

文章编号: 0253-2239(2005)07-943-6

单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究*

郝继贵 李艳军 叶声华 唐大林 张国全

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 以双目立体视觉传感器三维测量模型为基础, 提出了一种用于测量空间三维点坐标的低成本单摄像机模型。该模型利用光学成像, 把单摄像机镜像为一对虚拟摄像机, 在一个 CCD 像面上采集到同一物体存在视差的两幅图像, 从而恢复空间点的三维信息。讨论了单摄像机传感器测量空间三维点坐标的基本原理, 建立了单摄像机传感器的测量模型, 克服了双摄像机系统中成本高、切换采集左右摄像机的图像使检测速度减慢等诸多缺陷, 为空间三维点的精密测量提供了经济、快速、有效的测量途径。实验表明, 传感器可实现约 0.8% 的相对测量精度, 证明了本方案合理、有效。

关键词: 机器视觉; 传感器; 单摄像机模型; 镜像; 三维测量; 视差

中图分类号: TH701; TH702 文献标识码: A

Study on Single Camera Simulating Stereo Vision Measurement Technology

Zhu Jigui Li Yanjun Ye Shenghua Tang Dalin Zhang Guoquan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Based on the three-dimensional binocular vision sensor measurement model, a kind of low cost single camera model used to measure coordinates in space was established. By using optical imaging, the single camera was imaged as two virtual cameras. Two parallax images which screened by the same object can be collected in the same charge coupled device (CCD) image surface. Then the three-dimensional information of the measured points can be retrieved. The principle of measuring coordinates in space by single camera sensor was discussed, and the single camera sensor model was constructed. This method overcame some disadvantages in double cameras system, such as high system cost, reduction of the measurement speed when switching the image of two cameras, and provided an economical, rapid, useful measuring approach. Experiment showed that the sensor can attain relative accuracy about 0.8% which indicated the rationality and effectivity of this method.

Key words: machine vision; sensor; single camera model; mirror image; three-dimensional measurement; parallax

1 引 言

视觉传感器是三维视觉在线检测系统的重要组成部分, 是系统获取信息数据的直接来源。视觉传感器以结构简单、使用方便、精度高等诸多优点被广泛地应用到工业检测、工件定位、机器人引导、物体识别、航天及军事等诸多领域。

以往的双目视觉传感器^[1]由两台性能相同的面阵 CCD 摄像机组成, 基于立体视差^[2]原理, 可完成视场内所有特征点的三维测量。此测量方法非接触, 因而速度较快, 并可完成特殊点诸如圆孔中心,

三棱顶点等的测量^[3]。此方法的缺点: 需采用两台 CCD 摄像机, 成本较高; 为获得合适的测量精度, 要求两摄像机焦点之间的距离较远^[4], 以至结构体积较大; 两台摄像机的工作状态不能完全一致, 降低了系统的精度; 图像采集时, 需切换采集左右摄像机的图像, 造成检测速度慢, 工作效率低, 尤其是对于包含一定数量视觉测头的大型系统, 问题更加突出。

基于以上原因, 本文提出一种单摄像机镜像双目视觉传感器的新技术, 只需一台 CCD 摄像机, 加装两组对称的反射镜, 把单摄像机镜像为一对虚拟

* 国家自然科学基金(50305024)资助课题。

作者简介: 郝继贵(1970~), 男, 安徽无为, 博士, 副教授, 主要从事激光及电测试, 视觉检测方面的研究。

E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn

收稿日期: 2005-01-14; 收到修改稿日期: 2005-04-11

摄像机,即可在同一个 CCD 像面上采集到存在视差的两幅图像。此方案摄像机的数量只有双摄像机系统的一半,降低了成本;“两摄像机”由同一台摄像机虚拟,减小了系统的体积,且虚拟摄像机的工作状态完全一致。此方案在具有双目视觉传感器功能的基础上,改进了双目视觉传感器的缺点,应用于大型视觉检测系统如汽车白车身视觉检测系统^[5]中,可显著降低成本,减小系统尺寸,改善可靠性,提高测量速度。

2 测量原理

立体视觉传感器的测量原理基于立体视觉^[6],由两台摄像机组成,利用空间点在两摄像机像平面上的透视成像点^[7]的坐标来求取空间点的三维坐标。

单摄像机镜像双目视觉传感器的测量原理也是基于立体视觉法,由一台摄像机和两对称的光学反射镜组成,其光路原理如图 1 所示。

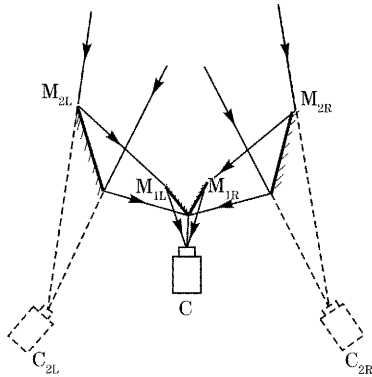


图 1 单摄像机立体视觉传感器光路图
Fig. 1 The beam path of the single camera imaging binocular sensor

利用左右对称的两光学反射镜组 M_{1L} 、 M_{1R} 与 M_{2L} 、 M_{2R} ,把实摄像机 C 镜像为存在一定角度、相互对称的两虚拟摄像机 C_{2L} 、 C_{2R} 。正对摄像机的反射镜组 M_{1L} 、 M_{1R} 把摄像机像面平分为“左”、“右”像面,使摄像机的“左”像面只能接受左反射光路所成的像,摄像机的“右”像面只能接受右反射光路所成的像。被摄物体通过左右反射光路,分别成像在摄像机的“左右”像面上。测量时,视场内被测点在单摄像机虚拟的出两个视场内分别成像,形成一定的虚拟立体视差,利用空间点在两虚拟摄像机平面上的透视成像点坐标来求取空间点的三维坐标。这相当于传统的双摄像机视觉传感器从两个不同位置获取被测物体的两幅图像,因此具有双目视觉的功能。

3 单摄像机测量模型

图 2 为镜像式传感器结构示意图。

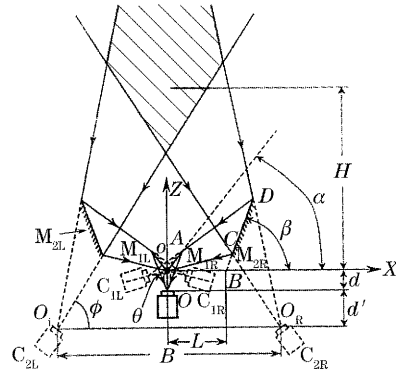


图 2 单摄像机立体视觉传感器结构图
Fig. 2 The structure of the single camera imaging binocular sensor

设反射镜 M_{1L} 、 M_{1R} 的交点 O 为坐标原点,水平方向的视场为 X 轴,垂直方向的视场为 Z 轴,反射镜 M_{1L} 、 M_{1R} 与 X 轴的夹角为 α ,反射镜 M_{2L} 、 M_{2R} 与 X 轴的夹角为 β ,反射镜 M_{2L} 与 X 轴的交点坐标为 $(-L, 0)$, M_{2R} 与 X 轴的交点坐标为 $(L, 0)$ 。又设摄像机投影中心的坐标为 $(0, -d)$,反射镜 M_{1R} 所在的直线方程为 $Z = X \cdot \tan \alpha$, M_{2R} 所在的直线方程为 $Z = \tan \beta \cdot (X - L)$ 。

则 O 关于 M_{1R} 的对称点 O_{1R} (O_{1R} 为虚拟摄像机 C_{1R} 的投影中心)的坐标 (X_{1R}, Z_{1R}) 满足如下关系:

$$\frac{Z_{1R} - d}{2} = \frac{X_{1R}}{2} \tan \alpha, \tag{1}$$

$$X_{1R}^2 + Z_{1R}^2 = d^2, \tag{2}$$

由(1)式、(2)式可知, O 关于 M_{1R} 的对称点 O_{1R} 的坐标为 $(-d \sin 2\alpha, d \cos 2\alpha)$ 。

O_{1L} (O_{1L} 为虚拟摄像机 C_{1L} 的投影中心)关于 M_{2R} 的对称点 O_{2R} (O_{2R} 为虚拟摄像机 C_{2R} 的投影中心)的坐标 (X_{2R}, Z_{2R}) 满足如下关系:

$$\frac{Z_{2R} + d \cos 2\alpha}{2} = \left(\frac{X_{2R} - d \sin 2\alpha}{2} - L \right) \tan \beta, \tag{3}$$

$$\frac{Z_{2R} - d \cos 2\alpha}{X_{2R} + d \sin 2\alpha} = -\cot \beta, \tag{4}$$

由(3)式、(4)式可知, O_{1L} 关于 M_{2R} 的对称点 O_{2R} 的坐标为

$$\begin{aligned} & [d \sin 2(\beta - \alpha) + 2L \sin^2 \beta, \\ & -d \cos 2(\beta - \alpha) - L \sin 2\beta], \end{aligned} \tag{5}$$

由(5)式确定虚拟摄像机 C_{2L} 、 C_{2R} 投影中心的坐标。并由光路反射,可确定虚拟摄像机的摆放角

$$\phi = 90^\circ + 2\alpha - 2\beta, \tag{6}$$

由(5)式、(6)式即可确定模拟双目视觉传感器左、右虚拟摄像机的坐标和摆放角度。并由(6)式可推出反射镜 M_{2L} 、 M_{2R} 的摆放角度 β 必须不小于反射镜 M_{1L} 、 M_{1R} 的摆放角度 α 。当 $\beta > \alpha$ 时, 对应为交叉摆放式双目视觉传感器; 当 $\beta = \alpha$ 时, 对应为正直摆放式双目视觉传感器。

3.1 反射镜长度计算

要使摄像机“左”像面只能接受左反射光路所成的像,“右”像面只能接受右反射光路所成的像,系统不仅对反射镜的摆放角度、摆放位置有一定的要求,同时对反射镜的长度也有要求。当反射镜长度过短,将减小系统的视场;当反射镜过长,将增大系统的体积,同时反射镜 M_{1R} 也可能遮挡 M_{2R} 的光路。合理的反射镜长度设计,是系统的最基本要求。

设反射镜 M_{1R} 的长度为 l_1 , 在三角形 OoA 中, 由正弦定理:

$$\frac{l_1}{\sin \theta} = \frac{d}{\sin[90^\circ - (\theta + \alpha)]}, \quad (7)$$

由(7)式可知,反射镜 M_{1L} 、 M_{1R} 的长度为

$$l_1 = d \sin \theta / \cos(\theta + \alpha). \quad (8)$$

在反射镜 M_{1R} 长度已确定的情况下,反射镜 M_{2R} 必须能完全接受从 M_{1R} 反射过来的光线,否则

将改变摄像机的视场。设反射镜 M_{2R} 的最短长度为 l_{\min} , 在三角形 OBC 及 $O_{2L}CD$ 中, 由正弦定理:

$$\frac{L}{\sin(90^\circ + \beta - 2\alpha)} = \frac{oC}{\sin(180^\circ - \beta)}, \quad (9)$$

$$\frac{oC + d}{\sin(90^\circ + \beta - 2\alpha - \theta)} = \frac{l_{\min}}{\sin \theta}, \quad (10)$$

由(9)式、(10)式可得,反射镜 M_{2R} 的最短长度为

$$l_{\min} = \frac{1}{\cos(\beta - 2\alpha - \theta)} \left[\frac{L \sin \beta \sin \theta}{\cos(\beta - 2\alpha)} + d \sin \theta \right].$$

3.2 基线距 B 的计算

镜像式单摄像机视觉传感器的基线距为两虚拟摄像机投影中心 (X_{2L}, Z_{2L}) 、 (X_{2R}, Z_{2R}) 之间的距离,因此基线距 $B = 2X_{R2} = 2d \sin 2(\beta - \alpha) + 4L \sin^2 \beta$, 故基线距由四个因素决定: 光学反射镜的摆放角度 α 、 β 、摄像机投影中心的 Z 轴坐标 d 以及 M_{2R} 与 X 轴交点的坐标 L 有关。在 d 与 L 一定的情况下, 改变反射镜的摆放角度, 即可获得测量精度所要求的基线距、虚拟摄像机的摆放角度, 而传感器的体积却没有增大, 使设计简单、灵活多变。

图3为基线距 B 与投影中心坐标 d 、 M_{2R} 与 X 轴交点的坐标 L 、反射镜 M_{1R} 摆放角度 α 、反射镜 M_{2R} 摆放角度 β 关系曲线图。

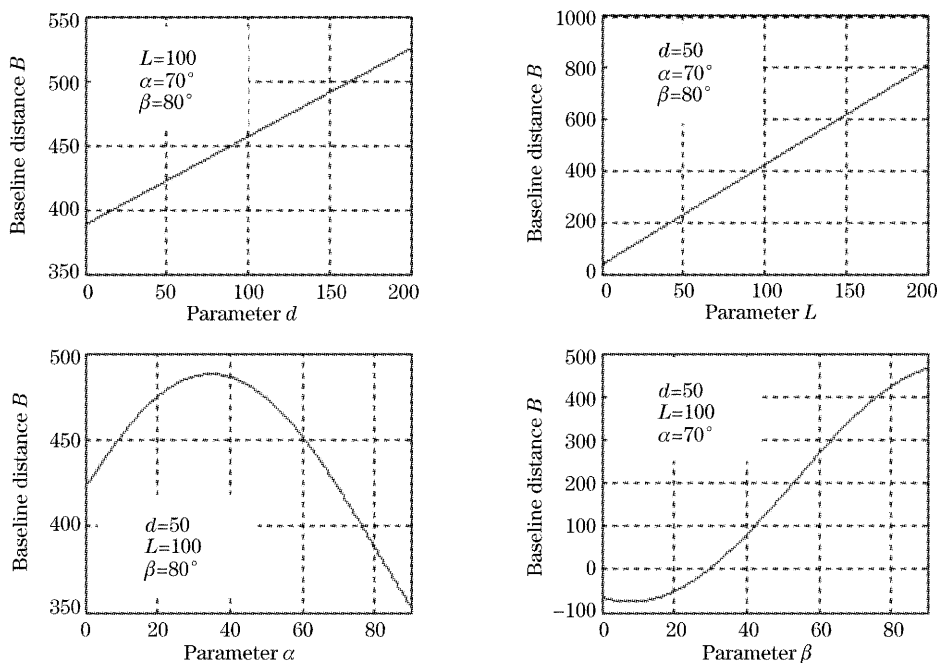


图3 基线距 B 与四参量之间的关系

Fig. 3 Relationship between baseline distance B and four parameters

3.3 传感器的有效视场

在单摄像机系统中,实摄像机像面被分为“左”、“右”像面,相对于传统双目视觉传感器摄像机的视

场,虚拟摄像机的视场减半。即“左”摄像机只有左半部分的视场,“右”摄像机只有右半部分的视场。因此,相对于双目视觉传感器,单摄像机系统中的视

场大大减少。

Z 轴方向 H:

根据三角关系原理,Z 轴方向的视场:

$$\sigma_z = \begin{cases} H_{\min} = \frac{B}{2} \tan \phi - (d + d') \\ H_{\max} = \frac{B}{2} \tan(\phi + \theta) - (d + d') \end{cases}$$

X 轴方向的视场 ±σ:

当 X 方向有最大视场时,其对应的 Z 轴坐标 $Z_{X_{\max}}$ 满足以下两个关系式:

$$\frac{B}{\sin[180^\circ - \phi - (\phi + \theta)]} = \frac{a}{\sin \phi}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{2}Ba \sin(\phi + \theta) = \frac{1}{2}B(Z_{X_{\max}} + d + d'), \quad (12)$$

由(11)式、(12)式可知,当 X 方向有最大视场时,其对应的 Z 轴坐标 $Z_{X_{\max}}$ 的值为

$$Z_{X_{\max}} = \frac{B}{\cot \phi + \cot(\phi + \theta)} - (d + d')$$

则 X 方向的视场 ±σ:

$$\sigma_x = \begin{cases} (H + d + d') \cot \beta - B/2, & \left[\frac{B}{2} \tan \phi \leq H \leq \frac{B}{\cot \phi + \cot(\phi + \theta)} - (d + d') \right] \\ B/2 - (H + d + d') \cot(\phi + \theta), & \left[H > \frac{B}{\cot \phi + \cot(\phi + \theta)} - (d + d') \right] \end{cases}$$

3.4 模型及参量的确定

理论上,单摄像机传感器测量模型参量可以用 d, L, α, β 四个结构参量以及摄像机参量(内部)完全描述.实际上,结构参量 d, L, α, β 对于传感器的设计是必要的,如确定测量范围(量程)、测量精度等,但精确确定传感器结构参量过程中,由于两组反射镜不能做到完全对称,且反射镜摆放角度 α, β 对传感器基线距的影响特别敏感(如图 3 所示), α, β 稍有偏差,传感器结构参量将受极大影响,因而利用这四个参量确定传感器的模型将非常困难。

单摄像机测量模型可以借鉴双目立体视觉测量的模型建立方法^[9],测量模型由虚拟出的两个虚拟摄像机 C_{2L}, C_{2R} 的参量及相互之间的空间姿态关系决定,包括摄像机内部参量(因两个虚拟摄像机是由同一个摄像机虚拟,所以内部参量完全一致)、两个虚拟摄像机之间的旋转关系(矩阵)和平移关系(矩阵)^[10]。作上述处理后,就可以采用双目立体视觉的校准原理和算法^[9]对此传感器模型进行校准和实际测量实验。因此,在实验过程中,此视觉传感器的精确模型并不由 d, L, α, β 这四个结构参量来保证,此四个参量不要求有精确的数值,能满足系统所要求的测量范围、测量精度即可,同时也降低了系统的调整要求。

4 实验及误差分析

4.1 实验结果

实验装置由 752 pixel×582 pixel 的 CCD 摄像机(WATEC-902H)和 25 mm 的 AVENIR TV 镜

头及两组对称的反射镜组成,测量实验采用图 4 所示非共面立体靶标,靶标在传感器的工作距离及工作视场内无严格姿势摆放^[11]。

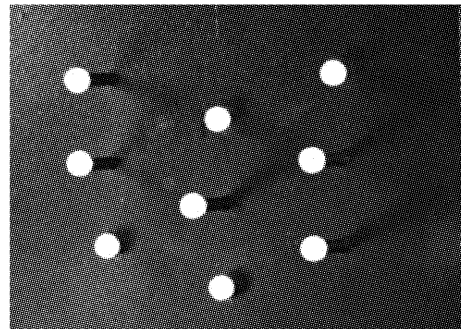


图 4 传感器校准靶标

Fig. 4 The target used in sensor calibration

在此实验中,取实摄像机投影中心与原点 O 的距离 d 约为 50 mm,反射镜 M_{2R} 延长线在 X 轴交点上的坐标 L 约为 100 mm,反射镜 M_{1R} 的摆放角度 α 约为 70° ,反射镜 M_{2R} 的摆放角度 β 约为 80° 。由于两个虚拟摄像机的有效视场是由一个摄像机有效视场分割而成,因而视场减小,实验中,上述靶标 9 个基准球中,只用到图 4 靶标中左面的 6 个基准球,视觉传感器所采集到的图像如图 5 所示,图像被分割为左右两部分,左半部分图像对应于左虚拟摄像机采集的图像,右半部分图像对应于右虚拟摄像机采集的图像。

靶标上基准球的球心坐标为基准参量(通过三坐标测量机得到)。因传感器测量坐标系和靶标坐标系无关,实验时,主要以基准球之间的距离评价测量精度。首先用已标定的传感器测量靶标上前 6 个

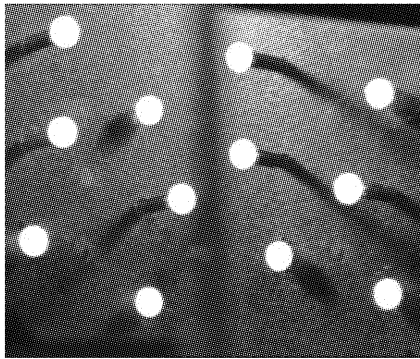


图 5 传感器采集图

Fig. 5 The image collected by sensor

基准球在传感器测量坐标系中的坐标值；其次取相邻基准球之间的距离为待评价参量；最后比较传感器测量得到的基准球之间距离和对应的基准距离，得到测量比对偏差。相关结果见表 1 所示。其中基准距 D 为三坐标测量机所测的相邻基准球之间的距离，测量距 D' 为视觉传感器所测的相邻基准球之间的距离。偏差 Δ 为测量距 D' 与基准距 D 之差。

表 1 距离比对偏差

Table 1 Measurement deviation

	D /mm	D' /mm	Δ /mm
1	19.679	19.85	0.171
2	23.436	23.40	-0.036
3	42.264	42.12	-0.144
4	24.152	24.12	0.168
5	24.016	23.83	-0.186
6	59.497	59.69	-0.193

表 1 比对数据表明：传感器可实现约 0.8% 的相对测量精度。

上述实验结果表明，本文提出的采用单摄像机虚拟双摄像机，实现立体视觉测量的思路合理，原理正确。取得了预期实验结果，证明了本方案合理、有效。

4.2 误差分析

理论上，对于模拟视频摄像机 902H 而言，传感器可以实现的测量精度应当优于 0.3%，但目前实际达到的测量精度和理论精度还有部分差距，有下列原因：

1) 光路畸变

在目前的实验中，只考虑了摄像机的成像畸变，没有考虑光路系统的畸变，从而引入测量误差。

2) 图像处理误差

目前的实验主要是验证性的，对图像处理算法及其精度，还没有作深入分析。图像处理误差也是产生测量误差的一个重要因素。

3) 靶标误差

实验中所用靶标自身的基准精度直接影响摄像机和传感器的标定精度，也影响比对误差。用于实验的靶标还需完善。

5 结 论

以上分析可以看出，相对于双目立体视觉传感器，此视觉传感器有如下几点改进：

1) 结构可以做得很小，同时可以获得很大的基线距，从而改善测量精度；

2) 通过改变两组反射镜的摆放角度，可以改变两虚拟摄像机之间的距离，在增大传感器基线距的条件下，不会导致传感器的体积明显增大；

3) 两个虚拟摄像机是由同一个摄像机镜像而来，因此采集图像的两个“摄像机”完全一致，具有极好的对称性，给以后的系统标定带来便利；

4) 对物体特征点的三维测量，只需一次采集就可以获得物体特征点的两幅图像，提高了测量速度；

5) 校准过程中，只需进行一个摄像机内部参数的校准，减小了工作量及计算过程。

基于单 CCD 摄像机镜像式双目视觉传感器既具有结构光传感器^[8]的优点如成本低、体积小，又具有双目视觉传感器的功能，可实现视场内所有特征点的三维测量。虽然这种结构相对于双目视觉传感器，视场范围明显减小，但对于在线三维高精度测量来说，速度和成本是主要考虑因素，测量范围满足要求即可，而且在大型物体关键点的三维测量如汽车白车身视觉检测系统中，仅仅需要满足某些关键点的测量即可，此方案的视场完全能满足要求。

参 考 文 献

- Zhang Jianxin, Duan Fajie, Zhong Ming *et al.*. Study on application of binocular sensor in 3D measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, **20**(1): 96~100 (in Chinese)
张建新, 段发阶, 钟明等. 用于三维尺寸检测的双目视觉传感器[J]. *计量学报*, 1999, **20**(1): 96~100
- Han Jungong, Lu Zhaoyang. A novel disparity algorithm for stereo image encoding[J]. *Chin. J. Computers*, 2003, **12**(12): 1717~1721 (in Chinese)
韩军功, 卢朝阳. 一种新的用于立体图像编码的视差估计算法[J]. *计算机学报*, 2003, **12**(11): 1717~1721
- Huang Jie, Zou Zhaofei. Study on precision measure system based on machine vision[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 491~494 (in Chinese)
黄颀, 周肇飞. 机器视觉精密测量系统研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 491~494
- Zhang Jianxin. *Study on Application of Binocular Stereo Technique in Industrial Inspection* [D]. Tianjin: Tianjin University, 1996. 21~25 (in Chinese)
张建新. 双目立体视觉技术在工业检测中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 1996. 21~25

- 5 Liu Changjie, Zhu Jigui, Ye Shenghua *et al.*. Car body in white inspection system with machine vision [J]. *Automotive Engineering*, 2000, **22**(6): 373~376 (in Chinese)
刘常杰, 郝继贵, 叶声华 等. 汽车白车身机器视觉检测系统[J]. *汽车工程*, 2000, **22**(6): 373~376
- 6 Zhang Chunsen, Zhang Jianqiang, He Shaojun. Based on stereo visual 3D motion analysis[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(3): 273~279 (in Chinese)
张春森, 张剑涛, 贺少军. 基于立体视觉的空间运动分析[J]. *光学技术*, 2004, **30**(3): 273~279
- 7 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 636~640 (in Chinese)
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 636~640
- 8 Wang Baoguang, He Zhonghai, Chen Lincai *et al.*. Model and performance analysis of structured light sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 481~484 (in Chinese)
王宝光, 贺忠海, 陈林才 等. 结构光传感器模型及特性分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 481~484
- 9 Wu Bin. *Study on the Key Technologies of 3D Digital Measurement of Large-Scale Objects* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. 17~23 (in Chinese)
吴 斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2003. 17~23
- 10 Tan Yuegang, Zhang Ming, Hu Jiangping. Calibration method for computer vision sensor[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 358~360 (in Chinese)
谭跃钢, 张 敏, 胡江萍. 视觉传感器的标定方法[J]. *光学技术*, 2003, **29**(3): 358~360
- 11 Zhou Fuqiang, Zhu Jigui, Yang Xueyou *et al.*. A field calibration technique for binocular vision sensor[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2000, **21**(2): 142~145 (in Chinese)
周富强, 郝继贵, 杨学友 等. 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