

文章编号: 0253-2239(2009)06-1546-06

# 立体视觉测量系统现场校准技术

徐巧玉<sup>1</sup> 姚 怀<sup>2</sup> 车仁生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003  
<sup>2</sup>河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003  
<sup>3</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** 为实现大空间复杂工件的准确测量, 精确校准立体视觉系统变得越来越重要。提出了一种利用光学参考棒, 基于单位四元数法的灵活、有效的立体视觉测量系统现场校准技术。该方法以光学参考棒为校准靶标, 以参考棒上的三个共线的距离已知的红外 LED 作为特征点, 通过在测量范围内不同位置对光学参考棒上特征点成像, 灵活、有效地实现两摄像机之间的外参校准。参数校准过程中, 自动地控制光强, 优化曝光时间, 从而使得不同位置处光点图像的强度一致, 并且可以获得高的信噪比, 提高校准精度。实验结果表明该方法具有相当高的在线校准精度, 在实际应用中能获得很好的效果, 最大测量误差为 0.15 mm, 最大标准差为 0.11 mm。

**关键词** 立体视觉测量; 光学参考棒; 摄像机校准; 单位四元数法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092906.1546

## Online Calibration of Stereo Vision Measurement System

Xu Qiaoyu<sup>1</sup> Yao Huai<sup>2</sup> Che Rensheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electromechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China  
<sup>2</sup> School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China  
<sup>3</sup> Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** To carry out the precise measurement of large-scale complex workpieces, accurate calibration of the stereo vision measurement system has been becoming more and more important. This paper proposes a flexible and reliable camera calibration of stereo vision measurement system based on unit quaternions with optical reference bar, which has three small collinear infrared LED feature points and the lengths between these feature points have been precisely calibrated. By imaging the optical reference bar at different locations and orientations over the measurement volume, we can calibrate the stereo vision measurement systems. During the calibration process, we can automatically control the light intensity and optimize the exposure time to get uniform intensity profile of the image points at different distance and obtain higher signal-to-noise ratio. The experiment aresult proves that the proposed calibration method can obtain good results in the application, the maximum measurement error is 0.15 mm and the maximum standard deviation is 0.11 mm.

**Key words** stereo vision measurement; optical reference bar; camera calibration; unit quaternions

**收稿日期:** 2008-10-07; **收到修改稿日期:** 2008-10-29

**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, 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

## 1 引言

近年来,人们已在立体视觉测量系统的校准方面做了大量研究,较为传统的校准方法大都通过获取已知三维坐标的固定点域的图像<sup>[1~2]</sup>或采用立体靶标<sup>[3]</sup>对两台摄像机进行外参校准,此类方法虽然具有较高的校准精度,但是由于固定点域校准以及大尺寸靶标加工都比较困难,所以不适合立体视觉测量系统的现场校准。

自校准技术不使用复杂的三维校准结构,校准过程方便、灵活,在立体视觉测量系统的校准中变得越来越重要。其中一种常用的方法是基于对极约束的立体视觉校准过程,该方法利用对极线约束,首先根据已知的匹配像点确定基础矩阵,然后再由两台摄像机的内部参数矩阵确定本质矩阵;最后将本质矩阵进行分解,在相差一个比例因子的情况下确定两摄像机间的旋转和平移变换。Hans-Gerd Mass<sup>[4~5]</sup>和 P. Cerveri<sup>[6]</sup>最早提出采用移动的参考棒作为图像目标,参考棒上两特征点之间的距离已知。但是在大空间测量范围内,校准棒上两特征像点的尺寸大小和灰度图形均有很大的差异,并且这种差异不能通过增加曝光时间进行补偿,获得的特征点的质心的位置精度不高,因此这种特征点限制了校准精度。为了改善特征光点的光强,保证不同位置处光点图像的强度均一致,于之靖<sup>[7]</sup>和本文作者<sup>[8]</sup>都曾提出采用红外 LED 作为特征光点的基于对极线约束的立体视觉校准过程。虽然该方法能够很好地消除粗大误差和误匹配带来的不良影响,但由于基础矩阵计算误差和本质矩阵分解不确定性的存在,使得由此方法得到的两摄像机间的变换关系也会受到很大的影响。

由于以上校准方法的局限性,本文提出了一种利用光学参考棒,基于单位四元数法的灵活、有效的立体视觉测量系统现场校准技术。该方法以光学参考棒为标定靶标,以参考棒上的红外 LED 作为特征点,通过在测量范围内不同位置对光学参考棒上特征点成像,灵活、有效地实现两摄像机之间的外参校准。校准过程中,首先利用特征光点提供的几何约束分别确定光学参考棒在不同位置时特征光点在两摄像机坐标系下的坐标值;然后采用单位四元数法对立体视觉测量系统的外参数进行线性初值估计;最后,以单位四元数法获得的结果作为初始值进行参数的非线性校正,从而最终确定两摄像机的外部方位参数的最优值。

## 2 立体视觉测量系统结构与测量原理

立体视觉坐标测量系统框图如图 1 所示,由两

台内参已精确校准的高精度 Kodak MegaPlus CCD 的摄像机<sup>[9]</sup>、图像采集卡、工作站和测量软件、光学测棒和光学参考棒等组成。测量过程中,首先将两台摄像机放置在被测范围内,通过在不同的方位移动光学参考棒实现两台摄像机的外部方位参数校准。在线校准外部参数后,两摄像机同时捕获光学测棒上特征点的图像,通过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确定特征点在世界坐标系下的坐标。由特征点在测棒坐标系下的坐标以及它们之间的几何约束,采用单位四元数法确定测棒坐标系与世界坐标系之间的变换关系。最后根据测棒坐标系与世界坐标系之间的变换关系,以及测尖与五个特征点之间在测棒坐标系中的约束,计算出测尖在世界坐标系下的坐标,即被测点坐标。

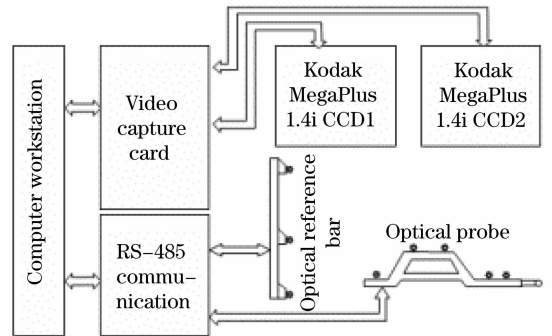


图 1 立体视觉坐标测量系统组成框图

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

## 3 立体视觉系统的校准

在立体视觉测量系统中,如图 2 所示,空间点  $M$  在左右两摄像机坐标系下的坐标分别为  $M_{cl}(X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})$  和  $M_{cr}(X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})$ ,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,其表达式为

$$M_{cr} = \mathbf{R}M_{cl} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

其中旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $\mathbf{T}$  是两摄像机的外部方位参数。

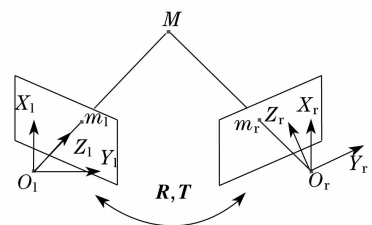


图 2 立体视觉系统模型

Fig.2 Model of stereo vision system

### 3.1 单摄像机成像坐标计算

对于单个摄像机成像系统而言,空间中任意一点  $\tilde{M}$  在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示,  $\tilde{M}$  与它在图像上的投影位置  $\tilde{m}$  之间的关系可表示为

$$\lambda \tilde{m} = K[R'T']\tilde{M}, \quad (2)$$

其中  $\lambda$  是比例因子,  $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$  是图像点  $m = [u, v]^T$  的齐次坐标,  $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$  是空间点  $M = [X, Y, Z]$  的齐次坐标,  $[R'T']$  是摄像机坐标系与世界坐标系之间的外部方位参数,  $K$  是摄像机内参数。

单摄像机下光学参考棒成像示意图如图 3 所示,其中点  $a, b$  和  $c$  分别是光学参考棒上特征点  $A, B$  和  $C$  在像面上投影的齐次坐标。特征点  $A, B$  之间的长度  $L$  为

$$\|B - A\| = L. \quad (3)$$

特征点  $C$  的位置可由  $A$  点和  $B$  点的位置获得

$$C = \lambda_A A + \lambda_B B, \quad (4)$$

其中  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  是已知的比例因子。

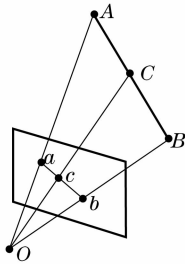


图 3 单摄像机下光学参考棒成像示意图

Fig. 3 Illustration of optical reference bar imaging with one camera

一般情况下,选择摄像机坐标系作为世界坐标系,因此(2)中摄像机坐标系与世界坐标系的外部参数  $R' = I, T' = 0$ 。如果已知  $A, B$  和  $C$  在  $Z$  方向上的坐标  $Z_A, Z_B$  和  $Z_C$ ,由公式(2)可得

$$A = Z_A K^{-1} a, \quad (5)$$

$$B = Z_B K^{-1} b, \quad (6)$$

$$C = Z_C K^{-1} c, \quad (7)$$

将以上三式代入公式(4)得

$$Z_C c = Z_A \lambda_A a + Z_B \lambda_B b, \quad (8)$$

式(8)两边同时叉乘  $c$  得

$$Z_A \lambda_A (a \times c) + Z_B \lambda_B (b \times c) = 0 \quad (9)$$

最终可得

$$Z_B = -Z_A \frac{\lambda_A (a \times c) \cdot (b \times c)}{\lambda_B (b \times c) \cdot (b \times c)}. \quad (10)$$

由(3)式可得

$$\|K^{-1}(Z_B b - Z_A a)\| = L, \quad (11)$$

将(10)式代入(11)式得

$$Z_A \left\| K^{-1} \left[ \frac{\lambda_A (a \times c) \cdot (b \times c)}{\lambda_B (b \times c) \cdot (b \times c)} \cdot b + a \right] \right\| = L, \quad (12)$$

(12)式等同于

$$Z_A^2 h^T K^{-T} K^{-1} h = L^2, \quad (13)$$

其中  $h = \frac{\lambda_A (a \times c) \cdot (b \times c)}{\lambda_B (b \times c) \cdot (b \times c)} \cdot b + a$ 。

由式(13)可知

$$Z_A = \pm [L^2 / (h^T K^{-T} K^{-1} h)]^{1/2}. \quad (14)$$

根据(14)式,(5)式和(6)式可以获得点  $A$  和  $B$  在一个摄像机坐标系下的空间坐标。

重复上面的求解过程,假设另一摄像机坐标系与世界坐标系重合,从而可以求解出同一位置时光学参考棒上特征点  $A$  和  $B$  在该摄像机坐标系下的坐标值。

### 3.2 基于四元数的线性参数估计

在测量范围内的不同位置和方位对光学参考棒成像  $n$  次,然后根据每台摄像机捕获的特征点图像坐标,由 3.1 节的求解过程分别计算出不同姿态下光学参考棒上特征点  $A$  和  $B$  在左右摄像机坐标系下的坐标值  $M_{clAi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和  $M_{clBi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),以及  $M_{crAi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和  $M_{crBi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。根据两摄像机坐标系下的  $2n$  组对应点,由式(1)即可确定两坐标系之间的变换关系。

若分别用  $\{M_{clj}\}$  ( $j=A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n$ ) 和  $\{M_{crj}\}$  ( $j=A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n$ ) 表示左右两摄像机下的特征点坐标,则公式(1)改写为

$$M_{crj} = R M_{clj} + T,$$

$$(j = A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n), \quad (15)$$

其中旋转矩阵  $R$  和平移矢量  $T$  是两摄像机的外部方位参数。

由于数据含有一定的误差,很难找到能够完全满足式(15)的变换。一般存在误差

$$e_j = M_{crj} - R M_{clj} - T. \quad (16)$$

通过最小化所有点的误差总和  $\sum_{j=1}^{2n} \|e_j\|^2$  获得平移和旋转变换的最优解。

通常对旋转矩阵有四种参数化方法:按旋转矩阵参数化,按旋转角参数化,按旋转轴参数化,单位四元数法<sup>[10]</sup>等。由于单位四元数法可以很方便地保证旋转矩阵的正交性、参数少、节约计算量、相对于旋转角来说没有奇异点,而且线性化程度高,所

以采用单位四元数法来计算旋转矩阵。旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和四元数  $\mathbf{q} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$  的关系<sup>[11]</sup>为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) & \lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_2\lambda_3 + \lambda_0\lambda_1) & \lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由(17)式可知,(15)式可以用七个参数进行参数化,表示旋转的单位四元数的四个参数  $\mathbf{q} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$  和表示平移矢量的三个参数  $\mathbf{T} = [t_0, t_1, t_2]^T$ 。

为简化计算,下面引入点集矩中心

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{M}}_{cl} = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^{2n} \mathbf{M}_{clj}, \\ \bar{\mathbf{M}}_{cr} = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^{2n} \mathbf{M}_{crj}. \end{cases} \quad (18)$$

利用已定义的点集矩中心  $\bar{\mathbf{M}}_{cl}$  和  $\bar{\mathbf{M}}_{cr}$  定义射线元

$$\begin{cases} \mathbf{M}'_{clj} = \mathbf{M}_{clj} - \bar{\mathbf{M}}_{cl}, \\ \mathbf{M}'_{crj} = \mathbf{M}_{crj} - \bar{\mathbf{M}}_{cr}, \end{cases} \quad (19)$$

其中  $\mathbf{M}'_{clj} = [X'_{clj}, Y'_{clj}, Z'_{clj}]^T$  和  $\mathbf{M}'_{crj} = [X'_{crj}, Y'_{crj}, Z'_{crj}]^T$  为坐标矢量。

新的变换误差是

$$\mathbf{e}'_j = \mathbf{M}'_{crj} - \mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj} - \mathbf{T}'. \quad (20)$$

其中  $\mathbf{T}'$ , 其表达式为  $\mathbf{T}' = \mathbf{T} - \bar{\mathbf{M}}_{cr} - \mathbf{R}\bar{\mathbf{M}}_{cl}$ 。

所有误差的平方和表示为

$$e_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{2n} \|\mathbf{M}'_{crj} - \mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj}\|^2 - 2\mathbf{T}' \cdot$$

$$\sum_{j=1}^{2n} (\mathbf{M}'_{crj} - \mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj}) + 2n \|\mathbf{T}'\|^2. \quad (21)$$

由于所有的特征点都以特征点中心为参考点,所以(21)式的中间项为零。当且仅当  $\mathbf{T}' = 0$  或  $\mathbf{T} = \bar{\mathbf{M}}_{cr} - \mathbf{R}\bar{\mathbf{M}}_{cl}$  时,总的误差达到最小。

通过上述变换,新的总的误差表示为

$$e_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{2n} \|\mathbf{M}'_{crj}\|^2 - 2 \sum_{j=1}^{2n} \mathbf{M}'_{crj} \cdot \mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj} + \sum_{j=1}^{2n} \|\mathbf{M}'_{clj}\|^2. \quad (22)$$

由(22)式可知,只有当  $\sum_{j=1}^{2n} \mathbf{M}'_{crj} \cdot \mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj}$  尽可能大时,总的误差才能达到最小。理论上讲,射线元  $\{\mathbf{M}'_{clj}\}$  经旋转矩阵  $\mathbf{R}$  作用后,与射线元  $\{\mathbf{M}'_{crj}\}$  之间的夹角应该为零。但是由于噪声的影响,导致射线束不能完全对正。因此,求解旋转矩阵  $\mathbf{R}$  转换为在最小方差的意义上获得两射线簇点的最佳对正结果,即求使下式取极大值的四元数解,其数学表达式为

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{2n} \mathbf{M}'_{crj} \cdot (\mathbf{R}\mathbf{M}'_{clj}) = \mathbf{q}^T \mathbf{N} \mathbf{q}, \quad (23)$$

式中

$$\mathbf{N} = \sum_{j=1}^{2n} \begin{bmatrix} X'_{clj}X'_{crj} + Y'_{clj}Y'_{crj} + Z'_{clj}Z'_{crj} & Y'_{clj}Z'_{crj} - Z'_{clj}Y'_{crj} & Z'_{clj}X'_{crj} - X'_{clj}Z'_{crj} & X'_{clj}Y'_{crj} - Y'_{clj}Z'_{crj} \\ Y'_{clj}Z'_{crj} - Z'_{clj}Y'_{crj} & X'_{clj}X'_{crj} - Y'_{clj}Y'_{crj} - Z'_{clj}Z'_{crj} & X'_{clj}Y'_{crj} + Y'_{clj}X'_{crj} & Z'_{clj}X'_{crj} + X'_{clj}Z'_{crj} \\ Z'_{clj}X'_{crj} - X'_{clj}Z'_{crj} & X'_{clj}Y'_{crj} + Y'_{clj}X'_{crj} & -X'_{clj}X'_{crj} + Y'_{clj}Y'_{crj} - Z'_{clj}Z'_{crj} & Y'_{clj}Z'_{crj} + Z'_{clj}Y'_{crj} \\ X'_{clj}Y'_{crj} - Y'_{clj}Z'_{crj} & Z'_{clj}X'_{crj} + X'_{clj}Z'_{crj} & Y'_{clj}Z'_{crj} + Z'_{clj}Y'_{crj} & -X'_{clj}X'_{crj} - Y'_{clj}Y'_{crj} + Z'_{clj}Z'_{crj} \end{bmatrix}.$$

$\mathbf{q} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$  对应一个列矢量,则使(23)式取极大值时的单位四元数  $\mathbf{q}$  是对应于矩阵  $\mathbf{N}$  的最大特征值的特征矢量。

再利用(17)式可以确定旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 平移矢量  $\mathbf{T}$  由点矩集中心给出

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{M}}_{cr} - \mathbf{R}\bar{\mathbf{M}}_{cl}. \quad (24)$$

### 3.3 基于最大似然估计的非线性校正

理想情况下,通过特征点在两像面上的成像,根据 3.1 的计算过程得到的  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  光学特征点在左右两摄像机坐标系下的坐标是精确的。但由于摄像机内参数和特征像点的质心提取等各种因素的影响,使得它们均含有一定的误差。这些误差将影响两摄

像机坐标系之间的变换关系,所以上述基于单位四元数法得到两坐标系之间的旋转矩阵和平移矢量均含有一定的误差。本文提出了基于最大似然估计的参数修正,通过最小化  $2n$  个特征点在左摄像机坐标系下的坐标经过姿态变换后与右摄像机坐标系下的坐标值之间的误差,得到旋转矩阵和平移矢量的全局最优估计,误差函数为

$$e_{\Sigma} = \min \sum_{j=1}^{2n} \|\mathbf{M}_{crj} - \mathbf{R}\mathbf{M}_{clj} - \mathbf{T}\|^2, \quad (25)$$

式中  $\mathbf{R}\mathbf{M}_{clj} + \mathbf{T}$  为特征点在左摄像机坐标系下的坐标值经过两坐标系间的变换参数变换后的结果;  $\mathbf{M}_{crj}$  为  $A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n$  在右摄像机坐标系

下的坐标值。

最小化(25)式是一个非线性最小化问题,本文采用 Levenberg-Marquardt (LM) 迭代算法<sup>[12,13]</sup> 获得此函数的最优解。LM 迭代过程中,仍用四元数  $\mathbf{q} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$  参数化旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 保证旋转矩阵的正交性。LM 迭代中  $[\mathbf{R}, \mathbf{T}]$  的初始值由四元数线性估计给出。

## 4 实验结果

将两摄像机摆放在  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的测量范围内,摄像机基线为  $4\text{ m}$  左右,两摄像机光轴夹角在  $60^\circ \sim 90^\circ$  的范围。实际校准的具体步骤如下:

1) 将内参精确校准<sup>[9]</sup> 的两台摄像机放置在被测物周围,在测量范围内,分别对参考棒进行多个方位的图像采集,如图 4 所示。

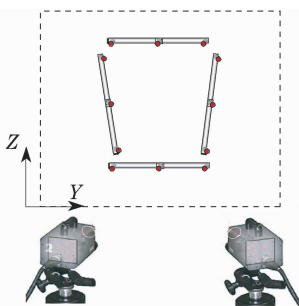


图 4 外部方位参数校准过程

Fig. 4 Procedure of the cameras' external parameters calibration

2) 提取影像像素的质心,根据特征光点之间的距离比例约束,依照 3.1 节的计算过程分别确定特征光点在左右两摄像机坐标系下的坐标值,并确定坐标值在左右两摄像机坐标系下的匹配关系。参考棒的空间位置没有严格要求,但力求左右像平面上所成像点分布均匀。同时,因为方程的求解方法为四元数线性估计法和 LM 迭代算法,所以匹配点的数量一般不能少于 4 组。为了提高整个系统的测量精度,改善图像点的质心坐标,本文采用红外 LED 作为特征点,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,提高信噪比,并采用基于双线性插值的高斯曲面多次拟合定位算法定位质心,质心提取精度可以达到  $0.02$  像素以上,从而保证系统的外参校准精度。

3) 根据 3.2 节,由  $2n$  组空间点在两摄像机坐标系下的坐标值,用单位四元数的线性算法估计两摄像机外部方位参数。

4) 最后,根据 3.3 节的非线性校正过程,通过最小化  $2n$  个特征点在左摄像机坐标系下的坐标经过姿态变换后与右摄像机坐标系下的坐标值之间的误差,获得旋转矩阵和平移矢量的全局最优估计。

为了验证本文校准方法的稳定性,对此设置下的两摄像机进行了 5 次独立的外参校准过程,校准过程中,靶标放置于不同的位置。分别将外参校准结果  $[\mathbf{R}, \mathbf{T}]$  中的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  以绕  $X_c, Y_c, Z_c$  轴的旋转角(即欧拉角  $\omega, \phi, \kappa$ )的形式表示,平移矢量  $\mathbf{T}$  以两摄像之间的基线距离的形式表示<sup>[11]</sup>, 各次校准得到的两摄像机之间的基线距离及方位角如表 1 所示。

表 1 外部方位参数校准结果

Calibration number	Baseline length /mm	$\omega /(^{\circ})$	$\phi /(^{\circ})$	$\kappa /(^{\circ})$
1	3952.24	1.13	53.82	-1.48
2	3952.79	1.13	53.81	-1.48
3	3952.01	1.12	53.81	-1.47
4	3952.51	1.13	53.83	-1.17
5	3951.85	1.13	53.82	-1.48
Standard deviation	0.38	0.005	0.008	0.006

由表 1 可知,其基线距离校准的标准差为  $0.38\text{ mm}$ 。偏航角、俯仰角和旋转角校准的标准差分别为  $0.005^\circ, 0.008^\circ$  和  $0.006^\circ$ 。

为了验证两摄像机外参校准结果对整个系统的影响,分别将 5 次外参校准结果应用到立体视觉测量系统中,对公称长度为  $400\text{ mm}, 600\text{ mm}, 700\text{ mm}, 800\text{ mm}, 900\text{ mm}$  及  $1000\text{ mm}$  的 1 级标准量块进行测量,测量结果如表 2 所示。

表 2 长度测量结果 / (mm)

Table 2 Result of length measurement / (mm)

Calibration length	400	600	700	800	900	1000
Calibration number						
1	400.03	599.93	699.95	799.91	899.89	999.95
2	399.98	599.97	700.04	800.08	899.96	1000.15
3	400.02	600.04	699.97	800.07	899.93	999.92
4	400.05	600.02	699.99	799.94	900.02	1000.09
5	400.06	599.98	700.07	800.08	900.05	1000.13
Standard deviation	0.03	0.04	0.05	0.08	0.07	0.11

由表 2 可知,公称长度为 400 mm、600 mm、700 mm、800 mm、900 mm 及 1000 mm 的 1 级标准量块的最大测量误差为 0.15 mm,最大标准差为 0.11 mm,测量结果表明该校准方法稳定可靠,并能够满足大型装备在线三维测量的需求,具有相当高的使用价值,适用于立体视觉测量系统实际应用场合的现场校准。

## 5 结 论

提出了一种利用光学参考棒,基于四元数的灵活、有效的立体视觉测量系统现场校准技术。通过在测量范围内的不同位置和方位移动光学参考棒,利用光学参考棒提供的几何约束实现立体视觉测量系统现场校准。校准过程包括基于四元数的线性参数估计和基于最大似然估计的非线性校正。参数校正过程中,通过自动地控制光强,优化曝光时间,从而可以使得在不同位置光点图像的强度均一致,并且可以获得高的信噪比。实验结果表明公称长度为 400 mm、600 mm、700 mm、800 mm、900 mm 及 1000 mm 的 1 级标准量块的最大误差为 0.15 mm,最大标准差为 0.11 mm,因此本文提出的校准技术不仅灵活、有效,稳定、可靠,而且在应用中获得很好的效果。

## 参 考 文 献

- 1 Heikkila J. Geometric camera calibration using circular control points[C]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**:1066~77
- 2 Wang Yongqinag, Lü Naiguang, Deng Wenyi *et al.*. The new

- online calibration method in large-scale videogrammetry system [J]. *Opt. Technol.*, 2007, **33**(1): 86~88
- 王永强,吕乃光,邓文怡等. 大尺寸视觉测量系统在线标定的新方法[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 86~88
- 3 Wu Bin, Xue Ting, Zhu Jigui *et al.*. Novel high-precision calibration method for stereo visual measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 66~70
- 吴斌,薛婷,邹继贵等. 一种立体视觉测量高精度标定新方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(12): 66~70
- 4 Maas H.-G. Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots[C]. *SPIE*, 1997, **3174**: 106~112
- 5 Maas H.-G. Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques[J]. *ISPRS J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, **54**: 352~359
- 6 Cerveri P, Borghese N. A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates[J]. *J. Biomechanics*, 1998, **31**: 935~940
- 7 Yu Z J, Chen G, and Che R S. Dynamic calibration of stereo photogramtric system based on optical reference bar[C]. *SPIE*, 2002, **4921**: 104~114
- 8 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
- 9 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. Accurate camera calibration with new minimizing function[C]. *IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 2006, **1~3**: 779~784
- 10 B. K. P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1987, **4**(4): 629~642
- 11 Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision* [M]. Beijing, Science press, 1998
- 马颂德,张正友. *计算机视觉* [M]. 北京,科学出版社,1998
- 12 Hartley R. I, Zisserman Andrew. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. London: Cambridge University Press, 2000:568~582
- 13 J. More. The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and theory[C] *Proc. Dundee Conf. on Numerical Analysis. Berlin;Springer-Verlag*, 1977: 105~116