

文章编号: 0258-7025(2010)10-2576-06

基于镜像几何约束的单摄像机三维重构

胡春海 刘 斌*

(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 采用带有正八边形标记点的平面镜和单目 CCD 相机对空间物体进行三维重构。依据镜像对称几何学原理,利用空间物体与其在平面镜中的像构建镜像对称结构。镜像对称物体的单幅透视图几何等价于对称视点下的两幅视图,它们相差一个反射变换,并且具有自极几何对应性。平面镜不仅是对称面,而且还被当作标定平面,并利用灭点约束下的正八边形标记点计算相机外参矩阵。实验验证了该方法的有效性,给出三维重构结果,总结了其优势和局限性。其中设计的正八边形稀疏标记点同时具有正交性和平行性的几何约束,为现场标定相机外参数提供了一种新的解决方案。

关键词 机器视觉;镜像立体视觉;镜像对称几何;平面镜

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2576

Three-Dimensional Reconstruction Method Using Single CCD Based on Geometric Constraint of Bilateral Symmetry

Hu Chunhai Liu Bin

(Hebei Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A new method of three-dimensional(3D) reconstruction using single CCD is proposed. A flat mirror with regular octagonal markers and a single CCD camera are used in the method. Bilaterally symmetrical structure is obtained by utilizing the object in space and its image in the flat mirror based on geometry of bilateral symmetry. A single perspective image of this structure is equivalent to two perspective views of half of the structure. The two halves are projective equivalent in difference of a reflection transformation and the structure is auto-epipolar in the image taken by the camera. Flat mirror is not only a symmetrical plane, but also used as calibration plane. Extrinsic parameters of the camera are calculated by using vanishing point constraint of regular octagonal markers. The validity of the proposed method is proved experimentally and the results of 3D reconstruction are given. The advantages and limitations of this method are summarized. The designed regular octagonal sparse marker is possessed by orthogonality and parallelism at the same time. It is a new solution for online calibration of camera extrinsic parameters.

Key words machine vision; mirror-stereovision; bilateral symmetry geometry; flat mirror

1 引 言

三维(3D)重构是机器视觉技术的主要研究方向。传统的双摄像机立体视觉系统通常需要两台性能和结构参数完全相同的视觉传感器,在实际的工程应用中,很难在硬件上保证两台相机镜头畸变大小、

焦距长短以及主点位置等重要参数完全一致。其次,在视觉测量过程中,若相机受到外力作用位置发生改变,则系统的外参矩阵需要重新校准。另外,系统要获得较高精度,就必须增加双摄像机的基线长度,占用空间较大,而在双视图中寻找匹配点更是其中的关

收稿日期: 2009-12-27; 收到修改稿日期: 2010-03-19

基金项目: 河北省教育厅科学发展计划(2006455)资助课题。

作者简介: 胡春海(1966—),男,博士,教授,主要从事机器视觉、多传感器数据融合等方面的研究。

E-mail: fred-hu@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qhdlb1981@163.com

键和难点问题。

近年来,出现了利用单摄像机进行 3D 重构的方法^[1~6],即利用先验的场景几何约束和摄像机配置可以完成场景的某些度量性质。但由于自然场景中的物体并非严格的平行或正交,往往需要辅助设备对系统进行标定,操作过程较为繁琐。基于结构光的立体视觉系统具有精度高、速度快、量程大的特点,因此对激光器自身性能及其在现场环境下的稳定性要求严格^[7,8]。

对称结构广泛存在于客观世界中,具有多种表现形式,如径向对称,双边对称、球对称等。对称结构给基于机器视觉技术的摄像机标定和物体的 3D 重建提供了先验性的几何约束。K. Bitsakos 等^[9]提出利用交比不变性对透视投影下的薄物体进行对称性检测。R. J. Francois 等^[10]利用镜像对称物体的单一透视图像得到对称视点下的虚拟的立体视图,并完成镜像对称物体的 3D 重构。Allen Y. Yang 等^[11]介绍了一种从校准的图像中提取空间对称模式姿态和结构的统一框架理论。但是,真实物体通常不是完整的对称结构,而且少量的干扰就可能影响其图像特征的提取,所以图像中的对称结构较难检测。根据平面镜成像特点可知,利用平面镜可以得到一类镜像对称结构。在保证物体和其镜像均在摄像机视野范围内的条件下,物体或镜面的移动都不会影响该结构的对称性。郝继贵等^[12]提出通过两组对称的光学反射镜,镜像出 1 对虚拟摄像机,从而变传统的双 CCD 摄像机结构为单 CCD 摄像机结构,可在同一个 CCD 像面上采集到存在视差的两幅图像,从而恢复空间点的 3D 信息。该方法通过小的结构配置获得较大的基线距提高测量精度,但同时对于多组镜面的形位,特别是角度关系要求严格。Z. Y. Zhang 等^[13]利用平面镜模拟镜像对称物体,利用双视图立体视觉方法对空间物体进行重构。该方法将相机安装在手眼标定平台,参数通过 Tsai 算法获得,相机的位置变化需为已知,否则相机要重新标定。

本文提出的方法不仅利用平面镜构建空间双边对称结构,而且将平面镜镜面作为标定平面,相机的外参矩阵可以利用场景图像直接计算。此方法可用 1 块带有稀疏标记点的平面镜和 1 台内参数已知的相机实现场景目标的 3D 重构,其中标记点服从正八边形几何约束。

2 理论方法

2.1 射影变换下的镜像对称几何模型

空间一点 P_w , 在针孔相机模型作用下的射影变

换可表示为

$$s\tilde{p}_w = M[I | -C]P_w, \quad (1)$$

式中 $\tilde{p}_w = (u \ v \ 1)$ 为点 P_w 的齐次图像坐标, s 为尺度因子, C 为 3D 非齐次向量, 定义摄像机光心 C 的世界坐标。 $M = KR$, R 表示从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, K 为摄像机内参矩阵。如果存在一个平面 Ω 能够将某 3D 物体划分为对等的两个部分, 则称该物体具有镜像对称的空间几何结构, 称平面 Ω 为对称面, 如图 1 所示。

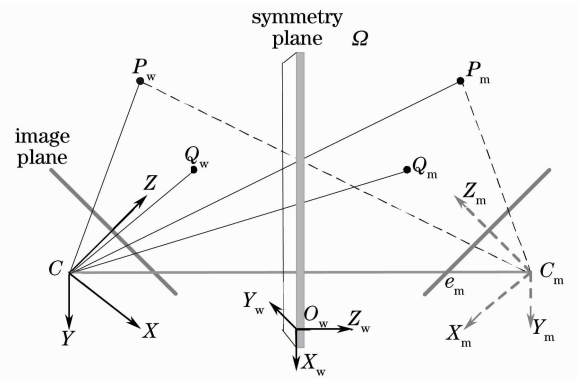


图 1 光束发射孔径的定义

Fig. 1 Geometry of bilateral symmetry

图 1 中 P_w, P_m 和 Q_w, Q_m 分别为对称结构中的对称点。不失一般性, 设世界坐标系原点 O_w 在对称面上, 则 Ω 可表示为 $Z=0$ 。这样, P_w 点关于对称面 Ω 的对称点 P_m 的齐次世界坐标表示为

$$P_m = \begin{bmatrix} \Sigma & \\ & 1 \end{bmatrix} P_w, \quad (2)$$

式中 $\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & -1 \end{bmatrix}$, 对称点 P_m 在摄像机光心 C 作用下的图像坐标为

$$s\tilde{p}_m = M[I | -C] \begin{bmatrix} \Sigma & \\ & 1 \end{bmatrix} P_w. \quad (3)$$

设 C_m 为光心 C 关于对称面 Ω 的对称点, 其坐标为 $C_m = \Sigma C$ 。 C_m 可看作与原有相机 C 完全对称的虚拟相机光心, 若相机 C 采用右手坐标系, 则与之对称的虚拟相机 C_m 为左手坐标系, 如图 1 所示。

点 P 在光心 C_m 作用下的中心投影表示为

$$s\bar{p}_w = \bar{M}[I | -C_m]P_w, \quad (4)$$

式中 \bar{p}_w 为对应的图像坐标。根据对称性, $\bar{M} = M\Sigma$, 则

$$s\bar{p}_w = M\Sigma[I | -\Sigma C]P_w = sp_m. \quad (5)$$

同理可知, 对应点 P_m 在虚拟相机图像平面的投影为

$$\bar{s} \bar{p}_m = M \Sigma [I | \Sigma C] \begin{bmatrix} \Sigma \\ 1 \end{bmatrix} P_w = s p_w. \quad (6)$$

由于互相对称的真实相机和虚拟相机的尺度因子完全相同,即 $\bar{s}=s$,则空间一对对称点在真实相机作用下所成的像等价于与之对称的虚拟相机所成图像,互相对称的两点在虚拟图像中被翻转对换。文献[10]利用代数方法证明,如果摄像机是被标定过的,那么对于双边对称结构,虚拟的立体视图可以通过将原来的图像作过图像主点的垂直轴的水平镜像得到。但是,由于不能保证主点位于图像中心处,这样的操作会使与图像分辨率相关的有限大小的成像面发生偏移,文献[10]没有对这种情况给出必要的说明。实际上,由于假设存在的虚拟相机与实际相机完全对称,包括光轴与像面的交点,即主点。当利用与虚拟光心 C_m 重合,并且主轴也重合的真实相机拍摄时,由于相机的内参数矩阵不变,则主点坐标值相同。不同的是虚拟相机采用左手坐标系,而与之光心相同的真实相机为右手坐标系。那么对于实际的 CCD 相机,由于不能保证主点位于像面中心,所以虚拟相机与真实相机的像面必定不重合,如图 2 所示。

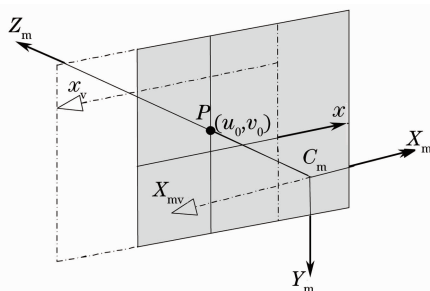


图 2 对称虚拟视图的主点不变性

Fig. 2 Constant principal point of the virtual view

而透视投影过程与选择何种坐标系无关,所以此时图像内容不发生改变,只是图像中景物的横坐标发生变化。利用这种水平镜像的方法得到合成的镜像对称场景,如图 3 所示。图 3 中将原始图像与合成的虚拟图像拼接在一起,使人产生一种错觉,即认为图中显示的是一个的左右手在平面镜中分别

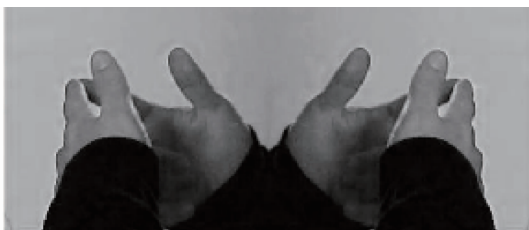


图 3 镜像立体视图

Fig. 3 A pair of mirror-stereo images

成像。产生这种错觉的原因是人的两只手本身就是一种天然的镜像对称结构。图 3 可以说明镜像对称结构的单幅透视图像几何等价于两幅视角对称的透视图,此时可认为右侧视图是“右手”侧的相机拍摄的,而厚度无限小的平面镜具有双面反射性。

2.2 镜像对称结构的自极几何

设物体表面一点 P ,可以在图像中找到其镜像对应点 P_m ,连接 P 和 P_m 得到对应点的连线 PP_m ,这里称为对称线。由于所有对称线都与对称面垂直相交,包括相机光心 C 与其镜像 C_m 的连线 CC_m ,则有 $PP_m // CC_m$ 。所以,包含一点 P 的极平面同时包含对称点 P_m ,即包含对称直线 PP_m 。这样,由某一极平面定义的图像上的极线同时也是该平面内所有对称线在图像上的投影,因此任何对称线都投影到包含该对称线的极平面所决定的极线上。则在图像平面上,所有对称线的投影相交于极点,即对称线方向的灭点与图像的极点相对应,而对称线的在像平面的投影就是极线。这样,空间点 P 和它的对应点 P_m 以及由它们确定的极点 e 是共线的。若将两幅图像叠加,则相应的匹配点都位于同一条极线上,这种性质称为自对极^[14]。镜像场景中的对称线完全刻画了双边对称结构一对立体视图的自极几何特性,为在图像中寻找匹配点提供了极几何约束。

2.3 利用正八边形标记点计算外参数矩阵

将世界坐标原点建立在平面镜所在平面,令对称面为 $Z=0$,如图 1 所示。则根据平板标定法可以计算相机的外参矩阵 $K[R|t]$ ^[15,16],存在的问题是如何求得单应矩阵 H 。由于需要最大限度地保留平面镜反射面,所以不可能采用文献[13]中的棋盘格靶标。这里给出一种具有几何意义的算法,考虑空间某平面内的正八边形,其 4 组对边分别平行,而任一条边的两条邻边正交。将这些对边延长,可以得到如图 4 所示的正八边形几何拓展图形。

根据射影变换的保线性,这些延长线的投影在

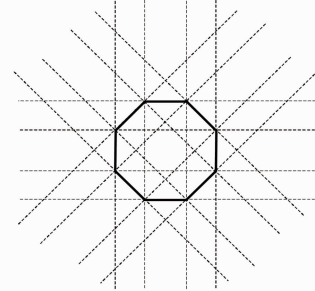


图 4 正八边形的几何拓展

Fig. 4 Geometric expansion of regular octagon

图像中仍然相交,得到的交点称为拓展点。若已知正八边形的边长,则可以计算得到这些拓展点的空间坐标。对正八边形进行一级几何拓展可以获得 56 个额外的坐标已知的拓展点。对于图 4 得到的内部小的正八边形,可以用相同的方法进行二级拓展,得到更多的拓展点,这些拓展点坐标的求取涉及到几何极限问题。利用做图法,能够得到这些拓展点的图像坐标。但是,由于做图法直接利用图像中提取的正八边形顶点没有消除测量误差的影响,得到的拓展点不能给计算单应提供额外约束。

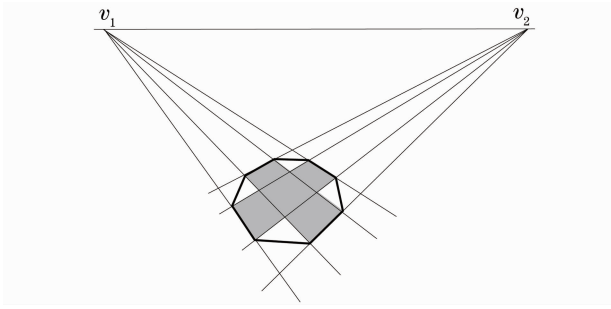


图 5 正八边形的灭点约束

Fig. 5 Vanishing-points constraint of regular octagon

采用灭点约束可以计算拓展点的图像坐标。对于正八边形任意一组对边,可以通过 8 个顶点得到与该组对边相同方向的 4 条平行线段 s_i ,这些线段所在直线在像平面内相交于灭点 \tilde{v} ,如图 5 所示。同样由于测量误差的原因,图像中的平行线不能唯一地相交于一点。可令消影点 \tilde{v} 的最大似然估计值 \hat{v} 位于每一条直线段 \hat{s}_i 上,集合 $\{\hat{s}_i\}$ 通过最小化集合 $\{s_i\}$ 的 Malhanobis 距离得到。设线段端点处的噪声服从各向同性的零均值高斯分布,线段 s_i 的端点坐标分别为 \tilde{x}_i^a 和 \tilde{x}_i^b ,最大似然估计算法最小化函数^[17]为

$$\zeta = \sum_i d_{\perp}^2(\hat{s}_i, \tilde{x}_i^a) + d_{\perp}^2(\hat{s}_i, \tilde{x}_i^b), \quad (7)$$

并且对于任意的 i ,服从 $\hat{v} \cdot \hat{s}_i = 0$ 的约束。式中 $d_{\perp}(l, x)$ 表示点 x 到直线 s 的垂直距离。计算矩阵 $(s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ 的零向量,作为初始解,最小化过程利用 Levenberg-Marquart 算法实现。

3 实 验

利用内参数已知的单目相机和带有稀疏标记点的平面镜进行 3D 重构的步骤为:1) 调整相机与平面镜的空间位置,将平面镜作为标定平面,利用具有几何约束的稀疏标记点计算相机外参矩阵 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$; 2) 摄像机矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$,利用 2 节所述平面镜

的镜像对称性,计算得到对称视点位置的虚拟相机矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\Sigma} \ \boldsymbol{\Sigma} \cdot \mathbf{T}]$;3) 将原图做水平翻转,并将翻转图像的横坐标沿主点做水平镜像可得到立体视图的图像匹配点坐标,再利用三角测量的点重建方法即获得重构的 3D 立体视图。

实验利用单面阵 CCD 相机(分辨率为 4000 pixel×2672 pixel)和一块带有正八边形表面标记点的平面镜,对书柜两个正交面的部分表面点进行 3D 重构,这些点通过等方的黑白格进行标记,格子大小为 30 mm×30 mm,真实的重构场景如图 6 所示。

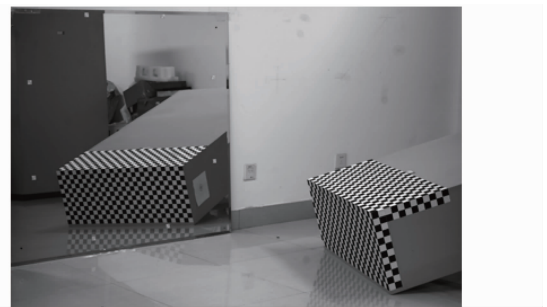


图 6 真实场景图

Fig. 6 Real scene

由于存在退化的射影失真,造成某一方向的消影点距离视野中成像位置很远,甚至在无穷远处。因此实验选三组正交方向的平行线,计算拓展点图像坐标,如图 7 所示。对正八边形进行一次拓展,利用 2.3 节介绍的方法计算外参数。相机内参数利用文献[15]方法计算得到,像素误差 $e_{\text{pixel}} = [0.23818 \ 0.28909]$ 。计算得到的外参数矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.009039 & 0.782218 & 0.622939 \\ 0.996809 & -0.056458 & 0.056430 \\ 0.079311 & 0.620442 & -0.780232 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [-553.574618 \ -275.958577 \ 4237.634431].$$

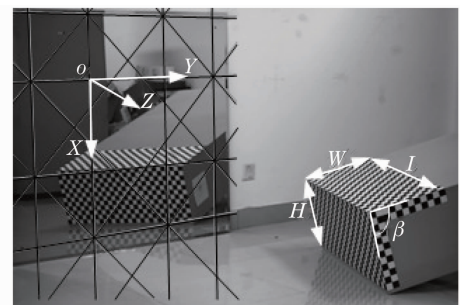


图 7 几何拓展

Fig. 7 Geometric expansion

这里共提取 775 组匹配特征,其中部分特征构成的自极几何匹配如图 8 所示。利用双目立体视觉的点重建方法^[18],得到匹配点的 3D 重构图像,如图 9 所示。重构结果对于绝对尺寸的测量误差较大,误差产生的主要原因在于所使用的平面镜表面不均匀影响镜像反射效果,以及人工粘贴标记引入的误差。在实际的测量中,可以通过选择具有均匀反射特性的面镜和利用贴片机自动贴片来改善测量结果。实验中相机光心距离面镜为 $t_3 \approx 4237.6$ mm,若使用双摄像机进行同尺度下的 3D 重构,则基线距离约为 8.5 m,相比之下本文方法具有较高的空间利用率。

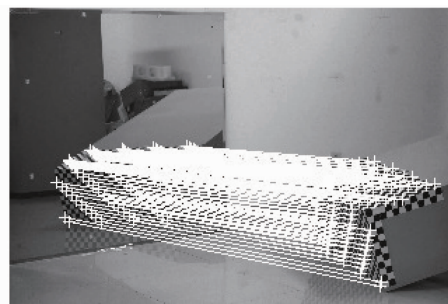


图 8 自极线束

Fig. 8 Auto-epipolar pencils

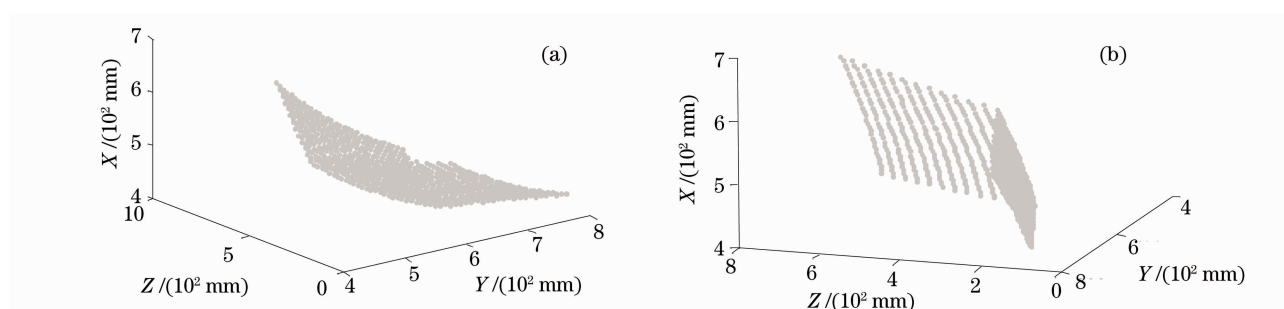


图 9 不同视点下的 3D 重构结果

Fig. 9 Results of the 3D reconstruction in dissimilar viewpoint

4 结 论

给出了一种利用平面镜和 CCD 相机进行物体 3D 重构的方法,设计了具有几何图形约束的稀疏标记点用于计算相机外参矩阵。实验结果表明,该方法是合理、可行的。与传统的双目立体视觉重构方法相比,该系统不仅在硬件上节省了 1 个摄像机所需的成本,而且在测量模型的设计上也比双摄像机配置更具优势。由于几何局限性,该方法只能对目标的局部或片段进行重构,可应用于流水线上工件的尺寸检测、仪器设备的形位误差度量以及物体表面缺陷识别与定位等场合。通过变换平面镜的角度或加装多片平面镜,能够实现对目标全景的 3D 重构,用于逆向工程的 3D 可视化分析及事故现场的 3D 场景重现等领域,此内容将作为下一步研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Shen Yehu, Liu Jilin, Du Xin. Simultaneous three-dimensional environment reconstruction and localization based on monocular vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 907~914
沈晔湖, 刘济林, 杜 歆. 单目视觉的同时三维场景构建和定位算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 907~914
- 2 Yang Min. 3-D reconstruction using vanishing points from a single view [J]. *J. Nanjing University of Posts and*

- Telecommunications (Natural Science)*, 2008, **28**(3): 87~90
杨 敏. 基于影灭点的单视图三维重构[J]. *南京邮电大学学报 (自然科学版)*, 2008, **28**(3): 87~90
- 3 Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1723~1729
孙 伟, 何小元, 郑 翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1723~1729
- 4 Zhang Dazhi, Wang Yongtao, Tian Jinwen *et al.*. Efficient 3D reconstruction using monocular vision[J]. *J. Astronautics*, 2008, **29**(1): 289~294
张大志, 王勇涛, 田金文等. 基于单目视觉系统的远距离场景重建算法研究[J]. *宇航学报*, 2008, **29**(1): 289~294
- 5 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 6 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 7 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 182~188
张维光, 赵 宏, 张 琦等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 182~188
- 8 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 刘震, 张广军, 魏振忠等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 9 K. Bitsakos, H. Yi, L. Yi *et al.*. Bilateral symmetry of object silhouettes under perspective projection[C]. IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition(ICPR 2008), 2008, Tampa 2009. 1~4
- 10 R. J. Francois, G. Medioni, Waupotitsch. Mirror symmetry: 2-view stereo geometry [J]. *Image and Vision Comput.*, 2003, **21**(2): 137~143
- 11 Allen Y. Yang, Kun Huang, Shankar Rao *et al.*. Symmetry-based 3-D reconstruction from perspective images [J]. *Comput. Vision Image Understanding*, 2005, **99**(2): 210~240
- 12 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~947
- 郝继贵, 李艳军, 叶声华等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 943~947
- 13 Z. Y. Zhang, H. T. Tsui. 3-D reconstruction from a single view of an object and its image in a plane mirror[C]. Int. Conf. on Pattern Recognition, Brisbane, 1998. 1174~1176
- 14 R. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 248~249
- 15 Z. Y. Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. International Conference on Computer Vision (ICCV99), Corfu, 1999. 666~673
- 16 Wu Qingyang, Li Jingzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
- 吴庆阳, 李景镇, 苏显渝等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1224~1227
- 17 Jun Sik Kim, In So Kweon. Camera calibration based on arbitrary parallelograms [J]. *Comput. Vision Image Understanding*, 2009, **113**(1): 1~10
- 18 Adrien Bartoli, J. T. Lapreste. Triangulation for points on lines [J]. *Image Vision Comput.*, 2008, **26**(2): 315~324