

文章编号 1004-924X(2015)增-0696-07

利用编码标志实现相机自动标定

曾 峦*, 翟 优, 熊 伟

(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

摘要:针对三维立体标定靶标存在制作困难、成本较高,标定控制点的提取和识别需要人工干预等弱点,设计了一种以编码标志为控制点的双平面立体靶标,并将其用于相机的标定,以提高相机标定的自动化程度。该靶标将两个标定平面平行放置,相机能够同时以较小的视点观测,透视畸变小;通过编码标志能够实现标定靶标的自动识别,无需人工干预。实验结果表明:在光照条件和观测视角存在较大差异的情况下,能够实现标定靶标的可靠、正确识别,将该标定靶标用于立体相机的标定,重投影误差小于 0.075 pixel,三坐标测量误差小于 1 mm。该靶标减少了标定过程的复杂程度,具有一定的工程应用价值。

关键词:标定靶标;编码标志;相机标定;视觉测量

中图分类号:V447.3;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0696

Automatic camera calibration based on coded marker

ZENG Luan*, ZHAI You, XIONG Wei

(Equipment Academy of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

* Corresponding author, E-mail: zengluan@sina.com

Abstract: 3D calibration targets have higher cost and are difficult to be fabricated. When they are calibrated, the control points for calibration should be extracted by manual intervention. Therefore, this paper designs a calibration stereo target with two parallel calibration planes by taking coded markers as the control points. The calibration stereo target is applied to camera calibration to improve its automation level. The two calibration planes of the new calibration target are placed by a parallel mode, so that the camera observes the two calibration planes with small viewpoint change and the perspective distortions can be reduced. Each control point is constituted by a circular coded marker, which is utilized to realize automatic recognition without manual intervention. Experiment results show that the calibration target can be correctly recognized under a large illumination and viewpoint change. When it is applied to stereo camera calibration, the mean re-projection errors of both cameras are less than 0.075 pixels and the position measurement error is less than 1 mm. The calibration target reduces the complexity of the calibration and is suitable for the engineering applications.

Key words: calibration target; coded marker; camera calibration; vision measurement

收稿日期:2015-06-05;修订日期:2015-06-21.

基金项目:“核高基”科技重大专项资助项目(No. 2013ZX01045-004-002)

1 引言

目前,计算机视觉测量技术已广泛应用于工业、农业、医学、航空航天等多个领域^[1]。相机标定是实现视觉测量的关键环节,其标定精度将直接影响视觉测量精度。相机标定方法通常分为基于标定靶标的方法^[2-3]、自标定方法^[4-6]以及基于主动视觉的方法^[6-7],其中,基于标定靶标的方法精度较高,在视觉测量领域应用非常广泛。常用的标定靶标主要有三维立体靶标^[8-9]和二维平面靶标^[10-11]。二维平面靶标易于制作,标定精度适中,但它只能对相机内部参数或多相机系统中不同相机之间的相对位置和姿态进行标定,无法获得相机相对于参考坐标系的位置和姿态,应用范围有限。三维立体标定靶标不仅能够标定相机的内部参数、多相机系统中不同相机之间的相对位置和姿态,还能够标定相机相对于参考坐标系的位置和姿态,应用范围较广。但三维立体标定靶标通常存在制作困难、成本较高、标定控制点提取和识别需要人工干预等弱点,增大了标定过程的复杂程度。为此,本文提出了一种基于编码标志的由两个平行平面构成的立体标定靶标,用于提升相机标定的自动化程度。

2 立体标定靶标的设计

基于靶标的相机标定对靶标上标志点位置精度的依赖性比较强,因此,当测量距离比较远时,直接加工大型、高精度的三维靶标比较困难,且费用也非常高。为了降低加工难度和制作成本,参考二维平面靶标的设计理念,提出了一种由双平面构成的三维标定靶标,如图 1 所示。标定靶标由 3 个区域构成,其中区域 1 和区域 3 位于同一个平面上,区域 2 平面与区域 1 平面平行,向前突出,两平面之间距离为 50 mm,如图 1(b)所示。制作时分两个平面分别加工,然后用机械接口安装在一起。为了保证靶标上每个标志点的位置精度,靶标安装完成后,用三坐标测量仪对每个标志点的中心位置进行精密测量,得到准确的三维坐标。

这种设计方式主要有三个方面的优点,一是平面加工比立体加工更容易实现,而两个平面分

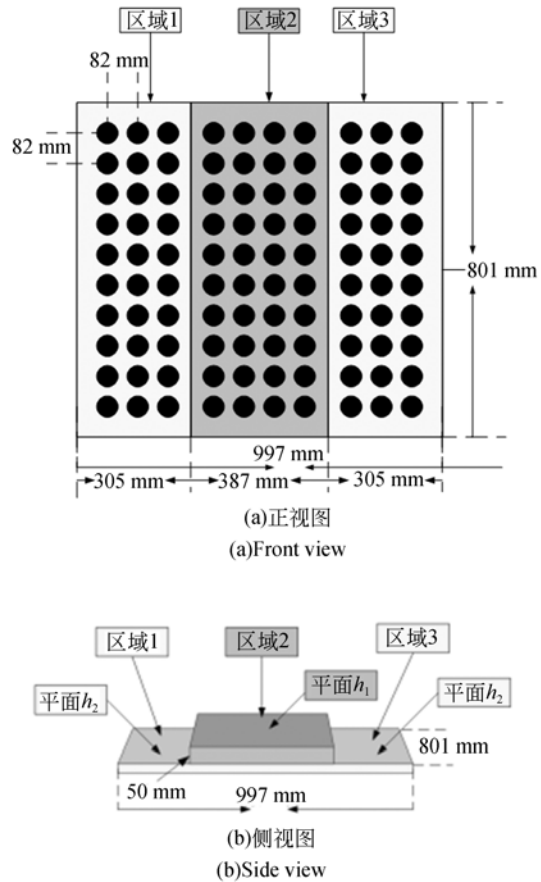


图 1 标定靶标示意图
Fig. 1 Sketch of the calibration target

别加工则进一步降低了难度;二是标志点安放在平面上,两个相机对它同时成像时,透视畸变较小,能够提高标定控制点提取的精度;三是区域 2 整个平面向前突出的距离较小,减少了视线遮挡范围,只要适当拉开区域 1(区域 3)与区域 2 的距离,即使两个相机有较大的交角,区域 2 也不会遮挡区域 1(区域 3)上的标志点。

标志点采用了圆形结构,与栅格角点相比,其

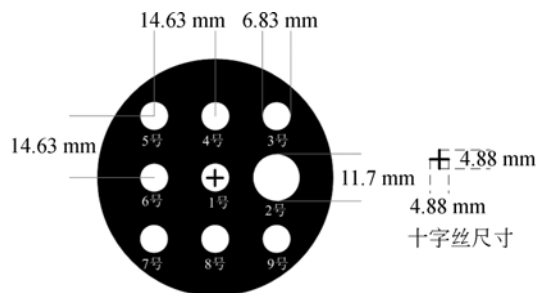


图 2 圆形编码标志
Fig. 2 Circular coded marker

图像坐标的提取精度更高。每个标志点内部又设计了不同的编码,便于快速识别,提高立体靶标识别的自动化程度。标志点及其编码方式如图 2 所示,每个标志点内部设置 9 个编码圆,包括 2 个参考位 1~2 号,7 个编码位 3~9 号。编码位 1 用于确定整个编码标志的位置,恒为 1,其为编码的首位,在 1 号编码圆中心处有“十字”刻线,用于对标定控制点三维坐标的精确测量,并用于评定圆形控制点图像坐标的提取精度。2 号编码圆是定向标志,恒为 1,其为编码的第二位。其余 7 位为实际编码,白色圆存在,则编码为 1,否则编码为 0,图 2 所示为编码 111111111 的状态,这样可以形成 128 个识别码。因图 1(a)所示的三维标定靶标共有 90 个标志点,该编码方式能够对所有标志点进行编码。

标定靶标的主要技术指标如表 1 所示,标定靶标的实物如图 3 所示。

表 1 标定靶标主要技术指标

Tab. 1 Qualifications of calibration target

技术指标	量值
位置精度/ μm	50(“十”字中心距)
平面度/ μm	10
线条直线度/ μm	15
线条垂直度	$90^\circ \pm 30''$
工作温度/ $^\circ\text{C}$	20 ± 5

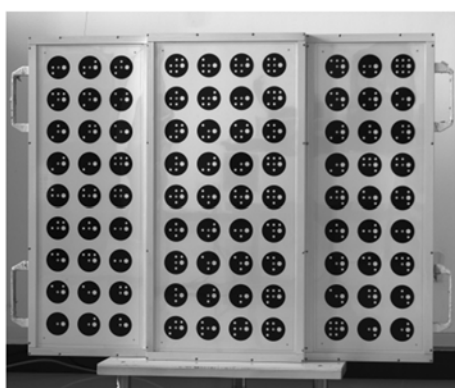


图 3 标定靶标实物图

Fig. 3 Real calibration target

3 编码标志的自动识别

以图 3 所示标定靶标图像为对象,设计了标

志点自动识别的算法流程,具体如下:

第一步,读取如图 3 所示的标定靶标图像。

第二步,进行 Canny 边缘检测。Canny 边缘检测中敏感度阈值设置为 $[0.1, 0.2]$,Canny 边缘检测的结果如图 4 所示,图中进行了局部放大。

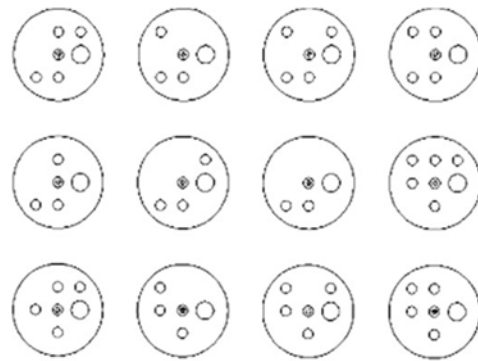


图 4 边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection results

第三步,进行边缘连接。从边缘检测结果中可以看出,标志点和识别位的圆形边缘基本能够检测出来,但是会出现边缘断裂现象,为了方便后续处理,需要进行边缘连接,即把标志点的边缘连接成完整的曲线,边缘连接的局部结果如图 5 所示。

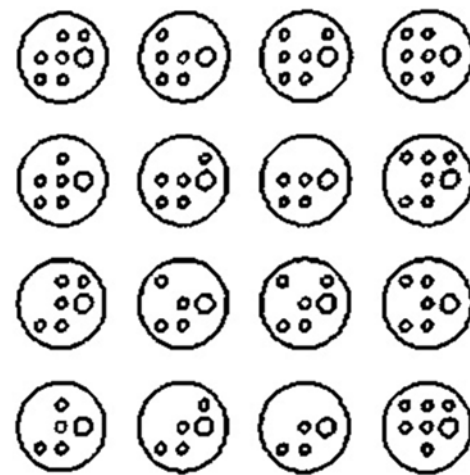


图 5 边缘连接结果

Fig. 5 Edge linking results

第四,进行椭圆拟合。根据边缘连接的结果,采用最小二乘法进行椭圆拟合^[12],在二维欧氏空间中二次曲线的表达式如公式(1)所示:

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0. \quad (1)$$

标定时由于视点的限制,圆形经过透视成像

后为近似椭圆,而不可能是抛物线和双曲线。故 $a \neq 0$,不妨设 $a=1$,用参数 a 将其余参数进行归一化。通过最小二乘法求出椭圆参数后,可以利用公式(2)~(5)求取椭圆的质心、长半轴、短半轴以及椭圆长半轴与 x 轴的夹角,其中 a_1 如公式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} be - cd \\ c - b^2 \\ bd - ae \\ c - b^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$r_a = \frac{1}{\sqrt{0.5 a_1 (1 + c - \sqrt{4b^2 + (1 - c)^2})}}, \quad (3)$$

$$r_b = \frac{1}{\sqrt{0.5 a_1 (1 + c + \sqrt{4b^2 + (1 - c)^2})}}, \quad (4)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2ba_1}{a_1 - ca_1} = \frac{2b}{1 - c}, \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{x_0^2 + 2bx_0y_0 + cy_0^2 - f}. \quad (6)$$

第五,剔除虚假椭圆。由于标定过程中两个相机的视线基本平行,标定控制点边缘曲线为近圆椭圆,长半轴与短半轴之比大于 1,小于 3。因此,为了避免虚假椭圆的干扰,把长半轴与短半轴之比大于 3 的椭圆剔除,结果如图 6 所示。从图中可以看出,经过虚假椭圆剔除后,仍有部分不属于标志点的椭圆存在,需要作进一步处理。

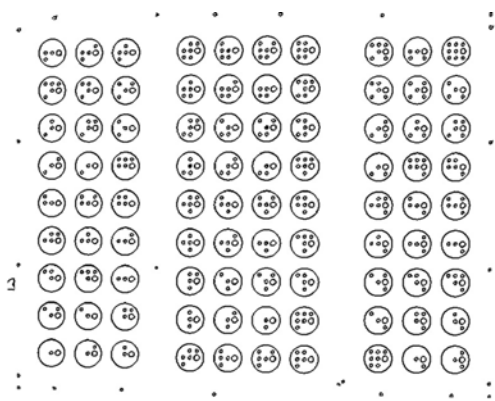


图 6 剔除虚假椭圆后的结果

Fig. 6 Eliminating false ellipse

第六,进行编码标志识别。图 7 说明了区域椭圆、位置椭圆、方位椭圆以及编码椭圆的区别。区域椭圆长半轴最大,其次是方位椭圆、位置椭圆和编码椭圆,位置椭圆质心与区域椭圆质心距离最小,二者几乎重合,3~9 号椭圆以位置椭圆至

方位椭圆连线为起始,按照逆时针顺序分布在位置椭圆四周,利用这些特性可以进行编码标志的识别。

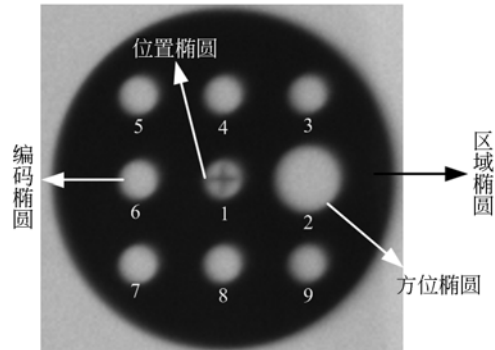


图 7 区域、位置、方位以及编码椭圆

Fig. 7 Ellipses of region, position, orientation and coding

区域椭圆的作用在于确定每个编码标志的范围,位置椭圆的作用在于给出标定控制点的精确图像坐标,二者质心虽然几何重合,但是位置椭圆较小,透视畸变也小,因此,采用位置椭圆质心坐标标定控制点的图像坐标。

区域椭圆的长半轴最大,对所有椭圆长半轴进行降序排序后,取排序在前 45~60 椭圆(共有 90 个区域椭圆),以其半长轴的均值作为区域椭圆长半轴的参考值,取与该参考值相差小于 10 个像素的椭圆作为候选区域椭圆。如果候选区域椭圆的数目大于 90,那么,取差值最小的前 90 个椭圆作为区域椭圆;否则将全部候选区域椭圆作为区域椭圆。

区域椭圆确定后,用其他椭圆质心与区域椭圆质心的距离是否小于区域椭圆的短半轴,来确定区域椭圆的内含椭圆,剔除图 6 所示的不属于标志点的椭圆。随后,使用同一区域椭圆内方位椭圆的长半轴最大的条件,确定方位椭圆;使用在同一区域椭圆内,椭圆质心与区域椭圆质心的距离最小为条件,确定位置椭圆,这里要求该距离小于 5 个像素,否则舍弃该区域参考椭圆及其内部的所有椭圆。

根据与位置椭圆至方位椭圆连线以及位置椭圆至待识别椭圆连线的夹角 θ 确定其余编码椭圆。如果 $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$,则为 3 号椭圆;如果 $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$,则为 4 号椭圆;如果 $130^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$,则为 5 号椭圆;如果 $175^\circ \leq \theta \leq 185^\circ$,则为 6 号椭圆;如

果 $220^\circ \leq \theta \leq 230^\circ$, 则为 7 号椭圆; 如果 $265^\circ \leq \theta \leq 275^\circ$, 则为 8 号椭圆; 如果 $310^\circ \leq \theta \leq 320^\circ$, 则为 9 号椭圆。

至此, 完成所有编码标志的识别, 通过与先验数据的对比, 即可确定每个编码标志所对应控制点三维坐标, 形成标定控制点二维图像坐标和三维坐标的对应关系。

第七, 识别结果迭代求精。在识别过程中, 由于视角、光照条件的差异等有可能产生错误匹配。因此, 在实际使用时, 先进行识别学习, 作为先验数据储存起来。然后将通过步骤 1~6 获取的初始识别结果与先验数据进行对比, 并采用 RANSAC 算法对识别结果进行迭代求精。

首先, 计算初始识别控制点与先验控制点图像坐标的二维变换单应矩阵, 其变换关系如公式 (7) 所示, 这是包含 8 个未知参数的非线性方程, 通过直接线性变换法求解初值^[13]。

$$u_2 = \frac{m_1 u_1 + m_2 v_1 + m_3}{m_7 u_1 + m_8 v_1 + 1}, v_2 = \frac{m_4 u_1 + m_5 v_1 + m_6}{m_7 u_1 + m_8 v_1 + 1} \quad (7)$$

然后, 使用 RANSAC 算法迭代求精。RANSAC 算法需要预先确定随机采样的次数、误差容忍度和一致集的大小。随机采样的次数可以通过公式 (8) 计算, 其中 P_1 表示随机取一个点是内点的概率即识别的正确性, 经过第六步之后, 识别的正确性一般在 90% 以上, 取保守值为 0.5, s 表示一次随机取样的点数, 取为 4, N 为随机取样的数目, P 为一次取样 4 个点均为内点的概率, 取为 99%; 通过公式 (8) 计算得到随机取样次数 $N = 72$ 次。

$$(1 - P_1)^N = 1 - P \quad (8)$$

最后, 通过公式 (7) 将初始识别控制点的图像坐标进行变换, 将变换后的结果与先验数据比较, 如果二者的误差小于 3 pixel (经验值), 则认为识别是正确的, 保留下来; 否则认为是错误的, 剔除, 对识别结果进一步求精。

4 实 验

为了验证对标志图案的识别率和识别精度, 进行了立体标定靶标识别实验和双目相机标定实验, 使用美国 IMPERX 公司的 BOBCAT ICL-B2520M 黑白 2/3 寸 CCD 相机, 镜头焦距 $f =$

30 mm, 视场角 $2\omega = 21^\circ$, 相对孔径为 1/2.8。

在立体标定靶标识别实验中, 对图 8 所示的 4 幅不同视角、光照条件的图像中的标志点进行识别。利用上述识别算法处理后, 每幅图像中的 90 个控制点均正确识别, 实现了 100% 的正确识别率, 这表明上述自动识别算法是可行的, 具有工程应用价值。

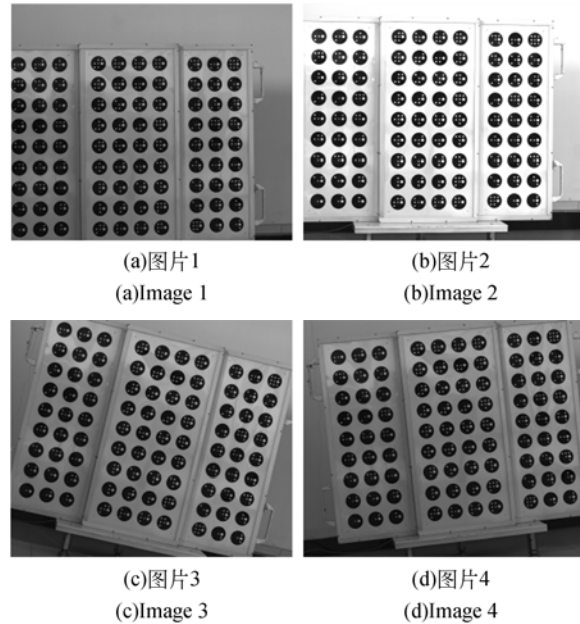


图 8 实验图片

Fig. 8 Testing images

在立体标定实验, 将立体标定靶标放置于双目相机正前方约 4 m 处, 左侧相机和右侧相机分别成像, 立体像对如图 9 所示, 实验中利用了改进的 Faugeras 相机标定方法^[14], 考虑了一阶径向畸变, 包括 4 步:

- (1) 通过 Faugeras 方法求解线性参数;
- (2) 利用最小二乘法获取畸变参数初值;

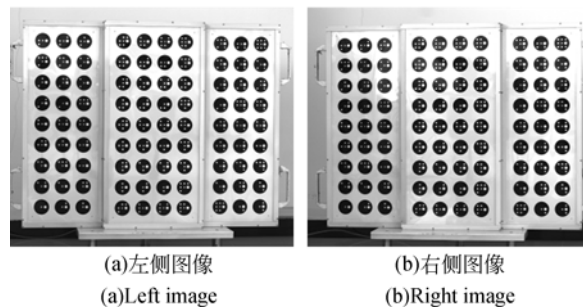


图 9 立体像对

Fig. 9 Stereo images

(3)利用 LM 算法进行畸变参数优化;

(4)利用 LM 算法进行整体寻优。

根据标定结果,分别对左侧相机和右侧相机进行重投影,重投影误差如表 2 所示,两侧相机的重投影误差均小于 0.075 pixel。

表 2 重投影误差

Tab. 2 Reprojection error (pixel)		
重投影误差	左侧相机	右侧相机
Mean	0.070 328	0.057 081
std	0.044 458	0.034 768

利用立体标定结果对 90 个标定控制点进行双目测量,实验结果如图 10 所示。由图 10 可知, x 方向误差小于 0.2 mm, y 方向误差小于 0.4 mm, z 方向误差小于 0.8 mm,位置误差均值约为 0.886 333 mm,标准差为 0.859 553 mm。实验结果表明,用本文所设计的立体标定靶标能得到较高的标定精度,在相机基线为 1 m,工作距离约为 4 m 时,位置误差小于 0.9 mm,达到了约 1/4 500 的标定面测量精度。

参考文献:

- [1] 郝继贵,于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
ZHU J G, YU ZH J. *The Principle of Vision Metrology*[M]. Beijing: China machine press, 2012. (in Chinese)
- [2] 李中伟,王从军,史玉升. 3D 测量系统中的高精度摄像机标定算法[J]. 光电工程, 2008, 35(4): 58-63.
LI ZH W, WANG C J, SHI Y SH. High precision camera calibration algorithm for 3D measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 58-63. (in Chinese)
- [3] ZHOU F, WNAG Y, CUI Y, *et al.*. Camera calibration approach using circle-square-combined target [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 1-4.
- [4] HUI B, WEN G, ZHANG X, *et al.*. Accurate geometric camera calibration technique using multi-views of a non-metric planar grid [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51: 432-439.

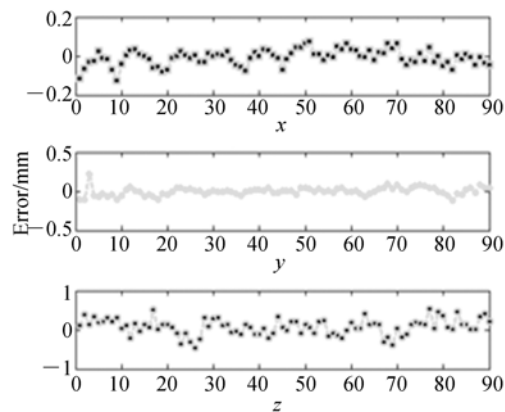


图 10 三维测量误差

Fig. 10 Three dimensional measurement errors

5 结 论

利用圆形编码标志作为标定控制点,本文提出了一种立体标定靶标设计方案,并给出了标定靶标的自动识别算法。该算法能够实现对标定控制点的自动、可靠识别,减轻了因观测视角差异所导致的立体标定靶标不同标定平面透视畸变较大的问题,具有一定的工程应用价值。

- [5] WANG R Y, JIANG G, QUAN L, *et al.*. Camera calibration using lengths of corresponding line segments [C]. *In Proceedings of Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, 2010: 162-167.
- [6] WONG K Y K, ZHANG G Q, LIANG CH, *et al.*. 1D camera geometry and its application to the self-calibration of circular motion sequences [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(12): 2243-2248.
- [7] 庄春华,李振宇,顾冬华,等. 基于对极几何和主动视觉的摄像机标定[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(9): 1175-1180.
ZHUANG CH H, LI ZH Y, GU D H. Arithmetic for camera calibration based on epipolar geometry and active vision [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(9): 1175-1180. (in Chinese)
- [8] HEIKKILA J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000,

- 22(10):1066-1077.
- [9] GUILLEMAUT J Y, AGUADO A S, ILLINGWORTH J. Using points at infinity for parameter decoupling in camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005,27(2):265-270.
- [10] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2000,22(11):1330-1334.
- [11] 张浩鹏,王宗义,吴攀超. 基于 LCD 和改进棋盘格模板的摄像机标定[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(7):1541-1548.
ZHANG H P, WANG Z Y, WU P CH. Camera calibration based on LCD and improved checkerboard pattern [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012,33(7):1541-1548. (in Chinese)
- [12] 闫蓓,王斌,李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. *北京航空航天大学学报*,2008,34(3):295-298.
- YAN B, WANG B, LI Y. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008,34(3):295-298. (in Chinese)
- [13] 曾峦,王元钦,谭久彬. 改进的 SIFT 特征提取和匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6):1391-1397.
ZENG L, WANG Y Q, TAN J B. Improved algorithm for SIFT feature extraction and matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1391-1397. (in Chinese)
- [14] SALVI J, BATTLE J, MOUADDIB E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement [J]. *Int. J. Pattern Recognition Letters*, 1998,19(11):1055-1065.

通讯作者:



曾 峦(1963—),男,广东梅县人,教授,博士生导师,1983年于中国人民解放军国防科技大学获得工学学士学位,2007年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得工学硕士、博士学位,主要从事光电测量方向的研究。E-mail: zengluan@sina.com



翟 优(1986—),男,河北正定人,博士研究生,2009年于北京航空航天大学获得工学学士学位,2011年于中国人民解放军装备学院获得理学硕士学位,主要从事图像处理及计算机视觉方向的研究。E-mail: youyou1952@sina.com