

# 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究

徐巧玉<sup>1</sup> 车仁生<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003; <sup>2</sup> 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出了一种基于测量与校准功能合一的光学测棒的立体视觉坐标测量系统。采用光学测棒作为成像目标, 通过任意放置的两台摄像机获取测棒上的发光特征点的图像实现被测物体三维坐标的测量, 同时利用测量数据定期对两台摄像机外部方位参数进行校准。深入研究了测棒内部参数和外部方位参数校准过程中的校准条件和校准算法的设计, 以及系统测量建模等关键技术, 提出了相应的解决方案, 减小了摄像机内外参数校准及测量模型对测量结果的影响, 提高系统的测量精度。实验结果表明, 该系统的最大测量误差为 0.11 mm。

**关键词** 立体视觉测量; 光学测棒; 摄像机校准; 对极线约束

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2181

## Study of Stereo Vision Coordinate Measurement System Based on Optical Probe

Xu Qiaoyu<sup>1</sup> Che Rensheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electromechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China  
<sup>2</sup> Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The paper proposes a stereo vision coordinate measurement system based on optical probe with the function of measuring and calibrating. The system adopts the probe as the imaging object and obtains the three-dimensional (3D) coordinate of the measured object by the images of the optical features on the optical probe got by the two cameras arbitrarily placed. During the measuring process, the extrinsic calibration parameters of the two cameras are calibrated termly with the measurement data. The key techniques, including the design of the calibration patterns and calibration algorithms of the camera intrinsic parameters and the extrinsic parameters online calibration of two cameras, and stereo vision measurement modeling, are studied. The corresponding schemes to reduce the effect of camera extrinsic and intrinsic parameters calibration and measurement modeling and improve precision are presented. The experimental results show the maximum error is 0.11 mm.

**Key words** stereo vision measurement; optical probe; camera calibration; epipolar constraint

## 1 引言

近年来,随着光电技术、图像处理技术的发展,基于视觉的大尺寸坐标测量技术得到了很大的发展<sup>[1~8]</sup>,其中基于光学测棒的视觉坐标测量系统由于克服了传统的视觉坐标测量系统受被测物体的依赖性强,测量精度低,测量范围受限制等弱点,成为了研究重点。哈尔滨工业大学测控技术与质量工程研究所,对基于测棒成像的视觉坐标测量方法进行了研究,并在 1998 年研制出实验样机<sup>[9~12]</sup>。另外,

天津大学也在该方面进行了大量研究<sup>[13,14]</sup>。但是这些基于测棒的视觉测量系统仍存在以下两方面的问题:首先,系统各组成部分之间是开放的、无强制性约束,这种开放性导致了系统结构状态的不稳定性,易受外界干扰的破坏,导致错误的测量结果;其次,视觉测量系统以摄像机摄取的被测物体的二维图像为基础经变换得到被测物体的三维信息,所以二维图像特征的提取、摄像机内部参数及两台摄像机外部方位参数的精确校准,以及系统建模都会影响

**收稿日期**: 2008-02-15; **收到修改稿日期**: 2008-06-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(50275040)资助课题。

**作者简介**: 徐巧玉(1979-),女,博士研究生,主要从事计算机视觉、视觉测量和图像处理等方面的研究。

E-mail: xiaoyu0622@163.com

**导师简介**: 车仁生(1939-),男,教授,博士生导师,主要从事视觉静态与动态三维测试技术等方面的研究。

E-mail: crs@hope.hit.edu.cn

系统的精度,因此系统的测量精度很难得到保证。

针对当前视觉测量存在的测量系统结构状态不稳定及如何提高测量系统精度问题,提出了一种基于测量与校准功能合一的光学测棒的立体视觉坐标测量系统,对影响系统测量精度的各个关键技术进行了深入研究,提出了相应的解决方案。

## 2 测量系统的总体设计方案

主要研究思路是采用一种基于光学测棒的视觉测量方案:即把内参数经过精确校准的两台摄像机摆放在被测件的附近或四周,使视场覆盖整个工件,通过光学测棒实现摄像机外部方位参数的现场校准及测量过程中系统结构状态的监控;通过光学测棒对被测件进行逐点测量和图像处理及相关的一系列计算,得到被测点的三维坐标。立体视觉测量系统的结构框图如图 1 所示。

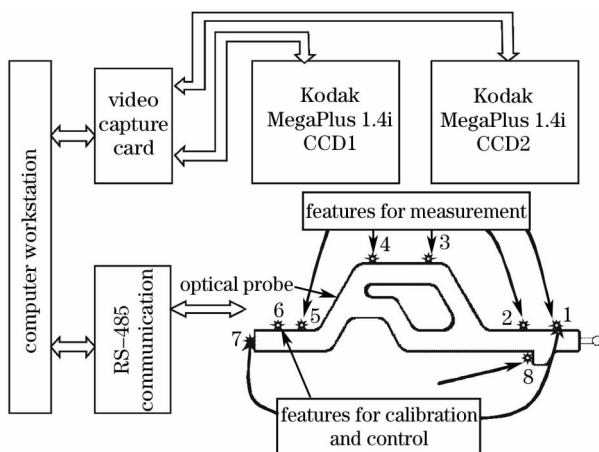


图 1 立体视觉坐标测量系统框图

Fig. 1 Block diagram of the stereo vision coordinate measurement system

1) 图像采集部分:包括两台已精确校准的高分辨率摄像机和双路图像采集卡,主要完成图像的同步曝光控制和采集任务。

2) 光学测棒:光学测棒是整个视觉测量系统的成像目标,是被测表面三维信息的载体,不仅用于实现两台摄像机外部方位参数的现场校准,被测点空间坐标的接触测量,而且还用于测量过程系统结构状态的实时监控。测棒上共安装 8 个波长为 950 nm 的红外发光二极管(IR LED)作为空间特征点,为了降低背景噪声的影响,提高特征像点定位精度,在两台摄像机镜头上安装了 850 nm 的前截止高通滤光片以滤除可见光,同时通过 RS(推荐标准)-485 总线控制测棒上特征点的发光亮度,使整个测量范围内获得均匀一致的特征像点。

3) 便携式工业控制计算机:主要实现系统测量相关的所有算法软件及通讯控制功能等。

立体视觉测量系统原理如图 2 所示,由 1 和 6、7 和 8 号两组特征点实现两台摄像机的外部参数现场校准,由 1、2、3、4 和 5 号特征点实现被测点三维坐标的测量,由 1 和 6 特征点实现系统结构状态的监控。系统测量过程使用了四个坐标系:世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ , 又称空间坐标系统;左摄像机坐标系  $O_{cl} X_{cl} Y_{cl} Z_{cl}$  和右摄像机坐标系  $O_{cr} X_{cr} Y_{cr} Z_{cr}$ , 为了简化,假设世界坐标系与左摄像机坐标系重合;像面坐标系  $o_l x_l y_l$  和  $o_r x_r y_r$  和测棒坐标系  $O_p X_p Y_p Z_p$ 。

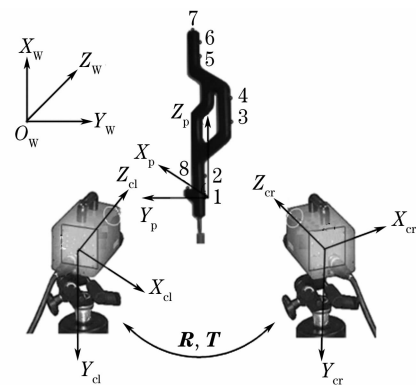


图 2 立体视觉测量原理

Fig. 2 Principle of stereo vision measurement system

通过测棒上 1、2、3、4 和 5 号特征点实现被测点(即测头  $T_p$ )三维坐标的测量具体分为以下四个步骤:

1) 两台摄像机外部方位参数现场校准。把内参数精确校准的两台摄像机摆放在被测件的附近或四周,使视场覆盖整个工件,然后通过光学测棒上 1 和 6、7 和 8 号两组特征点分别在测量范围内沿宽度和深度方向多次成像,从而实现两台摄像机的外部参数现场校准。

2) 确定 5 个特征点在世界坐标系下的坐标。由两台摄像机的内部参数矩阵  $\mathbf{K}$  和  $\mathbf{K}'$ , 两台摄像机之间的外部方位参数(旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $\mathbf{T}$ ), 以及两像平面上特征点质心坐标  $m_{li}$  和  $m_{ri}$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ), 由立体视觉测量模型得到特征点在世界坐标系下的坐标  $M_{wi}$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ )。

3) 测棒坐标系与世界坐标系之间的姿态估计。由 5 个特征点在测棒坐标系下的坐标值  $M_{pi}$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 以及  $M_{wi}$  确定两坐标系之间的姿态。特征点在测棒坐标系下的坐标值  $M_{pi}$  由精密型三坐标测量机和高倍显微镜进行精确校准。

4) 确定测头在世界坐标系下的坐标。根据两

坐标系之间的姿态估计,以及测头在测棒坐标系下的坐标值确定测头在世界坐标系下的坐标,即被测点的坐标值。

### 3 系统关键技术

#### 3.1 摄像机内参校准

摄像机校准过程就是确定表征被测三维空间点与对应的二维图像点之间几何模型的像机参数的过程。为了提高视觉测量系统的性能,必须对摄像机参数进行精确校准,减小摄像机参数的校准精度对视觉测量系统的测量精度的影响。

假设空间点  $X_w$  在像平面上的理想成像点为  $x_u$ ,而实际透视畸变后的成像点为  $x_d$ ,确定像机几何建模的过程可以描述为以下三个步骤,如图 3 所示:世界坐标到摄像机坐标的变换;摄像机坐标到成像平面坐标的变换;考虑镜头的畸变,将非畸变的坐标变换为畸变坐标。本文只考虑径向畸变的前两项和切向畸变。因此像机内参数包括:有效焦距  $f$ ,  $\alpha=f/d_x, \beta=f/d_y$ ,其中  $d_x, d_y$  分别为横轴和纵轴方向的单位像素尺寸,  $d_x=d_y=0.0068 \text{ mm/pixel}$ ;像面主点坐标  $(u_0, v_0)$ ;图像两坐标轴的扭曲参数  $\gamma$ ;径向畸变修正系数  $(k_1, k_2)$ ;切向畸变修正系数  $(p_1, p_2)$ 。

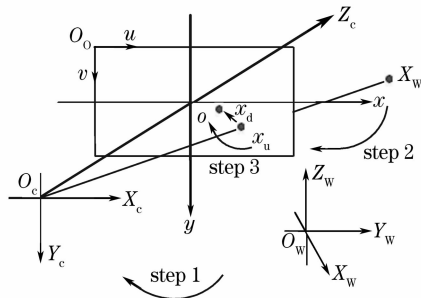


图 3 摄像机成像模型

Fig. 3 Camera imaging model

针对目前像机内参校准模板加工和校准困难的缺点,根据溯源的思想提出了基于虚拟校准模板的校准控制点到对应反投影射线距离最小的摄像机内参数校准方法,采用线性和非线性估计结合的方法校准摄像机参数<sup>[15]</sup>。在校准实验中,将波长为 950 nm 的红外发光二极管 SE3470 固定在三坐标测量机的测头立柱上,发光二极管随立柱在其测量空间内沿宽度、高度及深度方向按规定的步长移动,构成虚拟的立体校准模板。校准过程中首先利用直接线性转换模型得到投影矩阵,分别求出摄像机非畸变内参数和外参数;然后将得到的校准参数作为初

始值,通过最小化校准控制点到对应反投影射线的距离获得所有校准参数的最优估计,其表达式为

$$\min \sum_{i=1}^n d_i(K, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{R}, \mathbf{T}, M_i), \quad (1)$$

式是  $\sum_{i=1}^n d_i(K, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{R}, \mathbf{T}, M_i)$  为空间点  $M_i$  到对应反投影射线  $Om_i$ (由像点和像机中心构成)的距离。本文采用 Levenberg-Marquardt (LM) 迭代算法<sup>[16,17]</sup>获得此函数的最优解。该方法克服了立体校准模板加工和校准困难的缺点,利用坐标测量机定位的高精度可获得理想的立体空间校准点,并且由于以校准控制点到其反投影射线之间的距离作为最小化目标函数,从而保证了空间距离误差最小,提高了校准精度。

#### 3.2 两台摄像机外参校准

两台摄像机外部方位参数精确校准也是影响立体视觉测量系统精度的另一个重要因素。如图 4 所示,空间点  $M$  在两台摄像机坐标系下的坐标分别为  $M_{cl}(X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})$  和  $M_{cr}(X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})$ ,在两像平面上分别所成的图像点为  $m_1$  和  $m_r$ 。外参校准所解决的问题就是根据两个摄像机坐标系下点的对应关系,确定它们之间的旋转以及平移变换,其关系表达式为

$$M_{cr} = \mathbf{R}M_{cl} + \mathbf{T}, \quad (2)$$

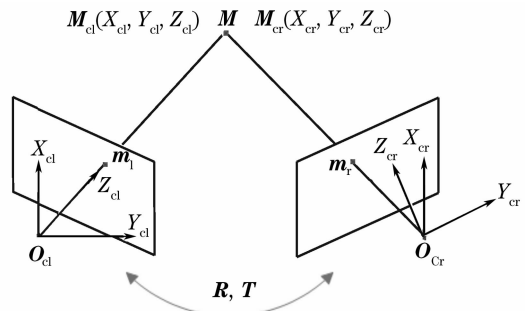


图 4 立体视觉系统成像模型

Fig. 4 Imaging model of the stereo vision system

基于研制的特殊结构的光学测棒,以测棒上两特征点之间的已知距离和立体视觉对极线约束为基础,提出了两点式摄像机外部方位参数现场校准技术<sup>[18]</sup>。通过在测量范围内的不同位置和方位沿宽度和深度方向移动光学测棒,利用测棒上 1 和 6,7 和 8 号两组特征点分别沿宽度和深度方向多次成像,基于匹配的特征点以及对极线约束快速地校准立体视觉测量系统,并根据测棒上两特征点间的已知距离确定两台摄像机之间平移矢量的比例因子。

对于空间点  $M$  在两像平面上的图像点  $m_1 =$

$(x_1, y_1, 1)^T$  和  $m_r = (x_r, y_r, 1)^T$ , 有

$$m_r^T F m_1 = 0, \quad (3)$$

式中  $F$  为基础矩阵, 包含了两台摄像机的内参数和外部方位参数。假设两台摄像机的投影矩阵分别为  $P = K[I | 0]$  和  $P' = K'[R | T]$ , 那么基础矩阵的表达式为

$$F = K'^{-T} [T]_{\times} R K^{-1}, \quad (4)$$

式中  $[T]_{\times}$  为  $T$  的反对称矩阵,  $[T]_{\times} R = T \times R$ 。

Louquet-Higgins 提出了本质矩阵  $E$  的概念<sup>[19]</sup>, 它是基础矩阵的特例, 与基础矩阵的关系为

$$E = [T]_{\times} R = K^T (K'^{-T} [T]_{\times} R K^{-1}) K = K^T F K, \quad (5)$$

若两台摄像机的内部参数  $K, K'$  和基础矩阵已知, 在相差一个比例因子的情况下, 可确定本质矩阵  $E$ 。

由(5)式可知, 两台摄像机的相对位置关系与本质矩阵几乎等价。

把  $E$  进行特征值分解, 在相差比例因子的情况下确定  $R$  和  $T$ , 其表达式为<sup>[20]</sup>

$$R \approx UQV^T \text{ or } R \approx UQ^T V^T, \quad [T]_{\times} = VZV^T, \quad (6)$$

$$\text{式中 } Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad U, V \text{ 均}$$

为  $E$  的特征值分解。

利用测棒上 1 和 6, 7 和 8 号两组特征点分别沿宽度和深度方向多次成像, 由(3)式得到基础矩阵, 由(6)式在相差比例因子的情况下确定  $R$  和  $T$ , 然后再根据 1 和 6, 7 和 8 特征点之间的距离来确定比例因子  $s$ :

$$s = (n_1 d_w + n_2 d_d) / \left( \sum_{i=1}^{n_1} d_{wi} + \sum_{i=1}^{n_2} d_{di} \right), \quad (7)$$

式中  $n_1$  为测棒宽度采样的次数;  $n_2$  为测棒深度采样的次数;  $d_w, d_d$  分别为 1 和 6, 7 和 8 号特征点之间的距离;  $d_{wi}, d_{di}$  分别为在  $\|T\| = 1$  的情况下的重构长度。

由于采用红外发光二极管作为特征点, 通过自动地控制光强, 优化曝光时间, 保证不同位置时光点图像强度的一致, 从而保证了系统的外参校准精度, 因此该方法能够灵活、有效地在线高精度校准用于大尺寸测量的立体视觉测量系统。

### 3.3 立体视觉测量模型

立体视觉测量是根据视差原理完成空间三维点坐标测量的。理想情况下, 通过光学中心点为  $O_l$  和  $O_r$  的两台摄像机所成的图像点  $m_l$  和  $m_r$ , 其反推投影射线应当相交于一点(空间特征点)  $M$ 。但由于摄

像机的内参数、图像空间中的对应点的定位以及两台摄像机之间的相互空间姿态的确定等各种误差的存在, 射线  $O_l m_l$  和  $O_r m_r$  不能在三维空间中精确相交或严格交于一点, 因此立体视觉测量中空间点坐标的求解问题变成了两投影线间距离最小化问题。

为了保证立体视觉测量系统的测量精度, 在充分考虑空间点到两像机距离不等的影响、保证空间点到两条反投影射线距离最短的条件下, 提出了基于公垂线约束的投影距离最小的立体视觉测量建模方法, 如图 5 所示, 即在两像点对应的反投影射线的公垂线段上, 求投影与两像点观测值之间距离平方和最小的空间点。该方法不仅充分考虑减小空间距离误差的影响, 使得所求空间点到两条反投影射线之间的距离最短, 还使图像点观测值与估计值之间的距离误差也达到最小, 消除了图像点误差以及空间点距两像机位置不同而造成的影响。该方法的最小化目标函数为  $\min[d^2(m_l, \hat{m}_l) + d^2(m_r, \hat{m}_r)]$ , 约束条件是空间点在由两图像点构成的反投影射线的公垂线上。

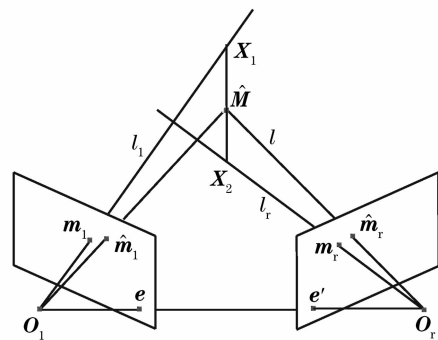


图 5 基于公垂线约束的立体视觉建模方法

Fig. 5 Method of stereo vision reconstruction based on the common perpendicular constraint

最小化目标函数是一个非线性最小化问题, 为了获得满足最小化目标函数的空间点, 本文采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法<sup>[16,17]</sup> 获得此函数的最优解。为了保证 LM 迭代过程快速、有效地收敛, 取公垂线与两条反投影射线的交点  $X_1$  和  $X_2$  的中间点作为迭代的初始值, 在公垂线段上求使得最小化目标函数最小的空间点。

## 4 系统整体测试

为了验证立体视觉坐标测量系统关键技术正确性, 分别从测试系统的单点测量重复性及标准量块测量两个方面进行测试。系统总体测试装置主要

包括测量系统和实验装置及标准件。

#### 4.1 单点的重复性

将单锥孔标准件固定在距离两台摄像机基线约 4m 处,采用测棒以不同姿态触测单锥孔标准件上的圆锥孔进行多次重复测量,具体分为以下两种测试方式:

1)同一姿态单点重复性测量 在进行测试时,测棒姿态保持不变,进行多次测量,测量结果如表 1 所示。由表 1 可知,同一姿态下单点测量的  $X, Y, Z$  方向的标准差分别为  $S_x=0.01 \text{ mm}, S_y=0.03 \text{ mm}, S_z=0.01 \text{ mm}$ 。

表 1 单点重复性测量

Table 1 Single-point repeatability measurement

	Coordinates					
	Same gesture			Different gesture		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-110.45	504.95	4073.67	-397.94	506.43	4050.89
2	-110.45	504.93	4073.66	-397.97	506.45	4050.85
3	-110.45	505.02	4073.68	-397.92	506.39	4050.85
4	-110.43	504.97	4073.67	-397.93	506.42	4050.85
5	-110.44	505.02	4073.68	-397.92	506.48	4050.82
6	-110.44	505.01	4073.69	-397.95	506.44	4050.85
7	-110.43	505.02	4073.69	-397.96	506.40	4050.83
8	-110.42	505.02	4073.68	-397.97	506.46	4050.81
9	-110.44	505.03	4073.67	-397.90	506.38	4050.78
10	-110.42	505.03	4073.69	-397.92	506.41	4050.85
11	-110.43	505.02	4073.68	-397.95	506.50	4050.82
12	-110.42	505.03	4073.67	-397.93	506.46	4050.88
13	-110.42	505.01	4073.69	-397.94	506.42	4050.86
14	-110.43	505.04	4073.70	-397.94	506.53	4050.85
15	-110.43	505.03	4073.70	-397.93	506.49	4050.89
16	-110.43	505.02	4073.68	-397.94	506.53	4050.84
17	-110.42	505.04	4073.69	-397.96	506.46	4050.87
18	-110.43	505.01	4073.67	-397.96	506.52	4050.82
19	-110.44	505.01	4073.70	-397.94	506.51	4050.80
20	-110.43	505.03	4073.66	-397.92	506.40	4050.83
21	-110.45	505.02	4073.69	-397.95	506.50	4050.83
22	-110.44	505.03	4073.68	-397.87	506.51	4050.85
23	-110.43	505.03	4073.67	-397.92	506.39	4050.84
24	-110.43	505.04	4073.69	-397.94	506.46	4050.83
25	-110.42	505.02	4073.67	-397.97	506.42	4050.82
Standard error	0.01	0.03	0.01	0.02	0.05	0.03

2)不同姿态下单点重复性测量 在进行测量时光学测棒端部的小球被固定在锥形孔座内,测棒在  $60^\circ$  锥面内任意成像。在这种情况下单点测量重复性除了与光学特征点的定位精度有关外,还与测尖在测棒坐标系下坐标的校准精度以及两坐标系之间的姿态估计算法的稳健性等有关。测量结果如表 1 所示。由表 1 的测量数据分析表明,测量过程中光学测棒姿态变化对测量结果有一定的影响,不同姿态下单点测量的  $X, Y, Z$  方向的标准差分别为  $S_x=0.02 \text{ mm}, S_y=0.05 \text{ mm}, S_z=0.03 \text{ mm}$ 。

#### 4.2 长度测量

为检定测量系统对空间尺寸测量的不确定度,在测试范围为  $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  空间,空间中心距摄像机基线为 4 m 左右,两台摄像机光轴交角在  $60^\circ \sim 90^\circ$  的范围内,分别对公称长度为 400 mm、700 mm 及 1000 mm 的 1 级标准量块沿平行于两台摄像机基线、垂直于两台摄像机基线及立体空间内的 4 个体对角线这 6 种姿态进行测量,测量结果如表 2 所示。

由表 2 可知,测量系统在二维测量空间内即在

平行于两台摄像机基线、垂直于两台摄像机基线方向的测量精度高于立体测量空间内的测量精度,测量误差随着测量尺寸的增大而增加,对公称长度为 400 mm、700 mm 及 1000 mm 的 1 级标准量块的最大误差为 0.11 mm。

表 2 长度测量结果

Table 2 Results of length measurement

Standard length	400	700	1000
Parallel to base line	400.03	699.98	1000.06
Vertical to base line	400.08	700.04	1000.08
Low left end of diagonal	399.95	699.93	999.94
High left end of diagonal	400.02	700.09	1000.08
Low right end of diagonal	400.05	700.05	1000.09
High right end of diagonal	400.07	700.09	1000.11

## 5 结 论

提出了一种基于测量与校准功能合一的光学测棒的立体视觉坐标测量系统,对影响系统精度的几个关键技术进行了深入研究。该系统不仅能有效地监控测量过程,而且可大大地提高系统的测量精度。实验结果表明,距离像机 4 m 处不同姿态下单点重复性测量误差沿 X、Y、Z 方向的标准差值分别为 0.02 mm、0.05 mm 和 0.03 mm;1000 mm 的 1 级标准量块的长度测量的最大误差为 0.11 mm,因此该系统能够方便、灵活地实现大尺寸、复杂构件三维坐标的在线精确测量。

## 参 考 文 献

- 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
- Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~948
- 郝继贵, 李艳军, 叶声华. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 943~948
- Wu Bin, Zhu Jigui, Yang Xueyou *et al.*. A study for the free-form surface measurement of large-scale objects[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(S4): 294~296
- 吴 斌, 郝继贵, 杨学友 等. 大型物体自由曲面测量技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(S4): 294~296
- Liu Peng, Liu Weijun. Research on 3D measurement of free form surface based on computer vision technique [J]. *Computer Engineering*, 2005, **31**(4): 58~61
- 刘 鹏, 刘伟军. 基于计算机视觉的自由曲面三维测量技术研究[J]. *计算机工程*, 2005, **31**(4): 58~61
- Zhang Aiwu, Li Mingzhe, He Shaoxing *et al.*. 3D measurement technology based on computer vision[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, **17**(1): 32~37
- L. Dennis, S. H. Lin, C. I. Grier *et al.*. Precision measurement using vision systems in automated manufacturing [C]. *Proceedings of the Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2002. 241~245
- Zhang Guoxiong, Zhang Hongwei, Liu Zheng *et al.*. A trinocular vision probe for sculptured surface measurements [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(3): 203~209
- Yaojin Jin, Zhijinag Zhang. Vision coordinate measurement technique using stereo-probe imaging[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4927**: 249~257
- Liu Changying, Huang Qingcheng, Che Rensheng. Algorithm of single camera vision coordinates measuring based on features imaging of optical probe[C]. *Proceedings of Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST' 2004)*. Harbin Institute of Technology Press, 2004. 90~96
- Yu Zhijing, Chen Gang, Che Rensheng *et al.*. Single camera 3D coordinate on-line measuring system[C]. *Proceedings of Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST' 2002)*. Harbin Institute of Technology Press, 2002. 307~313
- Yu Zhijing, Chen Gang, Che Rensheng *et al.*. Optical probe imaging based stereo cameras 3D coordinate measuring system [C]. *Proceedings of Photonics Asia' 2002*, 2002, **4921**: 115~121
- Zhang Zhijiang, Che Rensheng, Huang Qingcheng. Probe imaging vision coordinate measuring system using a single camera [J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 1999, **20**(5): 497~500
- 张之江, 车仁生, 黄庆成. 单摄像机测头成像视觉坐标测量系统建模[J]. *仪器仪表学报*, 1999, **20**(5): 497~500
- Zhang Xiaofang, Gao Hua, Wang Baoguang. Study on no guide 3D-coordinate measurement technology using light-pen [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003, **39**(1): 28~31
- 张晓芳, 高 华, 王宝光. 光笔式无导轨三坐标测量系统的研究[J]. *航空精密制造技术*, 2003, **39**(1): 28~31
- Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng. Evolution for monocular vision measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(4): 314~317
- 黄桂平, 李广云, 王保丰. 单目视觉测量技术研究[J]. *计量学报*, 2004, **25**(4): 314~317
- Qiaoyu Xu, Dong Ye, Rensheng Che *et al.*. Accurate camera calibration with new minimizing function [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2006, **1~3**: 779~784
- Richard Hartley, Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 568~582
- J. Moré. The levenberg-marquardt algorithm: implementation and theory [C]. *Proceedings of Dundee Conference on Numerical Analysis*, Berlin: Springer-Verlag, 1977. 105~116
- 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
- H. C. Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. *Nature*, 1981, **293**(10): 133~135
- R. I. Hartly. Estimation of relative positions for uncalibrated cameras[R]. *Lectures Notes in Computer Vision*, 1992, **588**: 579~587