

移动机器人作战平台立体视觉三维建模方法

朱礼尧, 王建中

北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 虚拟现实技术在移动机器人作战平台遥操作中的应用, 可增强操控人员的视觉临场感, 提高操控效率。基于立体视觉的三维建模是构建虚拟环境的基础。根据立体视觉的基本原理, 研究了立体视觉的三维建模方法。在对比同类型中不同算法基础上, 提出适合立体视觉系统的三维建模算法, 提出提高空间点求解精度的改进算法, 最后用 Open Inventor 进行三维模型可视化显示。试验结果表明, 该方法具有良好的建模效果, 能精确反映障碍物深度信息。

关键词 双目立体视觉; 摄像机标定; 三维建模

中图分类号 TP311

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0038-05

Visual Stereo Modeling of Mobile Robot Fighting Platform

ZHU Liyao, WANG Jianzhong

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology;
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Virtual reality technology is widely applied in mobile robot fighting platforms. This will provide the operator the visual telepresence and increase the teleoperation efficiency. The virtual surrounding is a visual stereo space. With applications of corresponding software and algorithms, models for the real environment are built. Based on the basic theory of stereo vision, the camera calibration is established. At the same time, the algorithms of feature extraction, stereo matching and three-dimensional computation are worked out. Some algorithms of three-dimensional modeling suitable to the stereo vision system are proposed. The three-dimensional model is finally displayed through Open Inventor. The result of experiment indicates that the three-dimension modeling system proposed in this paper is practical and can reflect depth information of barriers accurately.

Keywords binocular stereo vision; camera calibration; three-dimensional modeling

0 引言

移动机器人作战平台是适应未来信息化战争的重要无人武器装备之一。由于战场环境和作战任务的复杂性, 目前广泛使用的遥操作方法大都难以满足移动机器人作战平台在实战中的远程操控需求, 其主要原因是这些方法无法获得环境深度信息。立体视觉系统可采集移动机器人作战平台现场环境信息, 重构环境物体的三维模型, 从而可以构建虚拟环境、增强操作人员的视觉临场感, 弥补了遥操作技术的不足。

立体视觉是计算机领域中很重要的距离测量技术^[1], 国内外进行了大量研究。日本大阪大学研制了一种自适应双目视觉伺服系统^[2]; 浙江大学所采用的立体视觉系统能够对多自由度机械装置进行精确位置和姿态检测, 从两幅对应的图像中抽取特征点的三维坐标^[3]。这些立体视觉系统能对物体精确测量, 获得三维特征点坐标, 但无法形象表达物体的深度信息; 能在自动化生产装配线上得到很好的应用, 却并不适用于移动机器人作战平台。微软公司和华盛顿大学联合为“火星气候探测器”号研制了双目立体视觉系统, 使“探测器”号能够对火星的地形进行精确的导航和定位^[4], 但由于其算法复杂, 处理图像信息的运算量大, 对计算机的要求很高, 并且比较昂贵, 不适合应用于移动机器人作战平台的三维建模。

本文根据双目立体视觉的特点, 在对比其他同类型建模算法的基础上, 提出物体的三维建模算法; 针对最小二乘法求取三维空间点坐标精度不高的问题, 提出这样的方法: 先

收稿日期: 2009-06-05

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室自主研究课题项目 (ZDKT08-05)

作者简介: 朱礼尧, 博士研究生, 研究方向为移动机器人遥操作技术、虚拟现实等, 电子信箱: bitzly@yahoo.cn; 王建中 (通信作者), 教授, 研究方向为军用机器人技术、多机器人协同技术, 电子信箱: cwjzwang@bit.edu.cn

求取两条匹配点和摄像机焦点所组成的异面直线,然后求取这两条异面直线的公垂线,用公垂线的中点坐标代替所求的物体空间点的方法,提高空间点坐标的计算精度。

1 双目立体视觉图像采集

如图 1 所示,假设空间中的点 $p(x, y, z)$ 分别经过左右相机光心 C_l, C_r , 在相应的图像平面 Π_l, Π_r 上成像为 $p_l(x_l, y_l)$ 和 $p_r(x_r, y_r)$ 点。假设该系统满足线性结构^[4], 并且两个相机有相同的内部参数, 则由三角几何关系可得

$$\frac{x_l}{f} = \frac{-(h/2)+x}{z} \quad \frac{x_r}{f} = \frac{-(h/2)+x}{z} \quad (1)$$

式中 f 为焦距, h 为两相机光心水平距离, z 为 p 点到摄像机平面的距离, x 为水平距离。消去式 (1) 中的 x , 得

$$z(x_r - x_l) = hf$$

即

$$z = \frac{hf}{x_r - x_l}$$

当 h 和 f 的值确定后, 可以由两个相机图像中对应点的视差值 $(x_r - x_l)$ 求出空间点 $p(x, y, z)$ 的深度值 z ^[5]。

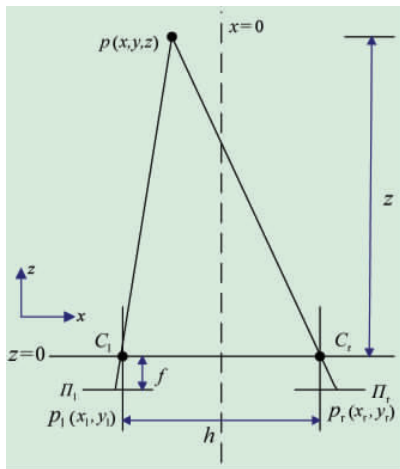


图 1 立体视觉视差与深度的关系

Fig. 1 Relationship between stereo vision parallax and depth

2 摄像机标定

图 2 表示了空间点 $p(x, y, z)$ 图像坐标系和三维世界坐标系之间的对应关系, 摄像机标定的目的是求出确定这种对应关系的相机内部参数和外部参数。

由小孔成像的基本原理, 可以得出点 $p(x, y, z)$ 由三维世界坐标系到计算机图像二维坐标系的坐标变换。最终可以得出像素坐标 (u_i, v_i) 和三维空间坐标 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 之间的关系式

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}$$

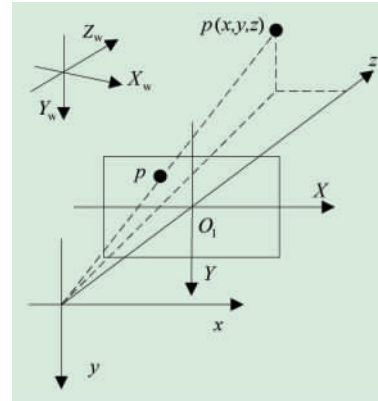


图 2 摄像机坐标系与世界坐标系

Fig. 2 Vidicon coordinate and world coordinate

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = M X_w \quad (2)$$

式中, R 为 3×3 正交矩阵, t 为三维平移向量, $\mathbf{0}$ 为 0 向量, m_{ij} 为透视变换矩阵 M 的元素, 任意空间点 P 在世界坐标系下的齐次坐标为 $X_w = (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)^T$, u_0 和 v_0 为摄像机的内部参数。整理消去比例因子 s_i 后, 得到关于 m_{ij} 的线性方程:

$$\begin{cases} X_{wi}m_{11} + Y_{wi}m_{12} + Z_{wi}m_{13} + m_{14} - u_i X_{wi}m_{31} - u_i Y_{wi}m_{32} - u_i Z_{wi}m_{33} = u_i m_{34} \\ X_{wi}m_{21} + Y_{wi}m_{22} + Z_{wi}m_{23} + m_{24} - v_i X_{wi}m_{31} - v_i Y_{wi}m_{32} - v_i Z_{wi}m_{33} = v_i m_{34} \end{cases} \quad (3)$$

$K_n =$

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_{w2} & -u_2 Y_{w2} & -u_2 Z_{w2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 & -v_2 X_{w2} & -v_2 Y_{w2} & -v_2 Z_{w2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n Z_{wn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$m = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33}]^T \quad (5)$$

$$U_n = [u_1 m_{34} \ v_1 m_{34} \ u_2 m_{34} \ v_2 m_{34} \ \cdots \ u_n m_{34} \ v_n m_{34}]^T \quad (6)$$

K_n 为 $2n \times 11$ 矩阵, U_n 为 $2n$ 维向量。假设靶标上有 n 个特征点, 并已知它们的空间坐标 $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) (i=1, 2, \dots, n)$ 及其图像点坐标 $(u_i, v_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 可以采用直接线性变换 (DLT) 方式解出 M 矩阵的元素。对于 n 个特征点, 有 $2n$ 个关于 M 矩阵元素的线性方程:

$$K_n m = U_n \quad (7)$$

当 $2n > 11$ 时, 可用最小二乘法求出上述线性方程组的解为

$$m = (K_n^T K_n)^{-1} K_n^T U_n \quad (8)$$

m 向量与 $m_{34}=1$ 构成所求解的矩阵。由 6 个以上已知空间点及其图像点坐标, 使用最小二乘法求解投影矩阵, 可以

降低误差造成的影响。求出投影矩阵后,可以根据式(2)求出摄像机的内部参数。

3 特征提取和立体匹配

寻找同一个世界坐标点在两幅图像中的成像位置是双目立体视觉的难点,解决这个难点就用到了立体匹配。目前图像立体匹配方法主要有基于解释的匹配、基于相位的匹配、基于区域(图像灰度)的匹配和基于特征的匹配^[6]。得到两个相机的内部和外部参数后,可以用极线几何理论和透视投影原理进行图像校正^[7-8],达到左右图像水平——对应的线性结构,降低了立体匹配的计算量,提高了精度。

立体匹配方法的关键在于正确地选择匹配特征,找出特征与特征之间的本质属性,建立稳定的匹配算法。如果将特征匹配与区域匹配相结合,可以形成一种基于极线约束的立体匹配方法,其基本过程如图3所示。

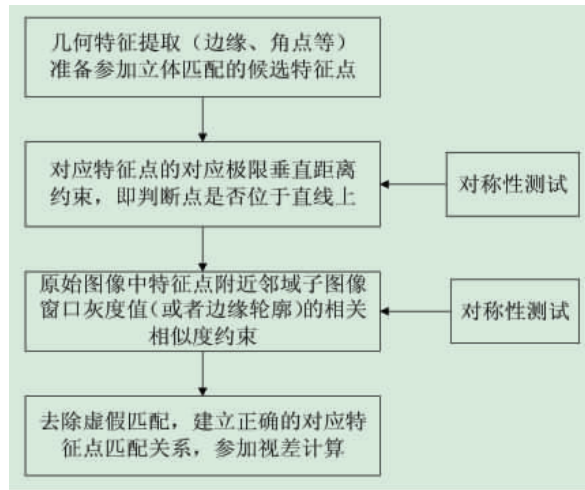


图3 立体视觉对应点的匹配

Fig. 3 Corresponding points matching of stereo

针对移动机器人作战平台场景特点,本文选择极限约束、区域匹配和特征匹配相结合的立体匹配方法。

4 三维坐标的计算

在立体视觉系统中,两个 CCD 摄像机的投影模型为

$$\begin{cases} s_1 p_i = M_l X_w \\ s_r p_i = M_r X_w \end{cases} \quad (9)$$

空间点在两幅图像中的齐次坐标分别为 $p_i(u_i, v_i, 1)$, $p_i(u_r, v_r, 1)$;左右摄像机的参数矩阵分别为 M_l, M_r ,空间点在三维世界坐标系中的齐次坐标为 X_w ,且 $X_w = (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)^T (i=1, 2, \dots, n)$,有

$$M_i = \begin{bmatrix} M_{i11} & M_{i12} & M_{i13} & M_{i14} \\ M_{i21} & M_{i22} & M_{i23} & M_{i24} \\ M_{i31} & M_{i32} & M_{i33} & M_{i34} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} M_{i11} & M_{i12} & M_{i13} & M_{i14} \\ M_{i21} & M_{i22} & M_{i23} & M_{i24} \\ M_{i31} & M_{i32} & M_{i33} & M_{i34} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9),并消去 s_1 和 s_r 得

$$\begin{cases} (M_{l11}-u_l M_{l31})X_w + (M_{l12}-u_l M_{l32})Y_w + (M_{l13}-u_l M_{l33})Z_w = u_l M_{l34} - M_{l14} \\ (M_{l21}-v_l M_{l31})X_w + (M_{l22}-v_l M_{l32})Y_w + (M_{l23}-v_l M_{l33})Z_w = v_l M_{l34} - M_{l24} \\ (M_{r11}-u_r M_{r31})X_w + (M_{r12}-u_r M_{r32})Y_w + (M_{r13}-u_r M_{r33})Z_w = u_r M_{r34} - M_{r14} \\ (M_{r21}-v_r M_{r31})X_w + (M_{r22}-v_r M_{r32})Y_w + (M_{r23}-v_r M_{r33})Z_w = v_r M_{r34} - M_{r24} \end{cases} \quad (12)$$

用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} M_{l11}-u_l M_{l31} & M_{l12}-u_l M_{l32} & M_{l13}-u_l M_{l33} \\ M_{l21}-v_l M_{l31} & M_{l22}-v_l M_{l32} & M_{l23}-v_l M_{l33} \\ M_{r11}-u_r M_{r31} & M_{r12}-u_r M_{r32} & M_{r13}-u_r M_{r33} \\ M_{r21}-v_r M_{r31} & M_{r22}-v_r M_{r32} & M_{r23}-v_r M_{r33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_l M_{l34} - M_{l14} \\ v_l M_{l34} - M_{l24} \\ u_r M_{r34} - M_{r14} \\ v_r M_{r34} - M_{r24} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)左式 4×3 矩阵为 M ,右式 4×1 向量为 b ,世界坐标系中空间点的坐标为 X_w ,则式(13)可以简写成

$$MX_w = b \quad (14)$$

用最小二乘法解式(14)得

$$X_w = (M^T M)^{-1} M^T b \quad (15)$$

因此,已知两摄像机参数矩阵和空间点在两幅图像中投影点的坐标(即通过立体匹配在两幅图像中找到的对应点的坐标),就可以通过式(14)求出空间点的三维坐标^[9]。

将式(15)分成两个矩阵:

$$\begin{bmatrix} M_{l11}-u_l M_{l31} & M_{l12}-u_l M_{l32} & M_{l13}-u_l M_{l33} \\ M_{l21}-v_l M_{l31} & M_{l22}-v_l M_{l32} & M_{l23}-v_l M_{l33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_l M_{l34} - M_{l14} \\ v_l M_{l34} - M_{l24} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} M_{r11}-u_r M_{r31} & M_{r12}-u_r M_{r32} & M_{r13}-u_r M_{r33} \\ M_{r21}-v_r M_{r31} & M_{r22}-v_r M_{r32} & M_{r23}-v_r M_{r33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r M_{r34} - M_{r14} \\ v_r M_{r34} - M_{r24} \end{bmatrix} \quad (17)$$

如图4所示,式(16)表示空间直线 $\overline{C_l p_1}$,式(17)表示空间直线 $\overline{C_r p_r}$,这两直线的交点 p 就是所求的空间点。由于摄像机标定及立体匹配存在着误差,因此 $\overline{C_l p_1}$ 与 $\overline{C_r p_r}$ 可能异面。 Q_1 为直线 $\overline{C_l p_1}$ 上的点, Q_2 为 $\overline{C_r p_r}$ 上的点,如图5所示。移动点 Q_1, Q_2 , 当 $\|Q_1 Q_2\|$ 值达到最小时, $\overline{Q_1 Q_2}$ 即为 $\overline{C_l p_1}$ 和 $\overline{C_r p_r}$ 的公

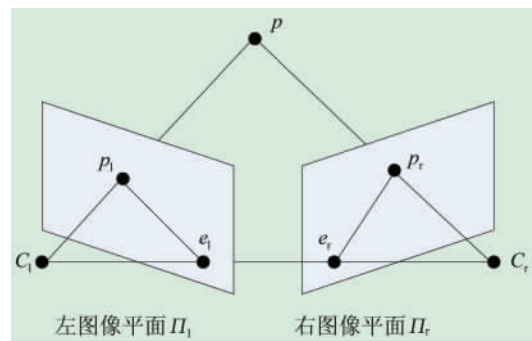


图4 空间点和图像点

Fig. 4 Spatial point and image point

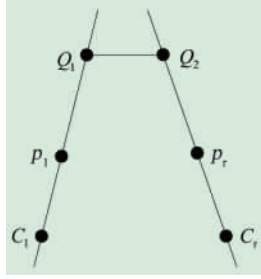


图 5 空间点坐标求取模型

Fig. 5 Model for special point

垂线,公垂线中点 $(Q_1+Q_2)/2$ 即为所求空间点坐标。由于 $\overline{Q_1Q_2}$ 为 $\overline{C_1P_1}$ 和 $\overline{C_2P_2}$ 的公垂线,可以得到

$$\begin{cases} \overline{C_1P_1} \cdot \overline{Q_1Q_2} = 0 \\ \overline{C_2P_2} \cdot \overline{Q_1Q_2} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

因此,可求出 Q_1, Q_2 值,从而可求 $\|\overline{Q_1Q_2}\|$ 大小,如果 $\|\overline{Q_1Q_2}\| < l$ (l 为设定阈值), $(Q_1+Q_2)/2$ 可以近似为所求空间点坐标。

5 试验和结果分析

本文的双相机立体视觉系统选用两台 KC-687C 相机,如图 6 所示,用底座将其固定,前后位置保持一致,光轴保持平行。选用 P4 个人计算机+Daheng VT1 系列图像采集卡。

以移动机器人作战平台(摄像机)所在点为世界坐标系的原点,对环境物体进行三维建模,三维建模步骤如图 7 所示。首先利用立体靶标对两个 CCD 相机进行标定,用 CCD 相机采集环境物体的图像,接着对采集到的图像进行滤波和特



图 6 双目图像采集装置

Fig. 6 Binocular image capturing device

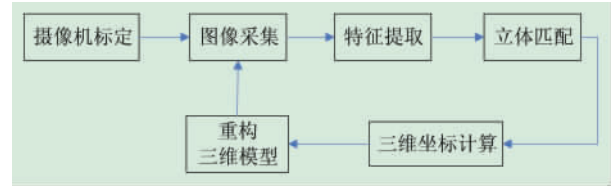


图 7 系统结构图

Fig. 7 Overview of the system

征提取,然后进行图像的立体匹配,最后计算出三维世界坐标,得到物体的三维点云图数据,对点云图数据利用 Open Inventor 进行可视化显示。如果机器人作战平台不移动,只能建立 2.5 维物体模型,但可以从不同角度观察环境物体,不影响对环境理解,如图 8 所示。如果机器人作战平台围绕环境物体移动,可以建立物体三维模型,如图 9 所示。由重构的三维模型所组成的虚拟环境增强了操控人员对环境物体的理解,即增强了临场感,从而提高移动机器人作战平台遥控操作的效率。

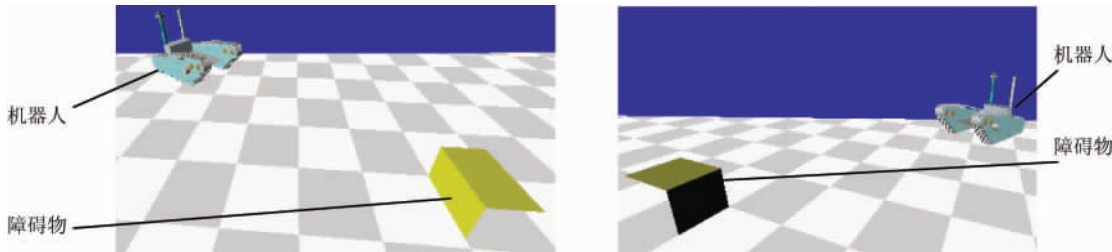


图 8 物体 2.5 维模型

Fig. 8 2.5-dimensional model for objects

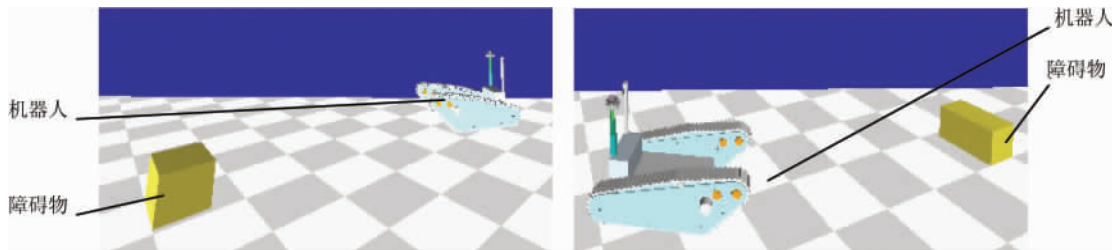


图 9 物体三维模型

Fig. 9 Three-dimensional model for objects

6 结论

从构建移动机器人作战平台立体视觉系统出发,提出其三维建模算法,并改进了三维空间点坐标的求解算法,提高了算法精度。采用 Open Inventor 对重构的三维点进行可视化显示,提高了编程的效率。对各个主要功能模块都进行了试验和仿真,验证了本文采用方法的可行性和正确性。

参考文献 (References)

- [1] 游素业. 立体视觉研究的现状与进展 [J]. 中国图象图形学报, 1997, 2 (1): 17-24.
You Suye. *Journal of Image and Graphics*, 1997, 2(1): 17-24.
- [2] Asada M, Tanaka T, Hosoda K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual stereoing[C]. International Conference on Multi-sensor Fusion and Integration for Intelligent System, Taiwan, China, 1999: 249-254.
- [3] 左爱秋, 吴江宁, 李世伦, 等. 双目体视检测多自由度机械装置位姿的工作原理和技术特点[J]. 测控技术, 1999, 18(4): 27-29.
Zuo Aiqiu, Wu Jiangning, Li Shilun, *et al.* *Measurement & Control*

Technology, 1999, 18(4): 27-29.

- [4] Olson C F, Abi-Rached H, Ming Y, *et al.* Wide-baseline stereo vision for Mars rovers [C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nevada, USA, 2003: 1302-1307.
- [5] Sonka M, Hlavac V, Boyle R, 等. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 316-318.
Sonka M, Hlavac V, Boyle R, *et al.* *Image processing, analysis and machine vision* [M]. 2nd ed. Beijing: Post & Telecom Press, 2003: 316-318.
- [6] 陈熙霖. 视觉计算——人类感知能力的延伸[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 7-14.
Chen Xilin. *Measurement & Control Technology*, 2000, 19(5): 7-14.
- [7] Fusiello A, Trucco E, Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. *Machine Vision and Applications*, 2000(12):16-22.
- [8] An L P, Jia Y D, Wang J, *et al.* An efficient rectification method for trinocular stereo vision [C]// Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04), 2004: 1051-4651.
- [9] 张广军. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zhang Guangjun. *Computer vision*[M]. Beijing: Science Press, 2005.

(责任编辑 岳臣)

第6届中国通信学会 学术年会

时 间: 2009年11月
地 点: 广东省深圳市

主办单位: 中国通信学会
承办单位: 中国通信学会学术工作委员会

信息通信技术创新发展与 信息产业融合

电子信箱: cicnh@tom.com
通信地址: 北京邮电大学287信箱 (100876)