

文章编号 1004-924X(2017)04-0891-09

## 构建虚拟立体靶标的大视场高精度视觉标定

张曦\*,程东勤,李伟

(上海大学机电工程及自动化学院,上海200072)

**摘要:**为了提高立体视觉系统在大视场下的测量精度,基于误差溯源思想提出了一种构建虚拟立体靶标的大视场高精度视觉系统标定方法,克服了大尺寸高精度标定物难以制造等问题。对影响立体视觉系统测量精度的主要因素进行分析,列出视觉测量系统的误差溯源链,解析了大视场视觉系统精度瓶颈的原因。借助激光跟踪仪,运用非线性最小二乘单位四元数算法求解坐标系刚体变换,获取大范围高精度的空间点阵,构建虚拟靶标。在相机畸变模型中考虑了三阶径向畸变和二阶切向畸变参数,并使用 Levenberg-Marquardt 迭代算法进行标定参数求解,进一步提高系统精度。实验构建了一套测量空间约为  $4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$  的双目立体视觉系统,通过对某型号高精度直线导轨进行点距测量,在测量距离  $3\text{ m}$  处,152组不同长度的横向距离测量的误差算术均值为  $-0.003\text{ mm}$ ,误差标准差为  $0.08\text{ mm}$ 。测量精度相较于传统的平面标定法有较大提升。

**关键词:**立体视觉测量;误差溯源;虚拟立体靶标;大视场;摄像机标定

**中图分类号:**TP391;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0891

## High precision calibration of vision measurement system in large FOV based on virtual 3D target

ZHANG Xi\*, CHENG Dong-qin, LI Wei

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

\* Corresponding author, E-mail: xizhang@shu.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve high-precision calibration of camera with large Field of View (FOV), a stereo calibration method based on error tracing thought was proposed, which can overcome the manufacture limitation of targets with large size and high-accuracy in practice. The main factors affecting accuracy of stereo-vision system were analyzed and the error track chain of vision system was listed, which can explain the accuracy bottleneck in vision system with large FOV. Then, laser tracker was adopted to calculate the rigid body transformation with unit quaternion method, thus achieving virtual point clouds with high precision. Subsequently, 3-order radial distortion and 2-order tangential distortion were involved in the mathematic camera distortion model. In addition, the calibration parameters were solved through Levenberg-Marquardt iterative algorithm, which can improve the accuracy moderately. In the experiment, the binocular stereo vision measuring system was designed with FOV of  $4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$ . The results show that the reconstruction mean error for 152 group data of lateral dis-

收稿日期:2016-10-31;修订日期:2016-12-16.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 41376169, No. 51205243);国家重点研发计划重点专项课题(No. 2016YFC0302402)

tances is  $-0.003$  mm and the standard deviation is  $0.08$  mm in the detection of a high-precision guide rail. Compared with the conventional plane calibration method, the measuring accuracy of the stereo calibration method has been greatly improved.

**Key words:** stereo vision measurement; error tracing; virtual stereo target; large Field of View (FOV); camera calibration

## 1 引言

立体视觉系统因具有非接触性、便携、低成本、信息量丰富等特点,而广泛地应用于机器人引导、工业测量及航空航天等领域<sup>[1]</sup>。随着工业技术的迅速发展,人们对于视觉测量系统提出的要求也越来越高。目前,视觉系统对于小尺寸物体已具有较高的检测精度<sup>[2]</sup>;但对于大尺寸物体而言,由于视觉系统的测量环境难以控制,标定靶标的制作工艺难度大、成本高以及标定过程复杂等原因<sup>[3]</sup>,传统的视觉测量方法无法兼顾测量范围、精度及效率<sup>[4]</sup>。

我国对于大范围高精度视觉系统的研究起步较晚,目前市场上还没有成熟的产品。哈尔滨工业大学<sup>[5]</sup>、大连理工大学<sup>[6]</sup>、解放军测绘学院<sup>[7]</sup>等高校在这方面进行了相关研究。其中,大连理工大学杨景豪等利用空间中平行线和垂直线建立摄像机参数与特征线间的约束方程,以标定大视场立体视觉测量系统。标定后系统在  $7$  m 测量距离的测量相对误差可达到  $0.51\%$ 。相比之下,国外的相关技术已相对成熟,例如美国 GSI 公司的 V-StarS<sup>[8]</sup> 高精度立体视觉测量系统,它在近景测量空间内的测量精度可以达到  $0.02$  mm,媲美激光跟踪仪。但因相关核心技术保密及价格昂贵,类似系统难以在国内进行推广和使用。

一台高精度测量设备的测量误差可以追溯到上一级校准设备,即通过误差溯源链<sup>[9]</sup>可以追溯其测量结果的可信度。所谓误差溯源链是一条具有规定不确定度的不间断的比较链,它能将系统的测量结果与规定的国家计量标准或国际计量标准联系起来<sup>[10]</sup>。传统标定方法在大视场下的精度之所以难以保证,其原因主要是标定靶标的误差无从溯源,因此借助某种高精度测量设备,将其高精度传递至标定靶标,能够有效提升测量系统的精度。

本文基于误差溯源的思想,采用激光跟踪仪构建虚拟立体靶标,提出了一种大视场高精度视觉标定方法。实验搭建了双目立体视觉测量系统,用以验证该方法的可行性及精度,并在相同的实验环境下与传统的平面标定法进行比较。结果表明,该方法能够有效提高大视场下视觉测量系统的精度,并且具有可行性和通用性。

## 2 摄影测量系统及其误差分析

### 2.1 摄影测量系统的数学模型

针孔成像模型又称为线性摄像机模型,是最常用的一种摄像机成像模型。该模型空间中任一点  $P_w$  在图像中的成像位置  $p$  可以用针孔成像模型近似表示,即摄像机光心  $O_c$  与  $P_w$  点的连线  $OP$  与图像平面的交点, $O_c$  到像平面的距离为  $f$ 。这种关系也称为中心射影或透视投影<sup>[11]</sup>,如图 1 所示。

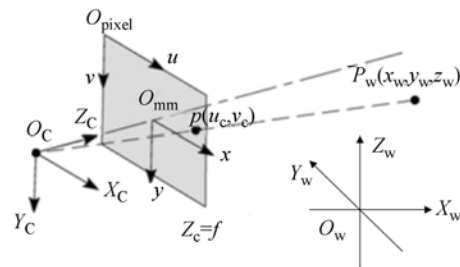


图 1 摄像机坐标系与世界坐标系

Fig. 1 Camera and world coordinates

假设空间中某一点  $P$  在世界坐标系与摄像机像素坐标系下的齐次坐标分别是  $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$  与  $(u_c, v_c, 1)^T$ ,则存在如下映射关系:

$$s \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $f_x, f_y$  分别为  $u, v$  轴上的尺度因子,也称作

摄像机的归一化焦距;  $u_0, v_0$  为摄像机的主点位置;

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 为摄像机的内参数矩阵;}$$

摄像机的外参数  $\mathbf{R}$  为  $3 \times 3$  正交单位旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  为  $3 \times 1$  三维平移向量。摄像机标定的主要任务就是求解摄像机的内参数矩阵  $\mathbf{K}$ 、旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ 。

以经典的双目立体视觉<sup>[12]</sup>系统为例,设该系统的左右摄像机的光心分别为  $O_l, O_r$ ; 图像坐标系中心分别为  $O_{0l}, O_{0r}$ ;  $P_w$  为被测目标在世界坐标系下的坐标,如图 2 所示。

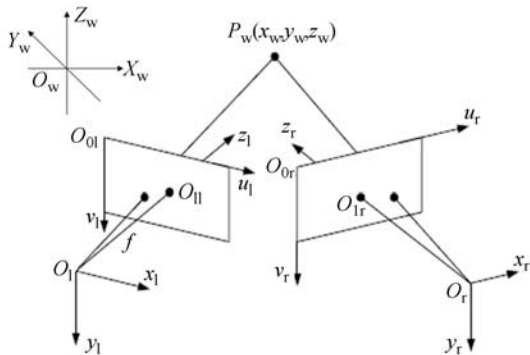


图 2 双目立体视觉测量模型

Fig. 2 Measurement model of binocular vision system

为了方便计算,将测量坐标系与左相机坐标系重合,设左、右相机的内参数矩阵分别为  $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_r$ 。根据三角法测量原理<sup>[11]</sup>,双目立体视觉的测量模型为:

$$\begin{cases} s_l \tilde{\mathbf{X}}_l = \mathbf{K}_l \tilde{\mathbf{x}}_l = \mathbf{K}_l [\mathbf{I} & \mathbf{0}] \tilde{\mathbf{x}}_l \\ s_r \tilde{\mathbf{X}}_r = \mathbf{K}_r \tilde{\mathbf{x}}_r = \mathbf{K}_r [\mathbf{R} & \mathbf{T}] \tilde{\mathbf{x}}_l \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $s_l, s_r$  为比例系数;  $\tilde{\mathbf{X}}_l, \tilde{\mathbf{X}}_r$  分别为左、右相机在图像坐标系下的齐次坐标;  $\tilde{\mathbf{x}}_l$  为左、右相机观察到的物点在世界坐标系下的齐次坐标;因测量坐标系建立在左相机上,故  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  分别表示右相机坐标系与左相机坐标系变换的旋转矩阵、平移矩阵。式(2)中未知量  $s_l, s_r, \tilde{\mathbf{x}}_l$  共有 5 个自由度,由于每个等式可以构造 3 个独立的约束,两个等式总共可以构建 6 个独立的约束,由此可实现三维测量,求得  $\tilde{\mathbf{x}}_l$ 。

### 2.2 摄影测量系统的精度分析

精度是视觉测量系统最重要的性能指标,主要受到源图像质量、摄像机标定方法、图像特征定位、被测目标物距、各个摄像机之间的相对位姿和

系统随机噪声等<sup>[13]</sup>因素的制约。其中,摄像机参数标定以及图像特征定位是影响测量系统精度最重要的因素<sup>[14]</sup>。以双目立体视觉模型为例,空间点  $P$  的三维坐标可以由函数  $F$  来表示,  $P(X_w, Y_w, Z_w) = F(B, \theta, f, d, x_l, y_l, z_r, y_r)$ , 即有:

$$\begin{cases} X_w = \frac{B \cot(\omega_l + \theta_l)}{\cot(\omega_l + \theta_l) + \cot(\omega_r + \theta_r)} \\ Y_w = Y_l \frac{z \sin \omega_l}{f_l \sin(\omega_l + \theta_l)} = Y_r \frac{z \sin \omega_r}{f_r \sin(\omega_r + \theta_r)}, \\ Z_w = \frac{B}{\cot(\omega_l + \theta_l) + \cot(\omega_r + \theta_r)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $\omega_l = \arctan(X_l/f_l), \omega_r = \arctan(X_r/f_r), f$  为摄像机焦距,  $B$  为基线距,  $d$  为物距,  $\theta$  为光轴与基线的夹角,  $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$  分别为左右相机的像坐标。设  $\delta_k$  为各个变量的误差,根据误差传递及合成理论,空间点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  在各个坐标轴方向上的误差可表示为:

$$\begin{cases} \Delta X_w = \sum_k \frac{\partial F_{X_w}}{\partial k} \cdot \delta_k \\ \Delta Y_w = \sum_k \frac{\partial F_{Y_w}}{\partial k} \cdot \delta_k \\ \Delta Z_w = \sum_k \frac{\partial F_{Z_w}}{\partial k} \cdot \delta_k \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $k = B, \theta, f, d, x_l, y_l, x_r, y_r$ 。

测量系统的综合误差  $\delta = \sqrt{(\Delta X_w)^2 + (\Delta Y_w)^2 + (\Delta Z_w)^2}$ 。目前,图像定位特征算法的研究相对较成熟,性能较好,因此在系统图像定位精度一定的情况下,系统的测量精度与标定精度有着最直接的关系。张正友提出的平面标定法是一种应用广泛,性能较好的标定方法<sup>[15]</sup>,但该方法在标定板制作上存在一定的局限。普通印刷标定板存在标定板平面度难以保证、印刷精度难以控制等问题;而高精度的陶瓷光刻标定板则存在成本较高及尺寸较小等限制,难以覆盖整个测量空间,难以识别远距离目标的特征,因此测量系统的工作范围会受到限制,无法满足高精度大范围的实际工业测量需求。

## 3 基于虚拟立体靶标的大视场高精度视觉系统标定方法

### 3.1 高精度虚拟立体靶标的构建

为了克服高精度靶标难以制造,精度无法保

证的问题,本文基于误差溯源的思想,借助某种高精度测量设备,将其高精度传递至标定靶标,提升系统的测量精度。

目前,高精度的三维测量系统主要有三坐标测量机、机器人关节臂和激光跟踪仪等<sup>[16]</sup>。考虑到视觉系统的测量范围、测量对象、非接触性等特点,激光跟踪仪是建立高精度立体靶标的最佳选择。本文建立了一条不间断的高精度视觉系统的误差溯源链,如图 3 所示。其中,视觉系统的测量精度可追溯至标定靶标,标定靶标的误差可追溯到激光跟踪仪,激光跟踪仪的测量精度则可追溯到计量级激光干涉仪,而计量级激光干涉仪的测量精度可通过层层追溯,最终追溯到国际计量局标准米的定义。因此,视觉系统的测量精度具有可靠性及可溯源性。



图 3 高精度视觉系统的误差溯源链

Fig. 3 Error tracing chain of high accuracy vision system

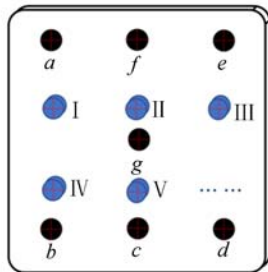


图 4 特征靶标

Fig. 4 Feature targets

特征靶标设计如图 4 所示,其中  $a, b, c, d, e, f, g \dots$  为  $M$  个激光跟踪仪可追踪的靶球特征;  $I, II, III, IV, V \dots$  为  $N$  个视觉测量系统可观测的特征点,在初始位置可使用激光跟踪仪测量特征中心的三维坐标。特征靶标的形状不一定是平面,可根据实际环境进行设计。

如图 5 所示,虚拟立体靶标的构建流程如下:

(1)特征靶标放置在初始位置  $O$  处,在激光跟踪仪的检测范围内。跟踪仪先测得靶球的特征三维坐标  $\{X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}\}_{laser} \times M$ ,再使用激光跟踪

仪光笔附件 T-probe 测量  $N$  个视觉特征点,得到视觉特征点的三维坐标  $\{X_{C0}, Y_{C0}, Z_{C0}\}_{laser} \times N$ 。

(2)特征靶标放置在位置 1 处,位置 1 必须同时在视觉系统和激光跟踪仪的测量范围内。先测得激光跟踪仪靶球的特征坐标  $\{X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1}\}_{laser} \times M$ ,摄像机可以观测到视觉特征点在图像坐标系下的坐标  $\{u_i, v_i\}_{cam} \times 2 \times N$ 。为了保证系统的高精度,测量人员应远离被测靶标,以减少地面震动,因此无法采用接触式测量法对图像特征点的三维坐标进行测量。此时,激光跟踪仪仅可检测靶球特征。但通过计算  $\{X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1}\}_{laser} \times M$ 、 $\{X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}\}_{laser} \times M$  之间的刚体变换  $[R T]_0^1$ ,再结合初始位置  $O$  的图像特征点的三维坐标  $\{X_{C0}, Y_{C0}, Z_{C0}\}_{laser} \times N$ ,即可得到图像特征点在位置 1 的三维坐标值  $\{X_{C1}, Y_{C1}, Z_{C1}\}_{laser} \times N$ 。

(3)为了确保刚体的变换精度,特征靶标每移动到一个新位置  $i$ ,需要校验其变换误差  $\epsilon, \epsilon$  为  $O$  位置与  $i$  位置  $M$  个靶球特征之间距离偏差的最大值。

(4)同理,将特征靶标放置至测量空间位置  $i$ ,可测得  $\{X_{Li}, Y_{Li}, Z_{Li}\}_{laser} \times M, \{u_i, v_i\}_{cam} \times 2 \times N$ ,计算出  $\{X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}\}_{laser} \times N$ ,直至得到足够的特征点,虚拟立体靶标应尽可能布满整个测量空间。最终,共有  $i$  组  $\{X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}\}_{laser} \times N$  和  $\{u_i, v_i\}_{cam} \times 2 \times N$  用于标定计算,即立体靶标共有  $i \times n$  个特征点。

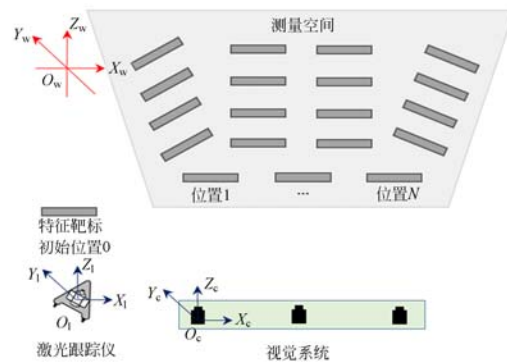


图 5 虚拟靶标的空间布置

Fig. 5 Arrangement of virtual targets

高精度的刚体变换求解方法对于虚拟立体靶标的构建至关重要。空间三维点的刚体变换方法主要有正交分解法、奇异值分解法和单位四元数法<sup>[17]</sup>。假设存在两组三维点集  $\mathbf{X} = \{p_1, p_2, \dots,$

$p_i\}$ 和  $\mathbf{X}'=\{p_1', p_2', \dots, p_i'\} (i > 3)$ , 分别位于两个坐标系中, 当刚体运动中的点集分布接近于同一平面时, 特别是点集数目较少时, 用奇异值分解法或正交分解法得到的结果经常不稳定, 而单位

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a^2 + b^2 - c^2 - d^2 & 2bc - 2ad & 2ac + 2bd \\ 2cd + 2bc & a^2 - b^2 + c^2 - d^2 & 2cd - 2ab \\ 2bd - 2ac & 2ad + 2cd & a^2 - b^2 - c^2 + d^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为求得目标单位四元数, 假设  $S_b = \sum_{i=1}^n a_{e,i} b_{1,i}$ ,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} s_{xx} + s_{zz} + s_{yy} & s_{yz} - s_{zy} & s_{zx} - s_{xz} & s_{xy} - s_{yx} \\ s_{yz} - s_{zy} & s_{xx} - s_{zz} - s_{yy} & s_{xy} + s_{yx} & s_{zx} + s_{xz} \\ s_{zx} - s_{xz} & s_{xy} + s_{yx} & -s_{xx} + s_{zz} - s_{yy} & s_{yz} + s_{zy} \\ s_{xy} - s_{yx} & s_{zx} + s_{xz} & s_{yz} + s_{zy} & -s_{xx} - s_{zz} + s_{yy} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据两组已知对应关系的点集即可求出矩阵  $\mathbf{N}$  中各项的值。矩阵  $\mathbf{N}$  的最大特征值所对应的特征向量即为要求的单位四元数向量<sup>[17]</sup>, 再由式(6)计算出对应的旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 将矩阵  $\mathbf{R}$  做 Rodrigues 变换, 获得旋转向量。该向量二范数的值即为刚体的空间旋转角度。

本文提出的方法是一种建立大尺寸高精度虚拟靶标的思路。实际工业应用中, 可以根据实际的测量环境选取合适的高精度测量设备, 在测量空间内布置任意形状的虚拟靶标, 用于系统标定。因此, 该方法具有通用性。

### 3.2 视觉系统高精度标定

摄像机标定的求解过程是通过最小化代数距离实现的, 不具备物理意义, 可进一步使用最大似然估计准则对所有内外部参数进行优化<sup>[18]</sup>。其实质为: 空间点经投影变换计算出的理论像点与图像上的实际像点之间的距离的平方和最小, 即使总体的重投影误差最小。设拍摄了  $n$  幅标定靶标图像, 标定板上有  $m$  个参考点, 最小化优化目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| p_{ij} - p(K, R_i, T_i, P_{ij}) \|^2, \quad (7)$$

其中:  $i$  代表第  $i$  幅图像,  $P_{ij}$  代表第  $i$  幅图像上的第  $j$  个点,  $p(K, R_i, T_i, P_{ij})$  代表第  $i$  幅标定靶标上的第  $j$  个空间三维点在第  $i$  幅图像上的投影点。

上述计算并未考虑镜头的光学畸变, 针孔成像模型仅是一种理想的线性模型, 然而实际中镜头会同时存在径向畸变和切向畸变<sup>[19]</sup>。

为了保证系统运算效率的情况下尽可能提高摄像机的标定精度, 本文采用三阶径向畸变和

四元数法却具有很好的稳定性, 故本文采用单位四元数法来求解刚体变换参数。其基本原理为: 对单位四元数  $z = a + bi + cj + dk (a, b, c, d \in \mathbf{R})$  进行旋转变换, 可得:

构造矩阵  $\mathbf{N}$ :

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} s_{xx} - s_{zz} & s_{xy} - s_{yx} \\ s_{xy} + s_{yx} & s_{xx} + s_{zz} \\ -s_{xx} + s_{zz} - s_{yy} & s_{yz} + s_{zy} \\ s_{yz} + s_{zy} & -s_{xx} - s_{zz} + s_{yy} \end{bmatrix}.$$

二阶切向畸变模型。假设图像坐标系的两轴完全垂直, 最终的非线性畸变模型为:

$$\begin{cases} x' = x + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ y' = y + y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1 (r^2 + 2y^2) \end{cases}, \quad (8)$$

其中:  $(x', y')$  代表存在畸变的二维图像坐标,  $(x, y)$  代表理想的二维图像坐标, 两者均在以毫米为单位的图像坐标系中。

假设共拍摄了  $M$  张特征靶标图像, 每个特征靶标上有  $N$  个特征点, 那么只要获得足够的  $2M \times N$  个方程, 即可使用最小二乘法解出标定参数的初值。再将这些参数的初值带入式(7)中, 使用 Levenberg-Marquardt 算法进行迭代优化, 直到迭代过程收敛, 从而求出较为精确的摄像机内、外参数和镜头畸变参数<sup>[20-21]</sup>。

## 4 测量系统的搭建及实验研究

本文构建了一套双目立体视觉系统, 验证所提出的虚拟靶标立体标定方法的可行性及精度。标定现场如图 6 所示, 实验的主要器材由立体视觉系统、图形工作站、Leica LTD840 激光跟踪仪、跟踪仪控制器及特征靶标组成。其中, 立体视觉系统由两台分辨率为  $2\,448 \times 2\,050$  的黑白 CCD 摄像机、高清千万像素镜头及 940 nm 红外滤镜组成, 被测目标为红外 LED 靶标。为了提高测量系统整体的稳定性, 设计制造了相机安装支架, 并对系统光源等组件进行了封装集成。该型号激光跟踪仪在 5 m 测量距离内的绝对定位精度为 0.02 mm。



图 6 标定实验仪器

Fig. 6 Instrument of calibration experiment

图 7 为特征靶标布置,主要包含 5 个激光跟踪仪靶座及 4 个红外 LED 特征靶标,其中红外 LED 特征靶标采用圆柱形凸台设计,如图 8 所示。该形状不仅便于视觉系统观测,且激光跟踪仪可使用光笔附件 T-probe 先测量圆柱面上的多个点,拟合出空间圆柱体,再测量扩散板上的多个点拟合平面。通过该平面与空间圆柱体确定的空间圆,可得出圆形扩散板中心的三维坐标。由于该中心与视觉系统所观测到的光斑中心是重合的,因此可实现虚拟靶标的构建。实验中,特征靶标每变换一个新位置,会重新校验其刚体的变换误差,以保证虚拟靶标的精度。

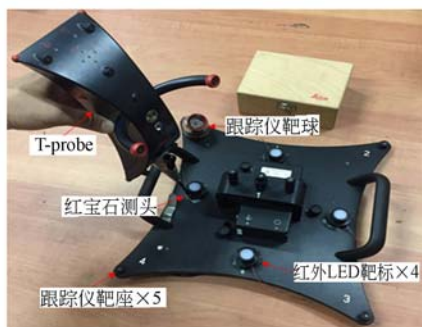


图 7 特征靶标布置

Fig. 7 Arrangement of feature targets

标定靶标应以各种位置、姿态尽可能布满整个测量空间。标定实验中,特征靶标分别沿水平、深度、高度方向每隔约 0.5 m 放置,由此构建大尺寸虚拟立体靶标。最终,在测量空间内共获得



图 8 红外 LED 特征结构

Fig. 8 Structure of infrared LED feature target

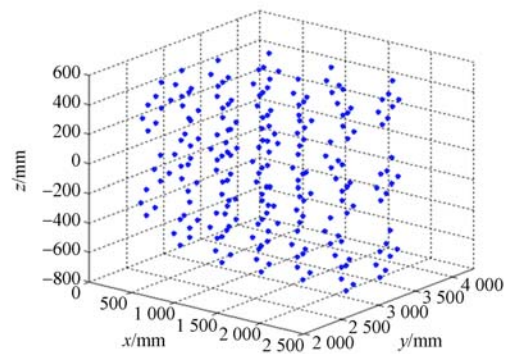


图 9 虚拟靶标的空间布置

Fig. 9 Arrangement of virtual targets

212 个高精度立体特征点,所构建的虚拟立体靶标如图 9 所示。

为比较立体标定法与传统平面标定法的精度,在相同的实验环境下还使用棋盘格标定板进行标定。标定板的角点布置为  $10 \times 10$  个,棋盘格的方格边长为 60 mm。两种方法的标定结果如表 1~3 所示。

为验证系统精度,点距测量实验中,将跟踪仪靶座固联在高稳定性直线导轨的移动平台上,该型号导轨精度已使用激光跟踪仪校准,其测量误差标准差为 0.018 mm,最大行程为 940 mm。摄像机可追踪靶座上的红外 LED 靶标,现场布置如图 10 所示。实验中,激光跟踪仪通过追踪靶球可以获得移动靶座的真实移动距离  $D$ ,并将  $D$  作为理论值。立体视觉系统通过追踪移动靶标上红外 LED 靶标点在图像坐标系下的位置,对特征靶标移动前和移动后在测量坐标系下的位置分别进行三维重建,可以得到靶标移动距离  $d$ 。则测量误

差算术均值  $\epsilon_a$ , 误差标准差  $\epsilon_{RMS}$  分别为:

$$\epsilon_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d - D), \quad (9)$$

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d - D)^2}. \quad (10)$$

为验证本文所提出的立体标定方法与传统平面标定方法的测量精度,在测量距离约 3 m 处,分别使用两种方法的标定结果进行三维重建。测量对象为长度分别为 10, 20, 50, 100 mm 的横向点距,每个长度各测量 10 次,共计 40 次,实验结

表 1 不同标定方法的摄像机内参标定结果对比

Tab.1 Comparison of inner parameter calibration between different calibration methods (pixel)

内参数	平面标定		立体标定	
	左摄像机	右摄像机	左摄像机	右摄像机
$f_x$	2497.6854	2440.6256	2522.2342	2466.1197
$f_y$	2504.5906	2442.6373	2522.1354	2466.5247
$u_0$	1241.7759	1221.9574	1213.842	1235.2191
$v_0$	1077.4545	1079.9559	1013.828	1030.8278

表 2 不同标定方法的摄像机畸变标定结果对比

Tab.2 Comparison of camera distortion calibration between different calibration methods

畸变系数	平面标定		立体标定	
	左摄像机	右摄像机	左摄像机	右摄像机
$k_1$	-0.060301	-0.051277	-0.034562	-0.035968
$k_2$	0.460089	0.3459932	0.101430	0.126158
$k_3$	-0.8343001	-0.538747	0.197406	0.001115
$p_1 (10^{-4})$	65.85050	47.69324	6.43317	-2.00739
$p_2 (10^{-4})$	58.93635	-0.35388	4.50798	-9.06867

表 3 不同标定方法的摄像机外参标定结果对比

Tab.3 Comparison of outer parameter calibration between different calibration methods

双相机相对位姿	平面标定	立体标定
$W/\text{rad}$	-0.006054	-0.001099636
$\varphi/\text{rad}$	0.250195	0.233390703
$\kappa/\text{rad}$	0.007111	0.000978488
$t_x/\text{mm}$	-902.227812	-904.2130917
$t_y/\text{mm}$	-3.822239	-2.09340971
$t_z/\text{mm}$	98.144878	97.5204735

果如图 11 所示。其中,平面标定法的误差均值为 0.301 mm,标准差为 0.250 mm;立体标定法的误差均值为 0.002 mm,标准差为 0.071 mm。从测量结果可以看出,平面标定的测量精度较低,且测量误差会随被测目标点距长度的增加而增加。立体标定方法的测量精度相较于传统的平面标定法有较大提升。

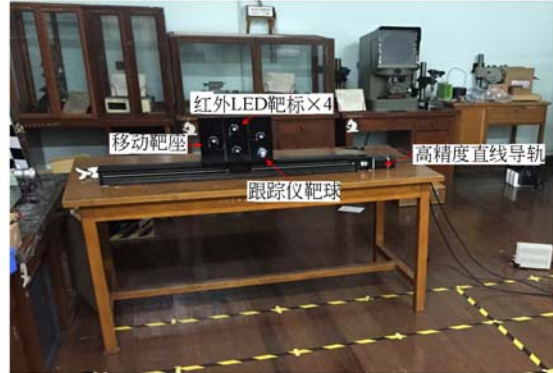


图 10 精度评价试验

Fig.10 Accuracy verification experiment

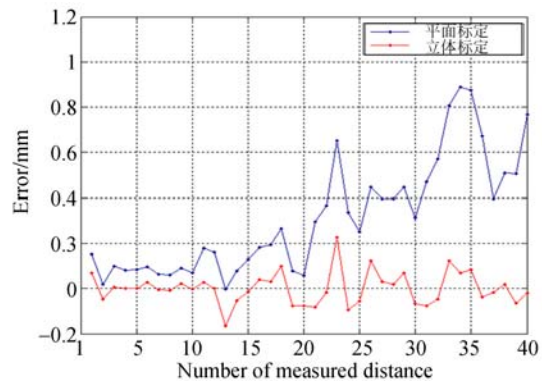


图 11 不同标定方法的测量误差比较

Fig.11 Comparison of measurement error between different calibration methods

为验证本文所提方法在整个测量空间的精度,分别在测量距离约为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m 处,使用立体标定数据测量了若干组不同长度的横向点距(最长点距为 900 mm),点距布置尽可能布满约 4 m 的横向空间,实验数据如表 4 所示。

实验结果表明,基于虚拟立体靶标的大视场高精度视觉标定方法具有较高的测量精度及较小的误差波动,适用于标定大视场视觉测量系统。

表 4 立体标定视觉系统的测量精度

Tab. 4 Measurement accuracy of vision system by stereo calibration method

序号	测量距离	误差算术均值	误差标准差	测量点距数
	/m	/mm	/mm	/个
1	2.0	0.019	0.075	152
2	2.5	0.011	0.084	228
3	3.0	-0.003	0.080	152
4	3.5	-0.012	0.118	228
5	4.0	-0.032	0.198	152

## 5 结 论

本文分析了影响大视场视觉系统精度的主要因素,解析了传统标定方法在大视场测量环境中精度的限制因素。然后,基于误差溯源思想列出一条不间断的高精度视觉系统误差溯源链,并设

计了一种基于激光跟踪仪辅助构建的虚拟立体靶标进行大视场高精度摄像机标定。该方法具有通用性,可根据实际工业环境设计虚拟立体靶标的精度及形状。标定算法在保证运算效率的同时,考虑了摄像机的高阶畸变模型,并采用 LM 迭代算法求解标定参数的精确值。最后,实验构建了一套测量范围约为  $4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$  的双目立体视觉系统,针对某型号高精度导轨的横向点距测量,在相同的实验环境下分别使用棋盘格标定板及立体标定方法进行标定,并测量点距,比较两种标定方法的测量精度。随后计算本文所提标定方法在整个测量空间的精度。其中,在测量距离 3 m 处,测量 152 组不同长度的横向点距,其误差的算术均值为  $-0.003\text{ mm}$ ,误差标准差为  $0.08\text{ mm}$ 。实验结果表明,基于虚拟立体靶标的大视场高精度视觉标定方法能够提高测量精度及减小测量误差的波动,具有实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
- [2] YANG G, GAINES J A, NELSON B J. A supervisory wafer-level 3D microassembly system for hybrid MEMS fabrication[J]. *Journal of Intelligent and Robotic System*, 2003, 37(1): 43-68.
- [3] 冯萍,魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2217-2224.
- [4] HUANG B K, ZHEN L, ZHANG G J. Global calibration of multi-sensor vision measurement system based on line structured light[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(12): 1816-1820.
- [5] 徐巧玉. 大型装备在线三维视觉测量系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [6] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
- [7] 孙军华,张广军,魏振忠,等. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1688-1691.
- [8] GSI V-StarS[Z/OL]. <http://www.geodetic.com/v-stars.aspx>, 2016.
- [9] 张曦,陈五一. 激光跟踪仪测量曲面的测量不确定度研究[J]. 计量学报, 2006, 27(2): 107-112.
- XU Q Y. *Study of the Key Technologies of Online 3D Vision Measurement System for Large-scale Equipments*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al.. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (in Chinese)
- YANG J H, LIU W, LIU Y, et al.. Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 300-308. (in Chinese)
- SUN J H, ZHANG G J, WEI ZH ZH, et al.. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free form surface[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1688-1691. (in Chinese)
- ZHANG X, CHEN W Y. The contour measurement uncertainty in the measurement of curve sur-

- faces with a laser tracker[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(2): 107-112. (in Chinese)
- [10] 施昌彦. 现代计量学概论[M]. 北京: 中国计量出版社, 1994: 124.  
SHI CH Y. *The Fundamentals of Modern Metrology* [M]. Beijing: China Metrology Press, 1994: 124. (in Chinese)
- [11] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
MA S D, ZHANG ZH Y. *The Computer Vision-Computation Theory and Fundamental Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 魏振忠, 高明, 张广军, 等. 一种光斑图像中心的亚像素提取方法[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 7-12.  
WEI ZH ZH, GAO M, ZHANG G J, *et al.*. Sub-pixel extraction method for the center of light-spot image[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 7-12. (in Chinese)
- [13] CHEN Y F, WU L N, YUE S L, *et al.*. Pose measurement base on machine vision for the aircraft model in wire-driven parallel suspension system[J]. *SPIE*, 2013, 8783: 87831K.
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] ZHANG K, GAO Z. Precision comparison of 3D measurement system based on stereo vision[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 542-543: 635-638.
- [16] 肖尚彬. 四元数方法及其应用[J]. 力学进展, 1993, 23(2): 249-260.  
XIAO SH B. The method of quaternion and its application[J]. *Advances in Mechanics*, 1993, 23(2): 249-260. (in Chinese)
- [17] TANG R Y, ZENG Z M, SUN C K, *et al.*. 3-step-calibration of 3D vision measurement system based-on structured light[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2014, 8(3): 484-489.
- [18] 胡丽华, 张继福, 张素兰. 大型物体视觉测量模拟和精度分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(12): 2272-2281.  
HU L H, ZHANG J F, ZHANG S L. Simulation and precision analysis of visual measurement for large objects[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(12): 2272-2281. (in Chinese)
- [19] 孙即祥, 王晓华. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 272-313.  
SUN J X, WANG X H. *Feature Extraction in Pattern Recognition and Computer Vision Invariants* [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2001: 272-313. (in Chinese)
- [20] LOURAKIS M I A. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar[J]. *Foundation of Research & Technology*, 2005.
- [21] ZHANG H Y, GENG Z. Novel interpretation for Levenberg-Marquardt algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(19): 5-8.

#### 作者简介:



张 曦(1977—),男,江苏徐州人,博士,副教授,2006年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为视觉检测技术。E-mail: xizhang@shu.edu.cn



程东勤(1991—),男,上海人,硕士研究生,主要从事计算机视觉及工业机器人等方面的研究。E-mail: pascalcheng@shu.edu.cn

(本栏目编辑:曹 金)