

# 新型双目视觉系统定位<sup>①</sup>

潘峥嵘, 周立萍, 张 宁, 朱 翔

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

**摘 要:** 采用普通 CCD 摄像机设计一种新型双目视觉系统, 针对该系统定位精度不高的问题, 提出一种改进的投影算法对空间点进行定位. 该算法在原有投影算法的基础上增加显隐式畸变校正, 通过将校正后的参数代入到投影算法中进行位置坐标求取, 提高系统的定位精度. 实验结果显示: 在距离为 2600 mm 范围内, 世界坐标轴  $X_w$ 、 $Y_w$ 、 $Z_w$  三个方向的最大误差分别为 0.200 mm、2.300 mm、35.432 mm. 与单纯采用投影算法相比, 改进后的定位算法误差更小, 能够满足系统定位精度要求.

**关键词:** 摄像机标定; 视觉定位; 立体视觉; 移动机器人

## Localization of New Binocular Vision System

PAN Zheng-Rong, ZHOU Li-Ping, ZHANG Ning, ZHU Xiang

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A new type of binocular vision system was designed used common CCD cameras. Because of positioning accuracy is not high, the experiment used the modified projection algorithm to get the position messages. This algorithm joined the explicit-implicit distortion correction method in the projection algorithm. After correction, the positioning accuracy of the whole system was improved. The experimental results showed that: In the range of 2600 mm, three direction errors in the world coordinate axis  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  are 0.200 mm, 2.300 mm and 35.432 mm. Comparing projection algorithm, the errors of the improved positioning algorithm are smaller. The new method can satisfy the system accuracy requirements.

**Key words:** camera calibration; visual orientation; stereo vision; mobile-robot

机器人双目视觉系统模拟人眼的感知功能, 具有检测范围广, 检测目标信息完整等优点, 已成为机器人智能化的重要标志<sup>[1]</sup>. 目前, 国内外的双目视觉设备大多安装在机器人本体上, 机器人移动时, 视觉系统必然跟着移动. 这种方式不但加重视觉系统的负担, 而且进一步影响机器人的运行效率.

本文设计一种新型双目视觉系统, 该系统采用普通的 CCD 摄像头搭建, 在结构上减轻视觉系统处理负担. 但由于普通摄像机的镜头畸变较大, 实际定位过程中精度往往达不到要求. 目前定位研究中大多采用最小二乘法<sup>[2]</sup>计算空间位置, 但实验表明效果并不是很理想. 李瑞峰李庆喜<sup>[3]</sup>等提出一种投影方法, 该方法能够准确的计算出物体的位置坐标, 但该方法对摄

像机的像素要求较高, 不适于本视觉系统的研究. 为满足本系统定位精度要求, 本文采用一种改进的投影算法对空间位置进行定位. 首先设计双目视觉系统平台, 在结构上提高系统性能, 再介绍改进定位算法的基本原理, 最后进行了实验并对结果进行分析.

## 1 视觉系统结构及测量原理

### 1.1 系统结构

图 1 为双目视觉系统平台. 平台中采用视觉设备与机器人分离的方式, 将摄像头固定于室内高处, 从场景上方俯视场景信息. 采集前要对移动机器人进行标识, 以便于对机器人自身的识别. 图像采集设备采集到图像信息, 通过无线通信模块实时传送给移动机

<sup>①</sup> 基金项目: 甘肃省科技计划(1011NKCA071)

收稿时间: 2012-12-20; 收到修改稿时间: 2013-01-21

机器人. 机器人接收信息, 并用自身携带的 PC 机进行处理, 最终为机器人提供导航信息.

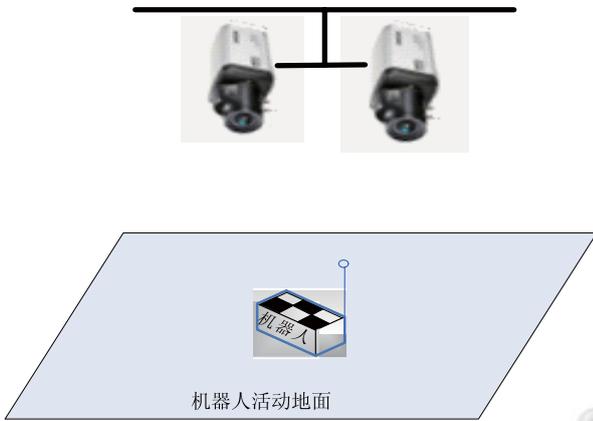


图 1 双目视觉系统平台

### 1.2 摄像机标定

本文采用针孔摄像机模型<sup>[4,5]</sup>对摄像机进行标定. 摄像机坐标与世界坐标的对应关系为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = A [R \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $s$  为任意测量因子,  $(u, v)$  为场景中一点到摄像机平面上的理想投影坐标,  $R$  为  $3 \times 3$  矩阵(正交单位矩阵),  $t$  为三维平移向量,  $A$  为  $3 \times 3$  矩阵,  $f_x, f_y, u_0, v_0$  为摄像机的内部参数,  $R$  和  $T$  描述摄像机与世界坐标系间的关系, 是摄像机的外部参数. 在该模型下利用张正友<sup>[6-8]</sup>标定算法完成摄像机内外参数求取.

### 1.3 双目视觉标定

双目视觉原理图如图 2 所示,  $P$  为空间一点,  $P_1$  和  $P_2$  为点  $P$  在两摄像机平面的投影. 由单目视觉原理可以得到两摄像机拍摄同一点坐标模型:

$$\begin{cases} s_1 \tilde{p}_1 = A_1 [R_1 \ T_1] \tilde{P} = H_1 \tilde{P} \\ s_2 \tilde{p}_2 = A_2 [R_2 \ T_2] \tilde{P} = H_2 \tilde{P} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $P$  坐标为  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,  $P$  点在摄像机平面上的投影坐标为  $p_1(u_1, v_1)$ 、 $p_2(u_2, v_2)$ , 对应的齐次坐标为  $\tilde{P} = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$  和  $\tilde{p}_1 = [u_1 \ v_1 \ 1]^T$ ,  $\tilde{p}_2 = [u_2 \ v_2 \ 1]^T$ ,  $B$  表示两摄像机间距离.

两摄像机齐次坐标表示为  $\tilde{M}_{c1}$  和  $\tilde{M}_{c2}$ , 两摄像机与空间一点坐标间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} P_{c1} = R_1 P + T_1 \\ P_{c2} = R_2 P + T_2 \end{cases} \quad (3)$$

则

$$P = R_1^{-1}(P_{c1} - T_1) = R_2^{-1}(P_{c2} - T_2) \quad (4)$$

$$P_{c2} = R_2 R_1^{-1}(P_{c1} - T_1) + T_2 = R_2 R_1^{-1} P_{c1} - R_2 R_1^{-1} T_1 + T_2 \quad (5)$$

其中旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$  分解如下:

$$\begin{cases} R = R_2 R_1^{-1} \\ T = T_2 - R T_1 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中给出了左右摄像机在方位上的关系,  $R$  为双目摄像机结构参数旋转矩阵,  $T$  为结构参数平移矩阵. 参照张正友利用标定棋盘格的方法, 通过变换摄像机或者棋盘格平面的方位建立关于摄像机内参和外参的方程, 进一步求解出摄像机的内外参数, 完成摄像机标定<sup>[9]</sup>.

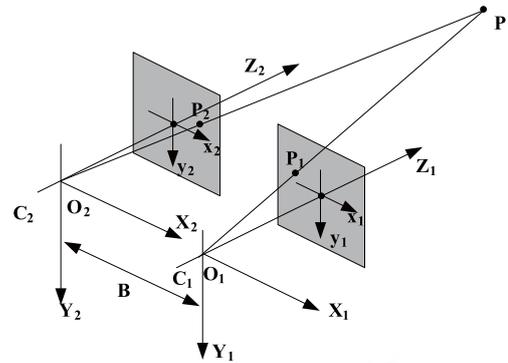


图 2 双目视觉原理图

## 2 定位方法研究

### 2.1 投影定位方法

规定摄像机 1 的坐标系为世界坐标系, 则两摄像机间关系有  $s_1 \tilde{p}_1 = A_1 P$ ,  $s_2 \tilde{p}_2 = H_2 \tilde{P}$ . 由 2.2 的方法, 可以求出摄像机的内外参数, 得到  $H_2$  的值. 为求解空间内一点的世界坐标值, 很多研究者都采用最小二乘法对(8)式进行求解获得, 文献[3]采用投影法对空间点坐标进行求取, 即将空间点到两摄像机中心的射线投影到  $X_w O Z_w$  平面, 通过几何关系获得关于  $X_w$  和  $Z_w$  的方程组, 进一步求得  $X_w$  和  $Z_w$  的值, 再通过解析运算得到  $Y_w$  的坐标. 为了使本系统能够满足实时性和高效率的要求, 采用投影法对空间内点的坐标进行求取, 首先设

$$H_2 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则

$$\begin{cases} a_{11}X_w + a_{12}Y_w + (a_{13} - u_1)Z_w = 0 \\ a_{22}Y_w + (a_{23} - v_1)Z_w = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (h_{11} - h_{31}u_2)X_w + (h_{12} - h_{32}u_2)Y_w + (h_{13} - h_{33}u_2)Z_w = h_3u_2 - h_{14} \\ (h_{21} - h_{31}u_2)X_w + (h_{22} - h_{32}u_2)Y_w + (h_{23} - h_{33}u_2)Z_w = h_3v_2 - h_{24} \end{cases} \quad (8)$$

由(8)和(9)式消去  $Y_w$  得

$$\begin{cases} a_{11}X_w + \left[ \frac{a_{12}(a_{33}v_1 - a_{23})}{a_{22}} + a_{13} - u_1 \right] Z_w = 0 \\ [(h_{21} - h_{31}v_2)(h_{12} - h_{32}u_2) - (h_{22} - h_{32}v_2)(h_{11} - h_{31}u_2)]X_w \\ + [(h_{23} - h_{33}v_2)(h_{12} - h_{32}u_2) - (h_{22} - h_{32}v_2)(h_{12} - h_{32}u_2)]Z_w \\ = (h_{12} - h_{32}u_2)(h_{34}v_2 - h_{24}) - (h_{22} - h_{32}v_2)(h_{34}u_2 - h_{14}) \end{cases} \quad (9)$$

通过代入校正后的图像坐标  $(u_1, v_1)$ 、 $(u_2, v_2)$  及摄像机内外参数可以解方程组(9), 求出  $X_w$  和  $Z_w$ , 再结合(7)式中就可以求出  $Y_w$  的值, 从而求得空间点的坐标。

### 2.2 改进投影方法

由于实验中采用的镜头产生的畸变<sup>[10,11]</sup>较大, 实验表明通过投影法测得的结果并不理想. 从上述投影方法看出, 校正环节较为关键, 必须选用一种有效的方法对图像畸变进行校正. 文献[10]提出一种显隐式畸变校正方法, 具有良好的校正效果. 本文采用显-隐式校正与投影算法相融合的方法进行定位. 首先, 建立显隐式校正模型:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u + u(k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1uv + p_2(r^2 + 2u^2)}{(l_1r^2 + l_2u + l_3v + l_4)r^2 + 1} \\ v' &= \frac{v + v(k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1(r^2 + 2u^2) + 2p_2uv}{(l_1r^2 + l_2u + l_3v + l_4)r^2 + 1} \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $(u, v)$  为实测坐标值.  $k_1, k_2, p_1, p_2$  为摄像机标定的畸变参数, 摄像机标定中提取了 12 个标定点图像坐标的实测值  $(u_i, v_i)$  ( $1 \leq i \leq 12$ ), 理想值  $(u'_i, v'_i)$  ( $1 \leq i \leq 12$ ), 给定 3 个向量  $U_i, V_i, T_i$ :

$$U_i = \begin{bmatrix} u'_i r_i^4 \\ u'_i u_i r_i^3 \\ u'_i v_i r_i^2 \\ u'_i r_i^2 \end{bmatrix}, \quad V_i = \begin{bmatrix} v'_i r_i^4 \\ v'_i u_i r_i^3 \\ v'_i v_i r_i^2 \\ v'_i r_i^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_i = [U_i, V_i, \dots, U_i, V_i, \dots, U_n, V_n]^T \quad (12)$$

其中  $r_i^2 = u_i^2 + v_i^2$ . 4 个隐式校正因子组成的向量  $p$  为:

$$p = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T \quad (13)$$

设向量  $e$  为:

$$e = [A_1 - u'_1, B_1 - v'_1, \dots, A_N - u'_N, B_N - v'_N]^T \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_i &= u_i + u_i(k_1r_i^2 + k_2r_i^4) + 2p_1u_iv_i + p_2(r_i^2 + 2u_i^2) \\ B_i &= v_i + v_i(k_1r_i^2 + k_2r_i^4) + 2p_1(r_i^2 + 2u_i^2) + 2p_2u_iv_i \end{aligned} \quad (15)$$

根据(14)中, 向量  $e, T, p$  之间应满足如下关系:

$$e = Tp. \quad (16)$$

通过最小二乘法求出

$$p = (T^T T)^{-1} T^T e \quad (17)$$

进而求得隐式校正模型, 由真实坐标可以求出理想坐标  $(u'_i, v'_i)$ , 从而完成校正. 通过将完成校正的  $(u_i, v_i)$  代入(9)式中, 进而求出空间点的坐标. 因此, 空间点定位过程如下:

- ① 固定摄像机, 建立摄像机数学模型;
- ② 采集场景图像, 并进行标定求取视觉系统的内外参数;
- ③ 通过采用显-隐式校正与投影算法相融合的方法进行空间点坐标确定, 进而完成定位.

### 3 实验结果与分析

实验中采用两个三星的 SDC-410 的 CCD 摄像头进行图像信息采集, 并通过 matlab 软件对采集图像进行处理, 并提取标定模板中黑色方块的四个角点为有效标定点, 使用边长为 27.5 mm 方格组成  $9 \times 7$  的方阵构成模板, 用 A4 纸打印出棋盘格模板, 并固定于平板上. 固定双目摄像机系统, 采集模板不同位姿图像. 每个摄像机拍摄远近两组各 14 幅照片.



图 3 实验中拍摄的一组图像

对摄像头与物体距离为 855 mm、1100 mm、1430 mm、1680 mm、2140 mm、2330 mm 及 2650 mm 的情况进行测量, 每组测量中取照片的同位置的 12 个点作为测量点. 由于篇幅有限, 仅列出部分角点坐标如表 3 所示, 从表中可知, 相邻角点的在  $X$  轴和  $Y$  轴上的间距基本满足 27.5 mm, 各点的  $Z$  值基本相同. 经计算, 不同距离的各坐标轴上的平均相对误差、绝对误差以

及最大误差如表 4 中所示. 可以看出, 随着距离的增加, 各个坐标轴上的相对误差和绝对误差逐渐增大.

图 4 为运用投影法和改进后方法进行测量时的绝对误差、最大误差、以及相对误差的对比, 从图中可以看出, 改进后, 测得的结果的误差更小.

表 1 摄像机内部参数标定值

参数/mm	摄像机 1	摄像机 2
$f_x$	736.805	736.643
$f_y$	736.821	737.332
$u_0$	354.494	360.165
$v_0$	325.499	306.364

$k_1$	0.176	0.179
$k_2$	-0.925	-0.902
$p_1$	0.001	-0.010
$p_2$	-0.033	-0.301

表 2 双目摄像机外参标定值

	R	T/mm	B/mm
	0.999 9	-0.014 6	-0.0005
		3.547 54	
	0.014 3	0.989 0	-0.1474
			-44.286 56
	0.002 6	0.147 4	0.9891
			-16.839 50

表 3 改进后实测距离与各角点的坐标

距离	1680 mm	2140 mm	2330 mm	2650 mm
(1,1)	(-76.17,219.02,1695.71)	(47.22,242.43,2148.31)	(-202.30,-126.97,2314.41)	(136.00,-139.20,2688.72)
(1,8)	(-268.50,224.37,1701.83)	(-145.26,-242.91,2150.43)	(-394.51,116.39,2315.74)	(-56.31,-137.30,2695.53)
(2,2)	(-104.46,192.33,1695.22)	(19.68,-215.05,2150.48)	(-228.26,-98.03,2313.28)	(108.70,-111.80,2684.84)
(4,4)	(-161.02,-138.95,1694.17)	(-35.41,-160.30,2154.52)	(-280.17,40.15,2310.99)	(53.88,-57.19,2676.83)
(6,1)	(-80.21,81.75,1688.84)	(46.99,-105.20,2156.85)	(-194.79,10.16,2307.82)	(136.53,-3.94,2664.14)
(6,8)	(-272.54,87.11,1694.85)	(-145.50,-105.68,2159.32)	(-387.00,20.75,2309.13)	(-55.91,-1.97,2670.81)

#### 4 小结

针对新型视觉系统测量误差较大的问题, 本文提出一种改进的投影算法. 改进后, 在距离为 2600 mm 范围内, 世界坐标轴  $X_w$ 、 $Y_w$ 、 $Z_w$  三个方向的误差分别为 0.200 mm、2.300 mm、35.432 mm. 与单纯采用投影

算法相比, 改进后的定位算法误差更小, 能够满足系统定位精度要求. 由图 4 可以看出, 随着距离的增大, 系统的绝对误差, 最大误差以及相对误差逐渐增大, 因此今后的工作主要在提高远距离测量的精度问题.

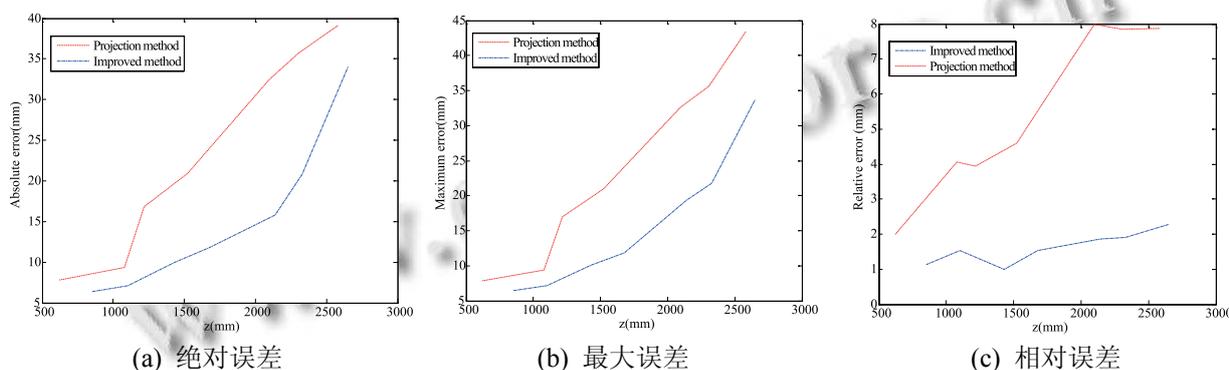


图 4 Z 轴方向的误差

#### 参考文献

- 1 祝琨, 杨唐文, 阮秋琦, 等. 基于双目视觉的运动物体试跟踪与测距. 机器人, 2009, 30(4): 327-334.
- 2 Forsyth DA, Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Prentice Hall PTR, 2011.
- 3 李瑞峰, 李庆喜. 机器人双目视觉系统的标定与定位算法. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11): 1719-1722.
- 4 Yang RQ, Yang W, Chen YZ, et al. Geometric calibration of IR camera using trinocular vision. Journal of Light Wave Technology, 2011, 29(24): 3797-3803.
- 5 张瑞森, 刘冀伟. 基于双目机器人的实时测距与追踪系统. 电子器件, 2007, 30(5): 1618-1621.

(下转第 112 页)

从实验结果图 4, 可以看出, 对于同一数据集, 增加 TaskTracker 节点数量, 可以有效地提高推荐算法的效率. 而且相比较下计算数据集较大, Hadoop 集群的大小影响越明显. 因为对 Hadoop 集群进行扩展只需要将新的 TaskTracker 节点地址添加到 Hadoop 的 slaves 列表中, 所以在 Hadoop 平台实现协同过滤推荐算法, 能够有效地克服算法本身数据稀疏性和可扩展性问题. 通过实验, 发现 MapReduce 框架下实现协同过滤推荐算法存在着一个缺点, 即在每次的计算中, 多需要对数据源进行初始化, 这个过程耗费一定的计算时间, 从而影响了推荐算法的实时响应性.

## 5 总结

本文提出了一种基于 Hadoop 平台对协同过滤推荐算法实现的研究, 试图通过云计算平台实现推荐算法的分布式计算, 从而克服算法本身数据稀疏性及可扩展性问题. 与基于单机实现协同过滤推荐算法的方法相比, 应用 Hadoop 云计算平台, 不仅可以更适用存储稀疏性数据的分布式数据库 HBase 代替传统关系数据库 RDBMS, 还能结合 MapReduce 编程框架实现算法的并行计算. 实验数据表明, 在采用多台 PC 机组成的 Hadoop 集群通过增加计算节点能够有效减少计算时间. 随着计算数据规模的增加, 可以廉价动态地扩展集群的计算能力.

## 参考文献

- 1 范波,程久军.用户间相似度协同过滤推荐算法.计算机学报, 2012(1).
- 2 Sarwar MB. Sparsity, scalability and distribution in recommender systems [Ph.D dissertation]. University of Minisota, 2001.
- 3 张锋,常会友.使用 BP 神经网络缓解协同过滤推荐算法的稀疏性问题.计算机研究与发展,2006:(4).
- 4 Sarwar B, Karypis G, Konstan Jet. Item-Based Collaborative Filtering Recommendation Algorithms C. Proc. of the 10th International World Wide Web Conference. New York 2001: 285-295.
- 5 The Apache Hadoop project.http://Hadoop.apache.org/.
- 6 Dean J, Ghemawat S. MapReduce: Simplified data processing on large cluseters. Communications of the ACM, 2005,51(1): 107-113.
- 7 Brees J, Hecherman D, Kadie C. Empirical analysis of predictive algorithms for collaborative filtering. Proc. of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI'98). 1998:43-52.
- 8 季响.基于协同过滤推荐算法电影网站的构建[学位论文].哈尔滨工业大学,2009.
- 9 White T,曾大聘,周傲英.Hadoop 权威指南.北京:清华大学出版社,2010.9-10.
- 10 Miller BN, Albert I, Lam S K, et al. MovieLens unplugged: experiences with an occasionally connected recommender system. Proc. of the Conference on Human Factors in Computing Systems. 1995:210-217.
- 11 The Apache HBase project.http://hbase.apache.org/.
- 12 陆嘉恒.Hadoop 实战.北京:机械工业出版社.245-246.
- 6 Zhang ZY. Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations. Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision, 1999,11(1):666-673.
- 7 Zhang ZY. MEMBER S.A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Trans. on Pattern Analysis And Machine Intelligence, 2000,22(11):1330-1334.
- 8 马颂德,张正友.计算机视觉.北京:科学出版社,1998.
- 9 Steve V. Binocular vision-based augmented reality system with an increased registration depth using dynamic correction of feature positions. Virtual Reality, Proc. IEEE, 2003: 271-272.
- 10 于舒春,朱延河,闫继红,等.基于新型双目机构的立体视觉系统标定.机器人,2007,29(4):353-362.
- 11 Heikkila J, Silven O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. Proc. of the IEEE Computer Society Conference on ComputerVision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1997:1106-1112.

(上接第 116 页)