

基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定

侯俊捷 魏新国 孙军华

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 分析了双目视觉传感器的数学模型,提出了一种基于同心圆合成图像匹配的双目视觉传感器的标定方法。在测量范围内任意多次摆放同心圆靶标,由两台摄像机拍摄靶标图像。根据摄像机模型与已知同心圆在靶标坐标系上的位置关系,构造合成图像,将合成图像与观测图像进行相似度匹配,通过优化定位得到靶标上每个圆的圆心点图像坐标。利用左右图像对应的圆心图像坐标和双目视觉的约束关系,对双目视觉传感器参数进行非线性优化,并得到最优解。所提出的标定方法是在张正友方法的理论基础上,利用了图像的整体性进行的优化。实验结果表明,该方法提高了标定精度。

关键词 机器视觉;双目视觉传感器;标定;同心圆;合成图像

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0315003

Calibration Method for Binocular Vision Based on Matching Synthetic Images of Concentric Circles

Hou Junjie Wei Xinguo Sun Junhua

(Key Laboratory for Precision Optical-Mechanical Technology, the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The mathematical model of a binocular vision sensor is analyzed. A novel calibration method for binocular vision sensor based on matching the synthetic images of concentric circles is proposed. The target of concentric circles is randomly placed in the field of vision sensor for several times and the images of target are acquired by two cameras. The synthetic images are calculated through the model of camera and the known position of concentric circles in the target plane. By matching the synthetic images and observed images, the coordinate of the centre circles in image plane is located with optimization. Then, based on the image coordinate of the concentric circles in two cameras and the constraint of binocular vision, the parameters of binocular vision sensor are optimized by Levenberg-Marquart method. Based on the calibration proposed by Z. Y. Zhang, the whole information of the images is optimized. The experiment shows that the accuracy of calibration is improved.

Key words machine vision; binocular vision sensor; calibration; concentric circle; synthetic image

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

1 引 言

机器视觉目前广泛应用于视觉测量与检测^[1]以及三维重建^[2]等领域,其中双目视觉传感器是其中一种重要的测量工具。双目视觉传感器的标定是双目视觉传感器能否成功应用的关键,主要包括摄像机内部参数和传感器结构参数的标定。一般方法是

采用标准二维或三维精密靶标,通过摄像机的图像坐标与三维世界坐标的对应关系求得这些参数。实际上,在双目立体视觉系统的常规标定方法中,是由标定靶标对两个摄像机同时进行摄像机标定,以分别获得两个摄像机的内、外参数,从而标定出摄像机的内部参数,同时还可以标定出双目立体视觉系统

收稿日期: 2011-09-13; **收到修改稿日期**: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(50905011, 60804060)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0037)资助课题。

作者简介: 侯俊捷(1986—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: houjunj2000@sina.com

导师简介: 魏新国(1977—),男,博士,副教授,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: wxg@buaa.edu.cn

的结构参数^[3]。

摄像机标定一直是一个非常活跃的研究领域,并且在 Tsai^[4]方法后,又进行了大量的继续发展研究工作。在大多数研究中,比如十分普遍的平面棋盘靶标^[5],已经可以利用低成本的硬件系统达到较高的标定精度^[6,7]。上述的传统标定方法中,由于标定精度取决于特征点的提取精度,但在提取过程中,其忽略了特征点与图像整体的关系,因此特征点的提取会存在偏差。对于计算特征点的方法,Heikkila 提出了一种高精度的椭圆适用技术^[8]。这项技术是在图像平面中,将第一顺序椭圆近似值应用于圆形的标定标记,并且将透视的效果加入进去。随后 Heikkila 将这个标记定位技术应用用于摄像机标定^[9],并且用一个二面体作为目标,获得了高质量的测量结果。但是该方法采用的圆形标记信息不够丰富,因此并没有很好地利用图像的整体性。

为了解决特征点定位精度的问题,本文引入了同心圆作为标定靶标,提出了一种基于同心圆合成图像匹配的双目视觉传感器标定方法。该方法从图像的整体性出发,利用同心圆图像的大量边缘信息,根据摄像机模型构造合成图像,然后通过优化匹配合成图像与观测图像的相似度,从而通过定位得到的特征点坐标进行双目视觉传感器的标定。

2 双目视觉传感器模型

双目视觉传感器模型图如图 1 所示。对于两个摄像机的摆放位置不做特别要求,如图 1 所示,设左摄像机 $O\text{-}xyz$ 位于世界坐标系的原点处且无旋转,图像坐标系为 $O_l\text{-}X_lY_l$,有效焦距为 f_x^l, f_y^l ,图像中心坐标为 (u_l, v_l) , u_l 轴与 v_l 轴不垂直因子为 α_l ;右摄像机坐标系为 $O_r\text{-}x_r y_r z_r$,图像坐标系为 $O_r\text{-}X_r Y_r$,有效焦距为 f_x^r, f_y^r ,图像中心坐标为 (u_r, v_r) , u_r 轴与

v_r 轴不垂直因子为 α_r ,则摄像机透视变换模型^[10]为

$$s_l \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^l & \alpha_l & u_l \\ 0 & f_y^l & v_l \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^r & \alpha_r & u_r \\ 0 & f_y^r & v_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

而 $O\text{-}xyz$ 坐标系与 $O\text{-}x_r y_r z_r$ 坐标系之间的位置关系可通过空间转换矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{lr} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{lr} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}],$$

式中 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$, $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$,分别为 $O\text{-}xyz$ 坐标系与 $O\text{-}x_r y_r z_r$ 坐标系之间的旋转变换矩阵和原点之间平移变换向量,即双目视觉系统的结构参数。

于是,空间点三维坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_l m_{31}^l - m_{11}^l & X_l m_{32}^l - m_{12}^l & X_l m_{33}^l - m_{13}^l \\ Y_l m_{31}^l - m_{21}^l & Y_l m_{32}^l - m_{22}^l & Y_l m_{33}^l - m_{23}^l \\ X_r m_{31}^r - m_{11}^r & X_r m_{32}^r - m_{12}^r & X_r m_{33}^r - m_{13}^r \\ Y_r m_{31}^r - m_{21}^r & Y_r m_{32}^r - m_{22}^r & Y_r m_{33}^r - m_{23}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^l - X_l m_{34}^l \\ m_{24}^l - Y_l m_{34}^l \\ m_{14}^r - X_r m_{34}^r \\ m_{24}^r - Y_r m_{34}^r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

(4) 式包含 x, y, z 三个变量的四个线性方程,其中 $\mathbf{M}_l = A_l[I \quad 0]$, $\mathbf{M}_r = A_r[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$,只需要求解其中的三个就可以得到 (x, y, z) 。为消除数据噪声的影响,可以使用最小二乘法求解该线性方程组重建出 P 点的空间三维坐标。

3 标定原理

3.1 初值估计

采用共面同心圆靶标如图 2 所示,其中包括 N^2 个同心圆,它们呈 $N \times N$ 矩阵分布。分别将左右两个摄像机拍摄的图像中每个同心圆所在区域提取出来,利用边缘检测的方法,得到该区域中的同心圆边缘信息,然后通过灰度权重的方法,计算得到每个同心圆圆心图像坐标的初值。

已知在靶标坐标系下圆心的局部二维世界坐

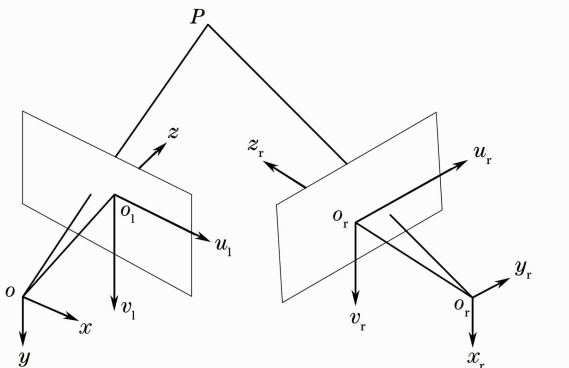


图 1 双目视觉传感器模型

Fig. 1 Measurement model of stereo vision sensor

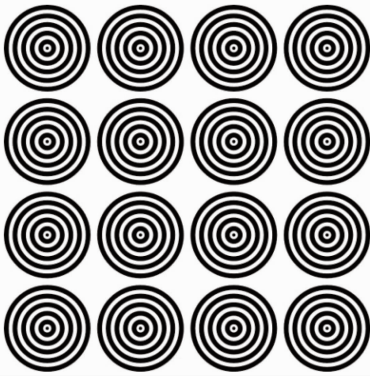


图2 该方法采用的同心圆靶标
Fig. 2 Target of concentric circles

标,可以求得这些圆心在图像坐标系下的坐标初值,利用的公式为

$$s\tilde{m} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{M}}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{H} = \mathbf{A}(r_1 \ r_2 \ T) = (h_1 \ h_2 \ h_3)$, \tilde{m} 为圆心点在图像坐标下初值的齐次坐标, $\tilde{\mathbf{M}}$ 为已知的靶标坐标系下圆心的局部二维世界坐标的齐次坐标。

\mathbf{H} 矩阵的自由度为 8,至少需要 4 个非共线对应点,由(5)式可以求出带比例因子的 \mathbf{H} 矩阵。由

线性方法求得的 \mathbf{H} 矩阵容易受到噪声的干扰,通过建立目标函数,对 \mathbf{H} 矩阵进行优化,可以得到最优解。目标函数为

$$\sum_{j=1}^m \|\tilde{m}_j - m(\mathbf{H}, \tilde{\mathbf{M}}_j)\|^2. \quad (6)$$

该优化问题可通过非线性优化算法进行求解。计算出 \mathbf{H} 矩阵后,再通过对多幅图像 \mathbf{H} 矩阵进行分解,就可以分别得到左右摄像机内部参数初值,以及对于各个靶标的外部参数初值。

3.2 合成图像与观测图像的相似度匹配

通过摄像机模型可以计算得到合成图像,将其与实际拍摄得到的观测图像进行相似度匹配,构造优化目标函数。

3.2.1 计算合成图像

根据摄像机内部参数和外部参数的初值,利用射线跟踪建立图像坐标系中的靶标图像。图像传感器中每一个像素点都是通过四个角点向外发出的射线,在靶标上获取亮度信息构成一个像素。然后利用摄像机模型,将靶标中的同心圆亮度信息反投影到图像坐标系中,其中每个像素均是由黑色和白色区域组成,如图 3 所示。

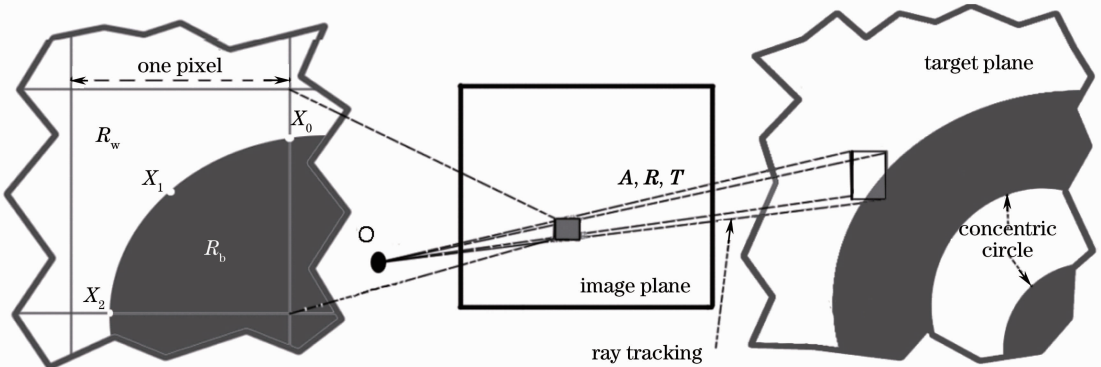


图3 射线跟踪的反投影模型

Fig. 3 Back-projection model of ray tracing

同时,假设在像素级上靶标平面的亮度是标准的,那么定义 R_w 为在图像像素中的白色区域, R_b 为黑色区域,一个像素的模型强度是 $I_m(\varphi)$,白色区域 R_w 与整个区域 $R_w + R_b$ 的比例:

$$I_m(\varphi) = K \frac{R_w}{R_w + R_b}, \quad (7)$$

式中 K 为比例系数,当拍摄得到的图像是 8 位时, $K=255$ 。通过上述过程,就可以根据摄像机模型参数的初值,计算得到靶标的图像。真实拍摄得到的图像称为观测图像,计算得到的图像称为合成图像^[11]。

3.2.2 相似度匹配

合成图像是根据摄像机模型计算得到的图像,它是靶标在图像平面上的投影,而观测图像则是拍摄得到的投影图像,因此二者具有很高的相似性。当摄像机模型的内部参数与外部参数达到最优时,两幅图像间的相似度达到最高时。

使用相关系数^[12]来评价合成图像与观测图像之间的相似度,相似度匹配的相关函数公式为

$$C = \frac{\sum_{\varphi \in u} [I_o(\varphi) - \bar{I}_o][I_m(\varphi) - \bar{I}_m]}{\sqrt{\sum_{\varphi \in u} [I_o(\varphi) - \bar{I}_o]^2} \sqrt{\sum_{\varphi \in u} [I_m(\varphi) - \bar{I}_m]^2}}, \quad (8)$$

式中 u 为被检测标记点的所在区域; I_o 为观测图像, I_m 为合成图像; \bar{I}_o 和 \bar{I}_m 分别为观测图像与合成图像的像素平均值; C 的取值范围为 $(-1 \sim 1)$, 当 C 为正数时代表正相关, 负数时代表负相关, C 的绝对值越大, 代表两幅图像相似度越高。由于合成图像与观测图像属于正相关区域, 因此, 通过优化调整摄像机参数可以改变合成图像, 使得匹配得到的相关系数趋近于 1, 从而使合成图像与观测图像相似度达到更高, 定位得到的圆心点图像坐标更为准确。

3.3 双目视觉系统的优化

根据已计算得到的左右两个摄像机对于同一位置靶标的内外参数初值, 可以求得该双目视觉系统的结构参数。两摄像机的转换关系, 即为双目视觉系统的结构参数为^[13,14]

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_r \mathbf{R}_l^{-1}, \quad \mathbf{T} = \mathbf{T}_r - \mathbf{R}_r \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_l, \quad (9)$$

式中 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{T}_r 分别表示右摄像机与靶标坐标系的相对位置, \mathbf{R}_l 、 \mathbf{T}_l 分别表示左摄像机与同一靶标坐标系的相对位置, \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 为双目视觉系统的结构参数。

利用上述的通过匹配合成图像与观测图像来定位同心圆中圆心点图像坐标的算法, 构造双目匹配的优化目标函数:

$$g_1 = 2 - C_l - C_r. \quad (10)$$

由于噪声等因素的影响, 空间点在图像平面的投影存在误差, 因此重建出来的特征点的空间三维坐标也存在误差。根据双目视觉系统的数学模型中(4)式, 可以求出相邻圆心点之间的距离 d_i , 通过与已知靶标圆心点的实际距离 D 比较, 得到目标函数

$$g_2 = |D - d_i|. \quad (11)$$

如果投影矩阵的估计存在偏差, 由投影矩阵计算得到的基本矩阵 F 将无法满极限约束条件^[5], 因此有

$$g_3 = \mathbf{p}_r^T \mathbf{A}_r^{-T} \mathbf{S} \mathbf{R} \mathbf{A}_l^{-1} \mathbf{p}_l, \quad (12)$$



式中 \mathbf{S} 为反对称矩阵, 它由平移矢量定义为

$$\mathbf{S} = [t]_x = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix}.$$

根据(10)~(13)式, 建立最终的优化目标函数:

$$f(x) = \min \left| \rho_1 \sum [g_1(x)]^2 + \rho_2 \sum [g_2(x)]^2 + \rho_3 \sum [g_3(x)]^2 \right|, \quad (13)$$

式中 $x = A_l, A_r, r_x, r_y, r_z, T_x, T_y, T_z$; \mathbf{r} 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的旋转向量表示形式, A_l, A_r 分别为左右摄像机的内部参数; ρ_1, ρ_2 和 ρ_3 为权重系数, 一般可以取 $\rho_1 = 1, \rho_2 = 10, \rho_3 = 0.1$; $\mathbf{p}_l = [X_l, Y_l, 1]^T$ 和 $\mathbf{p}_r = [X_r, Y_r, 1]^T$ 分别为经过合成图像与观测图像的相似度匹配后, 计算得到的空间圆心点 P 在左右摄像机图像平面上的定位图像坐标。利用 Levenberg-Marquart 优化方法^[15], 对双目视觉系统的结构参数以及两个摄像机的内部参数进行优化, 得到最终的双目视觉系统的模型参数。

4 实验结果

实验中使用 1280 pixel \times 1024 pixel 的相机和焦距为 12 mm 的镜头, 根据已知的双目测量系统精度分析^[5], 合理摆放两摄像机, 降低系统结构对视觉测量精度的影响。根据该系统结构设计靶标, 使得靶标尽量占满整个视场范围, 并且保证边缘信息的质量。因此设计由 16 个位置已知的同心圆构成靶标, 相邻圆心距为 65 mm, 一个同心圆由 5 组黑白相间的圆环组成, 每个圆环环带半径差值为 3 mm, 圆心点为半径 0.5 mm 的黑色圆点, 靶标如图 2 所示。

图 4 为左右摄像机分别拍摄同一位置靶标的图像, 图 5 为计算得到的合成图像。



图 4 两台摄像机拍摄同一位置靶标的图像。(a)左摄像机拍摄图像;(b)右摄像机拍摄图像

Fig. 4 Images of target at the same position acquired by two cameras. (a) Image acquired by the left camera; (b) image acquired by the right camera



图5 计算得到的合成图像

Fig. 5 Synthetic image obtained by calculation

提取每个同心圆,边缘检测后,计算得到每个同心圆的圆心点初始图像坐标,然后利用已知圆心距,求解 H 矩阵后得到摄像机内部参数和外部参数的初值。再将合成图像(如图5)与观测图像相似度匹配的方法作为目标函数之一,与双目视觉系统的距离约束和极线约束一起构成总的优化目标函数[(13)式],经过优化之后得到的双目视觉系统的参数

$$A_l = \begin{bmatrix} 2952.133158 & -3.467324 & 642.668944 \\ 0 & 2917.131513 & 530.058732 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 2882.764855 & -8.321068 & 635.156958 \\ 0 & 2859.801597 & 526.910409 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.853675 & -0.005908 & 0.520771 \\ 0.002962 & 0.999974 & 0.006489 \\ -0.520796 & -0.003997 & 0.853671 \end{bmatrix},$$

$$T = \begin{bmatrix} -398.20635 \\ 2.756582 \\ 110.709406 \end{bmatrix}.$$

根据拍摄得到的相同图像,利用提取得到的圆心点,通过张正友提出的基于平面靶标的方法分别对同一双目系统的左右摄像机进行标定,之后根据(9)式计算其结构参数。上述方法称为方法一,本论文提出的方法称为方法二。根据这两种方法得到的双目视觉标定参数,计算加工精度为 $5 \mu\text{m}$ 的棋盘靶标的角点坐标,并根据这些角点计算棋盘方格中的36段边长,每个方格的实际边长为 9 mm ,然后分别计算两种测量方法的均方差(RMS),本方法的RMS为 0.02 mm ,张正友方法的RMS为 0.10 mm ,图6为两种方法的测量结果。

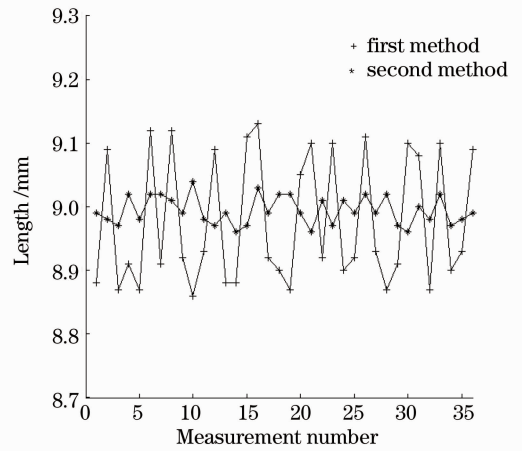


图6 两种方法的测量结果

Fig. 6 Measured results by two methods

5 结 论

提出了一种基于同心圆合成图像匹配的双目视觉传感器参数的标定方法。利用摄像机的数学模型以及靶标上同心圆之间的位置关系构造合成图像,将合成图像与观测图像进行相似度匹配,通过优化可以定位得到每个圆心的图像坐标。将该匹配方法作为目标函数之一,与双目视觉系统的距离约束和极线约束一起构成总的优化目标函数,然后采用非线性优化计算得到双目视觉系统参数的最优解。该方法的优点在于,其利用图像的整体信息来定位特征点,并以此构造目标函数来优化双目视觉系统参数,与已有的经典方法比较,提高了定位精度。实验结果表明,该方法在张正友提出的标定方法理论上,提高了标定精度,均方根误差为 0.02 mm 。

参 考 文 献

- Xiang Shoubing, Su Guangda, Chen Jiansheng *et al.*. Brick stack anomaly detection and recognition based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0715002
向守兵, 苏光大, 陈健生等. 基于机器视觉的码坯异常检测与识别[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0715002
- Lin Hongbin, Liu Bin, Zhang Yucun. Three-dimensional reconstruction method of large axisymmetric forge workpieces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0715001
林洪彬, 刘彬, 张玉存. 大型回转类工件的三维重建方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0715001
- Zhang Qiong, Wang Zhiliang, Chi Jiannan *et al.*. Calibration for gaze tracking system based on stereo cameras and plane mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415002
张琼, 王志良, 迟健男等. 基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0415002
- R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344

- 5 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 6 Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1297~1303
朱 嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1297~1303
- 7 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 8 J. Heikkila. Moment and curvature preserving technique for accurate ellipse boundary detection [C]. Proc. 14th Int'l Conf. Pattern Recognition, 1998, 734~737
- 9 J. Heikkila. Geometric camera calibration using circular control points [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(10): 1066~1077
- 10 Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005
张广军. *机器视觉* [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 11 Damien Douchamps, Kunihiro Chihara. High-accuracy and robust localization of large control markers for geometric camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, **31**(2): 376~383
- 12 Li Zhou, Qiu Huijuan. Fast image matching based on correlation coefficient [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(11): 998~1000
李 卓, 邱慧娟. 基于相关系数的快速图像匹配研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(11): 998~1000
- 13 R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge Univ. Press, 2003
- 14 Zhou Fuqiang, Zhu Jigui, Yang Xueyou. A field calibration technique for binocular vision sensor [J]. *Chin. J. Scient. Instrum.*, 2000, **21**(2): 142~145
周富强, 郝继贵, 杨学友. 双目视觉传感器的现场标定技术 [J]. *仪器仪表学报*, 2000, **21**(2): 142~145
- 15 M. Galassi, J. Davies, J. Theiler *et al.*. *GNU Scientific Library Reference Manua* [M]. Second ed., Bristol: Network Theory Ltd., 2006

栏目编辑: 李文喆