为 (200, -200, -1000) cm, 姿态按 ZYX 顺序, 为 (10°, -10°, -10°)。
- (4) 分别在 2 个圆周上取 200 个测试点, 由摄像机投影模型和给定参数, 产生无噪声的测试点的图像坐标。所合成的仿真图像如图 6 所示。

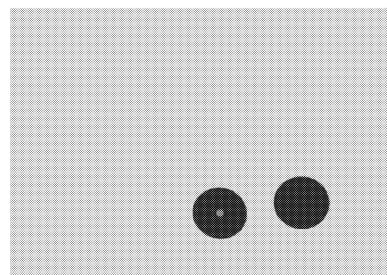


图 6 仿真试验中图像在整幅图像中的比例
Fig. 6 Synthetic image in the simulation test

(5) 随机取 400 个测试点的一种排列顺序,在其图像坐标中加入 0 均值,标准偏差为 $(\sigma = 0 \sim 1.5)$ 的高斯白噪声,并分别由带噪声的测试点分别拟合 2 个椭圆。

(6) 由第(5)步拟合的带噪声的椭圆,求得 21 个特征点的图像坐标,由第 3 节的算法,估计摄像机的位置和姿态。对每一个 σ 的高斯白噪声,分别取 1000 个不同排列顺序进行试验,然后计算 1000 个估计结果的 RMS 误差,结果如图 7 所示。

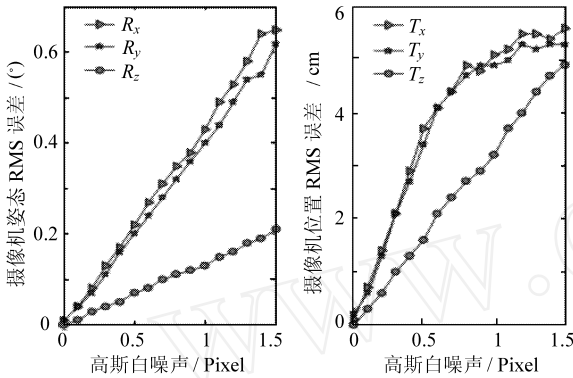


图 7 算法对高斯白噪声的敏感性仿真试验结果

Fig. 7 Simulation results of the position sensitivity and orientation sensitivity with different Gauss noise level.

所提出的算法,测量精度主要取决于 2 个共面圆的拟合精度,而圆的拟合精度又主要由参与拟合的圆周边缘点的图像坐标决定。从仿真试验结果可以看出,当摄像机距离着陆靶标 10 m 左右时,即便圆边缘轮廓的图像坐标受到 1.5 像素的影响,摄像机的位置 RMS 误差小于 6 cm,姿态 RMS 误差小于 0.7°,位置误差结果与文献[3]相当,而姿态误差优于文献[3]所报告的结果。

当摄像机处于仿真试验的位置姿态时,实际上靶标图像在整幅图像中所占比例相当小,如果增大靶标图像的比例,摄像机位置姿态估计精度可以进一步提高,因此在实际应用中,可以采用变焦镜头,使得靶标图像至少能占到整幅图像的 1/2 以上,就可以获得更好的结果。

参考文献

- [1] 王惠南. GPS 导航原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Wang H N. Principles and applications of GPS navigation [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in chinese)
- [2] Conway A R. Autonomous control of an unstable helicopter using carrier phase GPS only [M]. USA: Stanford University, 1995.
- [3] Cory S S, Shakernia O, Shankar S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [A]. Proceedings of 2001 IEEE, International Conference of Robotics and Automation [C]. 2001. 21 - 26.
- [4] Werner S, Fuerst S, Dickanns D, et al. A vision-based multi-sensor machine perception system for autonomous aircraft landing approach [A]. SPIE: Vol. 2736 [C]. 1996. 54 - 63.
- [5] Mateos G G. A camera calibration technique using targets of circular features [A]. Proceedings of V Ibero-American Symposium on Pattern Recognition [C]. Lisbon, Portugal, 2000.
- [6] Pollefeys M. Tutorial on 3D modeling from images [M]. Dublin: ECCV, 2000.
- [7] 章毓晋. 图像分割 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Zhang Y J. Image segment [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in chinese)
- [8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [A]. In: Seventh International Conference on Computer Vision (ICCV99) [C]. Corfu, Greece: 1999. 666 - 673.

作者简介:



张广军(1965 -) 男,天津汉沽人,北京航空航天大学教授,博士,1991年毕业于天津大学测试计量技术及仪器专业,主要从事机器视觉及光电精密测量等方面的研究, E-mail: zgj310@eyou.com。

周富强(1972 -) 男,四川南江人,北京航空航天大学副教授,博士,2000年毕业于天津大学测试计量技术及仪器专业,主要从事机器视觉及光电精密测量等方面的研究, E-mail: fuqiang_zhou@yahoo.com。

(责任编辑:李泓洁)