

基于十字靶标的双目立体测量系统标定

孙楠 张丽艳 叶南 王宏涛

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 提出了一种基于十字靶标的双目立体测量系统标定方法。采用多视图几何约束和光束平差优化精确获得两相机内参数,同时得到在两相机各自坐标系下重建出的靶点三维坐标点集;由两组三维点集之间的刚体变换直接求得系统外参数。该方法只需双相机同时对十字靶标拍摄一次,再由两相机单独拍摄若干幅靶标图像即可,现场操作简单灵活。在标定结果的基础上,对长度为611.800 mm的标尺进行多次测量,平均值为611.776 mm,标准差为0.030 mm。

关键词 测量;双目立体测量;摄像机标定;多视图几何;刚体变换;十字靶标

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0412001

Calibration of Binocular Stereo Measurement System Based on Calibration Cross

Sun Nan Zhang Liyan Ye Nan Wang Hongtao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A calibration method of binocular stereo measurement system is proposed based on calibration cross. The intrinsic parameters of the two cameras are calculated precisely and the three-dimensional (3D) target point sets are reconstructed in each camera coordinate system respectively by using the multiple-view geometrical constraint and a generic sparse bundle adjustment. Then the extrinsic parameters are calculated by using the rigid-body transform of the two 3D point sets. This method is simple and flexible for field operation because it only needs the calibration cross to be photographed by two cameras simultaneously once and then separately several times. Based on a binocular stereo measurement system calibrated by the proposed method, a staff gauge of 611.800 mm long is measured many times. The result shows that the average measurement value is 611.776 mm, and standard deviation is 0.030 mm.

Key words measurement; binocular stereo measurement; camera calibration; multiple-view geometry; rigid transformation; calibration cross

OCIS codes 150.1488; 100.6890; 120.3930

1 引 言

随着大型工件外形检测需求的增多,大视场双目立体视觉测量技术得到越来越多的应用,而系统标定是该测量技术最基础、最重要的组成部分^[1],标定精度直接影响系统测量的精度和稳定性。

传统的高精度摄像机标定方法一般借助精密加工的二维(2D)或三维(3D)靶标进行标定,如张正友^[2]的平面标定算法,其要求标定靶标上每个圆点的空间位置已知,且分布于同一平面,因此圆点的位置误差将直接影响标定的精度。虽然文献^[3]对其

收稿日期: 2011-09-28; 收到修改稿日期: 2011-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(50875130)、教育部博士点基金(200802870016)和江苏省自然科学基金(BK2009382)资助课题。

作者简介: 孙楠(1987—),女,硕士研究生,主要从事非接触三维几何测量方面的研究。

E-mail: happy_sunnan@163.com

导师简介: 张丽艳(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非接触三维几何测量、机器视觉检测、逆向工程等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

进行改进,将靶点三维坐标松弛为优化变量,从一定程度上降低了圆点位置误差对标定精度的影响,但文献[3]中的非线性优化过程要求优化变量初值与真实值接近,若靶点三维坐标测量值与真实值相差过大,非线性优化过程有可能不收敛;另外,平面标定算法要求标定靶标具有较高的平面度,对大尺寸靶标,综合考虑靶标的重量和刚度,一般很难加工出高精度的平面,因此平面标定算法一般用于 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\sim 500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 左右的中小视场的标定。R. Tsai等^[4,5]提出的基于径向约束的两步法,借助高精度的三维标定块,能够获得比较高的标定精度,但在标定中要求靶标能够尽可能地覆盖整个视场。然而,在大视场视觉测量应用中,无论大型高精度的平板或是标定块都难于加工与维护;而小型靶标在大视场中进行标定将造成视场中精度分布的不均匀,影响整体测量精度。文献[6]提出一种差分标定方法,标定时将小尺寸靶标放置于视场内的多个工位,对靶标每次摆放的姿态都有严格要求,这使得该方法在现场应用中受到严重的局限。文献[7]提出了基于视场边缘距离相对约束条件的摄像机标定方法,但方法中使用的标准距离控制场需要事先使用高精度定位仪器测出,无法满足现场标定的要求。基于主动视觉的标定方法^[8,9]需要精确控制摄像机的运动,标定结构较为复杂,标定精度受执行机械的精度影响较大。文献[10]提出了一种基于消隐点几何特性的摄像机内外参数标定方法。该方法不需要知道空间点的精确坐标,只需利用空间正交的两组平行线经过透视投影产生的消隐点几何特性即可完成标定过程,但该方法的测量精度有限,不适合大视场中的高精度测量的要求。

本文提出一种基于十字靶标的双目立体测量系

统标定方法。十字靶标由两根相互交叉的靶尺构成,可拆装,增强了十字靶标的便携性和使用方便性。无需已知靶标上每个靶点的坐标位置,无需靶点共面,只需预先获得靶尺上两个靶点之间的物理距离;相对于大尺寸标定板和标定块,这种大尺寸十字靶标更容易加工和维护,方便实现大视场下的现场标定;将十字靶标上的靶点设计成具有唯一确定的身份号,便于图像间匹配以及图像点和空间点之间的对应。首先由多视图几何约束和光束平差优化精确获得两相机内参数,同时得到在两相机各自坐标系下重建出的靶点三维坐标点集;再由两组三维点集之间的刚体变换直接求得系统外参数,无需再进行内外参数全局优化。该方法只需双相机同时对靶标拍摄一次,再由两相机单独拍摄若干幅靶标图像即可,现场操作简单灵活。

2 双目立体视觉成像模型

三维空间点 D 在摄像机成像平面上的投影常用理想的针孔模型^[11]描述,可表示为

$$s[u \ v \ 1]^T = \mathbf{A}[\mathbf{R}|\mathbf{t}][X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T, \quad (1)$$

式中 s 为比例系数; $[X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ 为点 D 在世界坐标系下的坐标; $[u \ v]^T$ 为点 D 在图像平面上投影点的像素坐标; \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量, \mathbf{A} 为摄像机的内参数矩阵。

由于镜头畸变的影响,如图 1(a)所示,实际成像点 I_d 不是三维点 D 和光学中心 O 的连线与图像平面的交点 I_u ,而是有了一定的偏移。将实际图像坐标校正为理想图像坐标后才能进行理论计算,这一校正过程可以通过如下畸变补偿模型^[12]来实现:

$$\begin{cases} x_u = [x_d + x_d(a_1 r^2 + a_2 r^4)] / [(a_3 r^2 + a_4 x_d + a_5 y_d + a_6) r^2 + 1] \\ y_u = [y_d + y_d(a_1 r^2 + a_2 r^4)] / [(a_3 r^2 + a_4 x_d + a_5 y_d + a_6) r^2 + 1] \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $r^2 = x_d^2 + y_d^2$, (x_u, y_u) 和 (x_d, y_d) 分别为 I_u 和 I_d 在相机坐标系 $OXYZ$ 的物理坐标, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 分别表示将实际物理坐标校正为理想坐标的六个畸变补偿系数。相机畸变补偿的关键是如何确定这六个畸变补偿系数。内参数矩阵 \mathbf{A} 及 $\mathbf{S} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]$ 称为摄像机内部参数。

对于双目立体测量系统,如图 1(b)所示,除了两个摄像机的内部参数需要标定之外,还需要确定

它们之间的相对位置和姿态,用 $\mathbf{R}_{l2r}, \mathbf{t}_{l2r}$ 表示从左摄像机坐标系到右摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量,有如下变换关系:

$$\mathbf{X}_r = \mathbf{R}_{l2r} \mathbf{X}_l + \mathbf{t}_{l2r}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{X}_l 和 \mathbf{X}_r 分别表示三维空间点 D 在左摄像机和右摄像机坐标系下的坐标。 \mathbf{R}_{l2r} 和 \mathbf{t}_{l2r} 称为系统外部参数。

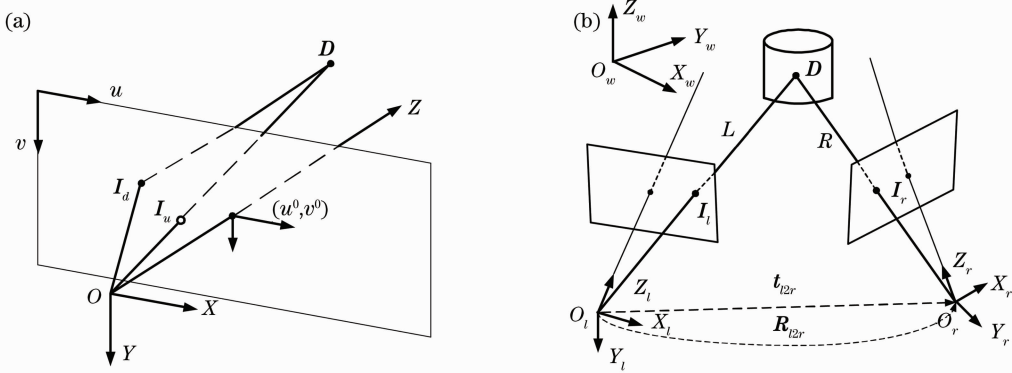


图1 摄像机成像模型。(a)畸变模型示意图；(b)双目立体成像示意图

Fig.1 Camera imaging model. (a) Schematic of distortion model; (b) schematic of stereo vision imaging model

3 标定原理及过程

将单个相机在不同时刻拍摄的多张图像叫做一组序列图像；左右相机同时拍摄的两张图像叫做立体图像对。

系统标定流程如图2所示，首先由左右相机各

自拍摄的一组序列图像，单独标定两摄像机内参数，分别获得两相机的内参数和靶点三维坐标，这两组三维靶点分别位于左右相机拍摄立体图像对时各自的相机坐标系下；根据这两组三维靶点之间的刚体旋转平移变换关系，得到系统外参数。

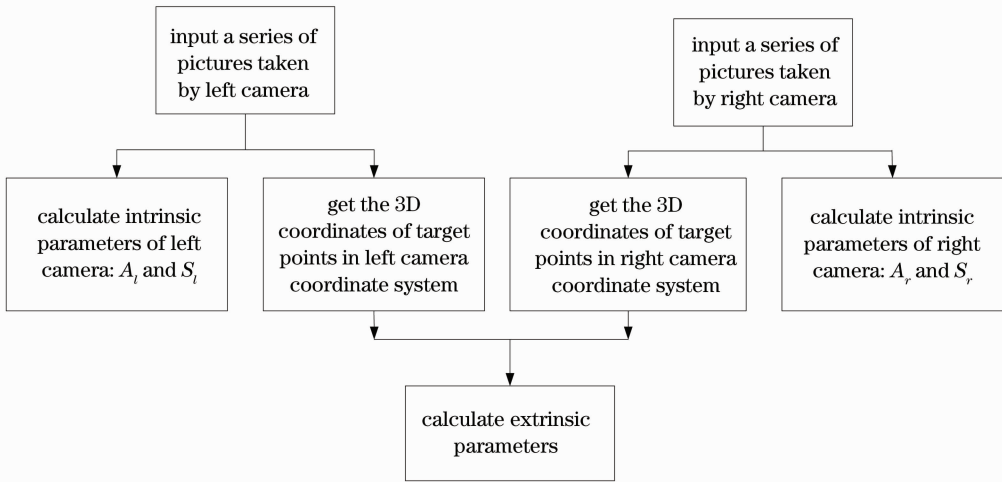


图2 系统标定流程图

Fig.2 Flow chart of system calibration

3.1 标定靶标识别

3.1.1 标定靶标的构成

如图3所示，十字靶标由两根相互交叉的靶尺构成，两根靶尺为可拆装结构，便于制作和携带。靶尺上若干个编码元和非编码元相间分布(编码元和非编码元统称为靶点)，靶点成一条直线等间距排列，无需精确确定每个靶点的位置。靶尺带有预先精确测量得到的标准距离，其中 $L_0 = 589.677 \text{ mm}$ ， $L_1 = 588.652 \text{ mm}$ 。

编码元结构如图4(a)所示，由其中间的目标圆和外缘的编码环两部分组成。目标圆中心用于定位；对图像进行边缘检测，采用最小二乘椭圆拟合法

提取图像中的椭圆目标，采用定位精度高且易于实现的质心法计算目标圆中心的亚像素图像坐标，从而精确确定编码元的图像位置；编码环用于编码：按照角度将圆环平分为15份，每一份根据黑白颜色对应一个二进制位“0”或者“1”，利用这15个二进制位进行编码以确定编码元身份号。详细讨论参见文献[13]。

成像后的非编码元如图4(b)所示，位于两个编码元中心连线的中点。其采用与编码元相同的定位方法定位，3.1.2节方法进行编码，使非编码同样具有唯一确定的身份号。由于靶点身份号的唯一性，可方便可靠的建立起多幅图像之间同名点的对应关

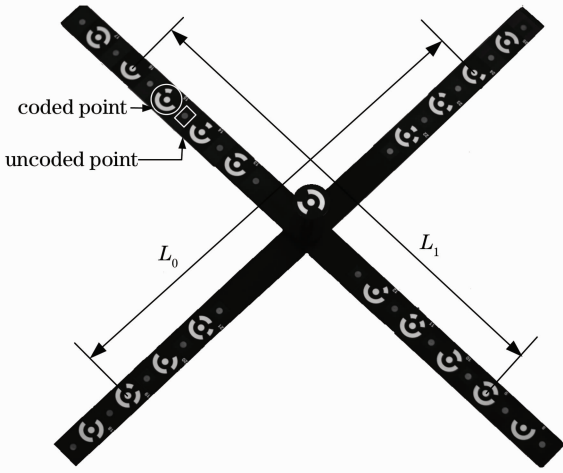


图 3 十字靶标

Fig. 3 Calibration cross



图 4 靶点示意图。(a)编码元及编码原理；
(b)成像后编码元及非编码元

Fig. 4 Schematic of target points. (a) Coded points and encoding principle; (b) coded and uncoded points in images

系,也解决了图像点和空间点的对应问题。

3.1.2 非编码元的编码

利用十字靶标的结构特点和编码元身份号的唯一性来对非编码元进行编码,使其具有唯一确定的身份号,方法如下:

1) 非编码元的粗分类:

计算每个非编码元到 L_1 和 L_2 的距离,距离 L_1 近,就将它分到第一组 G_1 ,反之,分到第二组 G_2 。

2) 非编码中杂点的排除:

采用如下的位置准则:第一组非编码元 G_1 中,计算每个非编码元到直线 L_1 的距离,若大于经验阈值(本文取 3 pixel),则删除该非编码元;第二组同理。

3) 编码元分组:

将编码元原始身份号转换为简单 ID 号:从 1 开始,逐渐递增,只取奇数;根据两根靶尺物理上和图像上 ID 号的一一对应关系,将所有编码元分成两组,并拟合成两条直线 L_1 、 L_2 。

4) 计算方向向量:

将编码元中的两组按 ID 号分成 4 组,记为 T_i ($i=1\sim 4$)。寻找 T_i 中 ID 号最小的编码元,其中心

坐标为 $[x_{\min ID} \ y_{\min ID}]^T$,ID 号为 $N_{\min ID}$;ID 号最大的编码元,其中心坐标为 $[x_{\max ID} \ y_{\max ID}]^T$,ID 号为 $N_{\max ID}$ 。由

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} = \frac{1}{N_{\max ID} - N_{\min ID}} \begin{bmatrix} x_{\max ID} - x_{\min ID} \\ y_{\max ID} - y_{\min ID} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

计算单位方向向量 $[x_I \ y_I]^T$ 。

5) 计算非编码的坐标:

由 4) 得到的方向向量及直线上一点容易得到直线方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\min ID} \\ y_{\min ID} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\lambda = -1, 3, 5, 7, \dots, (N_{\max ID} - N_{\min ID}) + 1$, 可以依次计算出各个非编码元在图像上的坐标位置,但由于透视成像、靶标制作时靶点定位误差、图像噪声等因素的影响,图像上提取出来的该非编码元的坐标位置与(5)式的结果有一定偏差,所以在(5)式计算结果的一定经验阈值(本文取 18 pixel)内进行寻找,对查找到的非编码元赋予 ID 号为 $N_{\min ID} + \lambda$ 。图 5(a)为编码后的十字靶标,其中编码元的 ID 号是用红色标记的奇数表示(彩图请见网络电子版),非编码元的 ID 号是用绿色标记的偶数表示。图 5(b)为十字靶标在不同图像中同一局部的放大图。

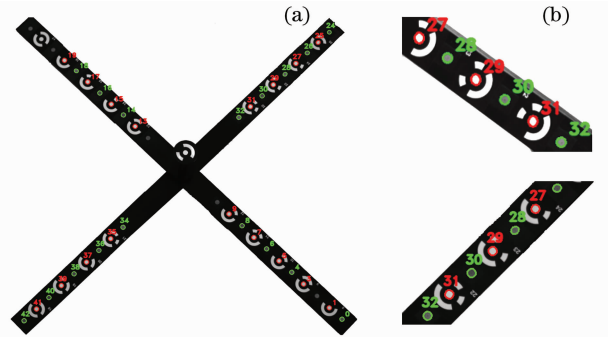


图 5 编码后的十字靶标。(a)整体图;(b)不同图像
同一局部放大图

Fig. 5 Coded calibration cross. (a) Entire picture; (b) same partial enlarged detail in different pictures

3.2 标定内参数

3.2.1 各幅视图的位置姿态和靶点空间坐标的初值求解

两相机内参数分别独立获得,其求解原理相同,以左相机为例。对于左相机拍摄的一组序列图像,首先确定前两幅视图间的相对位置姿态:采用 3.1 节方法对图像上的靶点进行识别和精确定位后,通过身份号实现前两幅图像之间同名点的准确匹配。使用随机采样一致性(RANSAC)^[14]算法估计基本

矩阵 F , 根据 $E = A^T F A$ 计算出本质矩阵 E , 这里内参数矩阵 A 中的各个分量可暂时采用摄像机出厂的标称值, 3.2.2 节将对 A 进行精确优化。由于本质矩阵只与两视图几何有关, 因此对本质矩阵进行奇异值分解, 过程见文献[14], 可确定两视图相机位姿 R_1 和 t_1 。

两视图相机姿态确定后, 在相机摄取第一幅视图时的相机坐标系下, 利用文献[15]中的多视图几

何约束下的精确三维重建方法, 重建两幅视图中所有建立了同名匹配的靶点中心三维坐标。如图 6 所示, 在对第 $i(i > 2)$ 幅视图进行处理时, 只要该图像中存在 4 个以上已在前面重建出了三维坐标的靶点, 即可求出该幅视图对应的位置姿态 R_i 和 t_i 。根据(1)式, 每组图像点和空间点的对应 $p_{ij} \rightarrow P_j$ (其中下标 j 表示第 j 个空间点) 可产生两个线性方程如下:

$$\begin{cases} dx(u_n - u^0)(r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_3) - f(r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + t_1) = 0 \\ dy(v_n - v^0)(r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_3) - f(r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + t_2) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 r_{mk} 为矩阵 R_i 第 m 行 k 列的元素, t_m 为三维向量 t_i 第 m 行的元素。由 4 组对应点可以产生 8 个方程, 即可求出该幅视图的位置姿态, 通常利用较多的对应点, 采用最小二乘法确定 R_i 和 t_i 。在估计出第 i 幅视图的相机位姿后, 通过多视图几何约束下的精确三维重建方法, 可进一步重建出第 i 幅视图中新出现的且可以在前 $(i-1)$ 幅图像中找到同名匹配的靶点中心的三维坐标。

$$\min_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| \hat{p}_{ij}(a_1, \dots, a_6) - p_{ij}(A, R_i, t_i, \tilde{P}_j) \|^2, \quad (7)$$

式中 n 表示视图个数; m 表示重建出的靶点中心空间点的个数; 畸变系数 $a_1 \sim a_6$ 的初始值为 0; A 的初始值取相机出厂值; R_i, t_i, \tilde{P}_j 的初值在 3.2.1 节中已求出; p_{ij} 为点 P_j 对应的非畸变图像坐标, 可由(1)式求得; \hat{p}_{ij} 由重建出的点 P_j 在第 i 幅图像中对应的实际像点坐标经(2)式做畸变校正得到。(6)式的优化问题采用莱文伯-马夸特(LM)算法迭代求解。

由上述非线性优化过程便可求出相机内参数矩阵 A 和畸变系数 $a_1 \sim a_6$ 的精确解, 同时可获得优化后的靶点三维坐标 \tilde{P}_j , 但优化后的三维坐标与真实值相差一个比例系数 $s, s = (L_0/\hat{L}_0 + L_1/\hat{L}_1)/2$, 其中 L_0 和 L_1 为图 3 中事先精确测量的实际距离, \hat{L}_0, \hat{L}_1 为优化后的重建距离。相机内参数求解流程如图 7 所示。

3.3 标定外参数

现场标定时, 两相机同时拍摄第一对靶标图像, 保证第一对图同时看到十字靶标上的靶点, 后序的图像序列可以分相机单独拍摄, 得到左右两组图像序列, 如图 8 所示。左相机拍摄第一幅图像时的左相机坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 与右相机拍摄第一幅图像时的右相机坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 之间的变换矩阵就是系统外部参数 R_{l2r}, t_{l2r} 。而使用 3.2 节方法求相机内参数时, 求得的靶点三维坐标在相机拍摄第一幅图像时的相机坐标系下, 因此, 如图 9 所示, 只要求出左相机坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 下的三维点集 S_l 和右相机坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 下的三维点集 S_r 之间的刚性变换关系即是系统外参数。

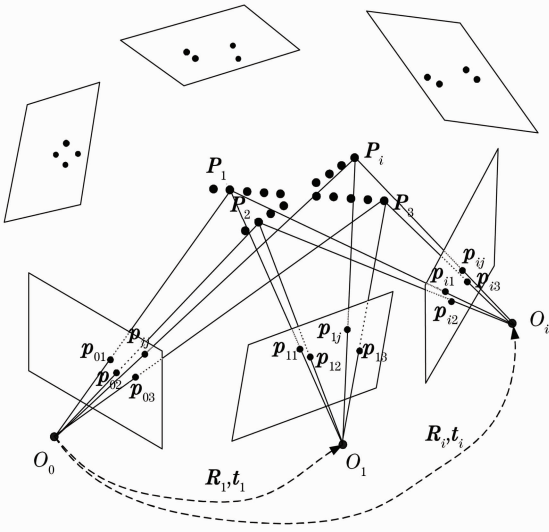


图 6 单相机拍摄的序列图像间的几何关系图
Fig. 6 Geometrical relation of series of images photographed by a camera

3.2.2 光束平差优化

由于逐次加入新图像, 必然会造成累积误差, 采用光束平差算法^[16]对相机内参数矩阵 A 、畸变系数 $a_1 \sim a_6$ 、第 i 幅图像的相机姿态 R_i 和 $t_i (1 \leq i \leq n)$ 和靶点三维坐标 \tilde{P}_j 进行优化以求得精确解。定义如下代价函数:

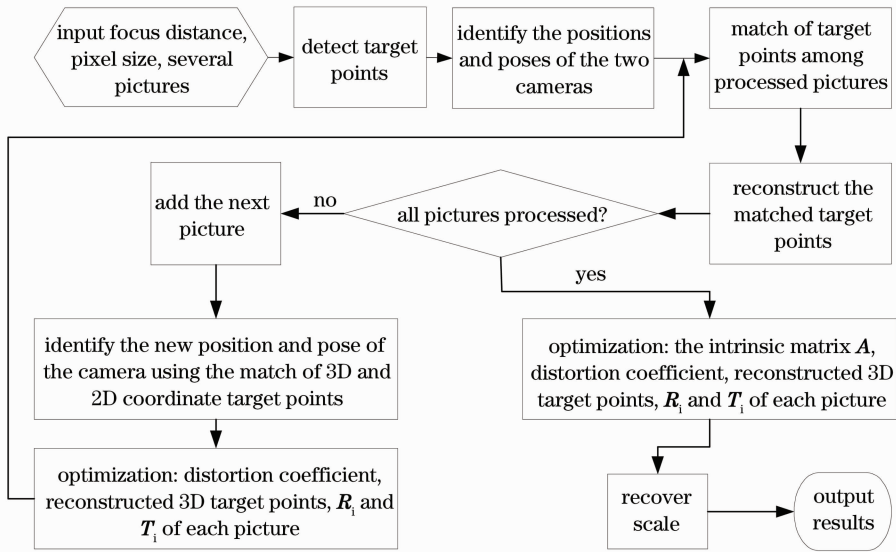


图 7 内参数求解流程图

Fig. 7 Flow chart of calculating intrinsic parameters

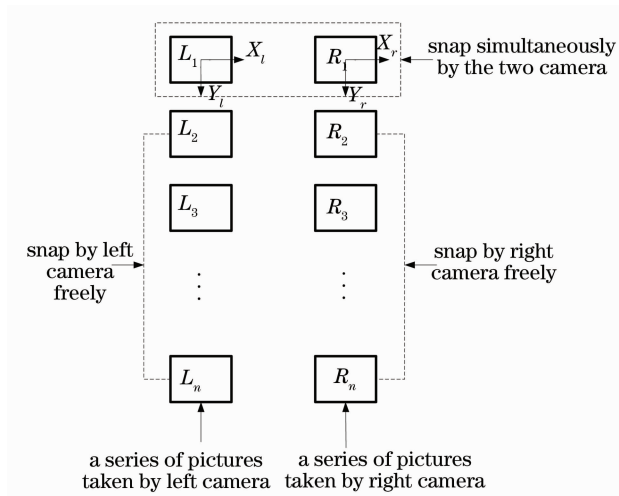


图 8 两组序列图像拍摄方法示意图

Fig. 8 Shooting method of two series of pictures

三维点集 S_1 和 S_2 是分别由左、右相机对应的图像序列重建出的靶点空间坐标,由靶点的身份号可方便建立起两个三维点集之间的对应关系,则问题抽象为:已知两个相同元素个数的三维坐标点的集合 $\Delta = \{X_i\}, \Delta' = \{X'_i\}, i = 1, 2, \dots, N$, 其中 N 表示集合的元素个数,且 $N \geq 3, X_i \in \mathbb{R}^3$ 和 $X'_i \in \mathbb{R}^3$, 满足下式:

$$X'_i = R_{l2r} X_i + t_{l2r} + n_i, \quad (8)$$

式中 R_{l2r} 是 3×3 旋转矩阵, t_{l2r} 是平移向量, n_i 是噪声向量。问题的目标是求旋转矩阵 R_{l2r} 和平移向量 t_{l2r} 使目标函数最小化,目标函数为

$$Q(R_{l2r}, t_{l2r}) = \sum_{i=1}^N |X'_i - (R_{l2r} X_i + t_{l2r})|^2, \quad (9)$$

使用奇异值分解(SVD)方法^[17,18]求解该最小化问题。

4 实验验证

4.1 相机标定实验

实验中使用的双目视觉系统的硬件如下:两个摄像机采用 DH-SV1410FM CCD 视觉传感器:像元物理尺寸为 $0.00645 \text{ mm} \times 0.00645 \text{ mm}$,分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$;光学镜头使用 Schneider-KREUZNACH 镜头,焦距为 17 mm 。

标定实验现场如图 10 所示,按照 3.3 节叙述的拍摄方法得到左右两组图像序列后,由本文标定算法,得标定结果为:

左相机内参数矩阵和镜头畸变系数为

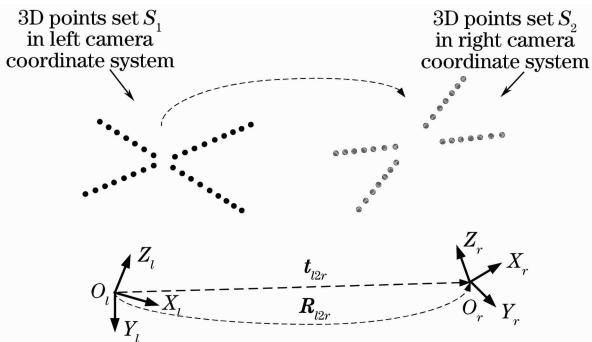


图 9 外相机求解示意图

Fig. 9 Schematic of calculating extrinsic parameters

$$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} 2740.27 & 0 & 655.84 \\ 0 & 2740.54 & 532.47 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_l = [-27289.7 \quad -11.763 \quad 1.864 \quad 0.633 \quad 0.915 \quad -27775.7] \times 10^{-6}.$$

右相机内参数矩阵和镜头畸变系数为

$$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 2738.89 & 0 & 695.76 \\ 0 & 2738.86 & 509.52 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_r = [-1020.7 \quad 229.603 \quad 230.716 \quad -4.590 \quad 0.344 \quad -1754.18] \times 10^{-6}.$$

左右相机之间的相互位置关系为

$$\mathbf{R}_{l2r} = \begin{bmatrix} 0.977 & -0.016 & 0.214 \\ 0.015 & 1.000 & 0.006 \\ -0.214 & -0.002 & 0.977 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t}_{l2r} = \begin{bmatrix} -404.199 \\ -5.546 \\ 21.467 \end{bmatrix}.$$

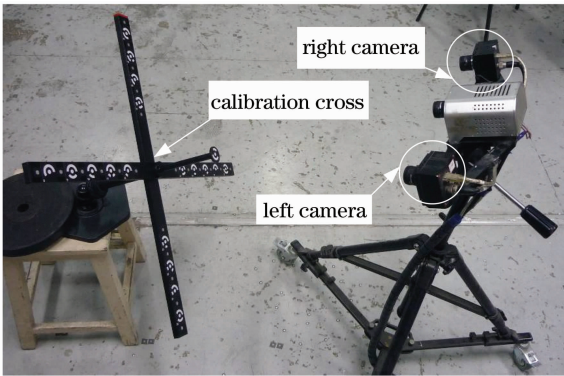


图 10 标定实验现场示意图

Fig. 10 Schematic of on-site calibration experiment

4.2 精度验证

4.2.1 重投影误差

为了对本文标定算法的精度进行检验,首先分析三维空间点的重投影误差。利用标定得到的内、外部参数,对十字靶标上的三维空间点做正向投影变换,并用本文方法获得的畸变系数进行畸变矫正,得到在这种内外部参数条件下的十字靶标上靶点的像素坐标,分别计算该像素坐标与实际图像中提取出的对应特征点的像素坐标之间的平均误差 Mean(像素),最大误差 Max(像素)及标准差 Standard deviation,(像素) σ ,如表 1 所示,十字靶标上靶点的重投影平均误差为 0.067 pixel,最大误差为 0.141 pixel,可见本文方法可达到良好的重投影误差结果。

表 1 重投影误差

Table 1 Reprojection errors

Serial number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
Mean	0.068	0.063	0.070	0.078	0.066	0.078	0.073	0.055	0.056	0.062	0.066	0.067
Max	0.149	0.130	0.130	0.177	0.156	0.164	0.161	0.153	0.100	0.104	0.131	0.141
σ	0.042	0.031	0.029	0.041	0.042	0.041	0.038	0.036	0.031	0.030	0.042	0.037

4.2.2 标准长度测量实验

为进一步评价标定精度,采用对标尺长度进行

测量的方式验证。如图 11 所示,标尺上两个编码元之间的实际距离精确测量为 $D=611.800 \text{ mm}$ 。

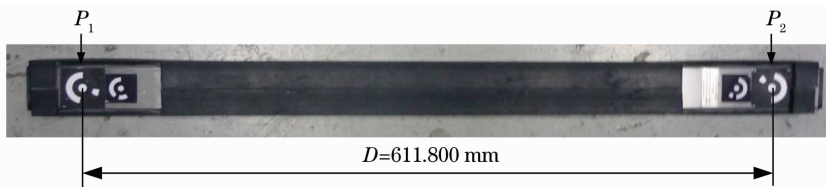


图 11 标尺

Fig. 11 Staff gauge

固定相机坐标系,将标尺放在测量视场内的任意不同位置,使用本文方法标定后的双目立体测量系统拍摄标尺图像,提取标尺上两个编码元中心,重建其空间三维坐标,计算出两个三维空间点之间的距离,并与真实距离进行比较。将各次测量重建出

的标尺在空间中的位置显示在统一坐标系下,如图 12(a)和(b)所示,分别从不同视角展示了各次测量重建的标尺的空间位置分布。标准长度 D 的重建结果如表 2 所示。

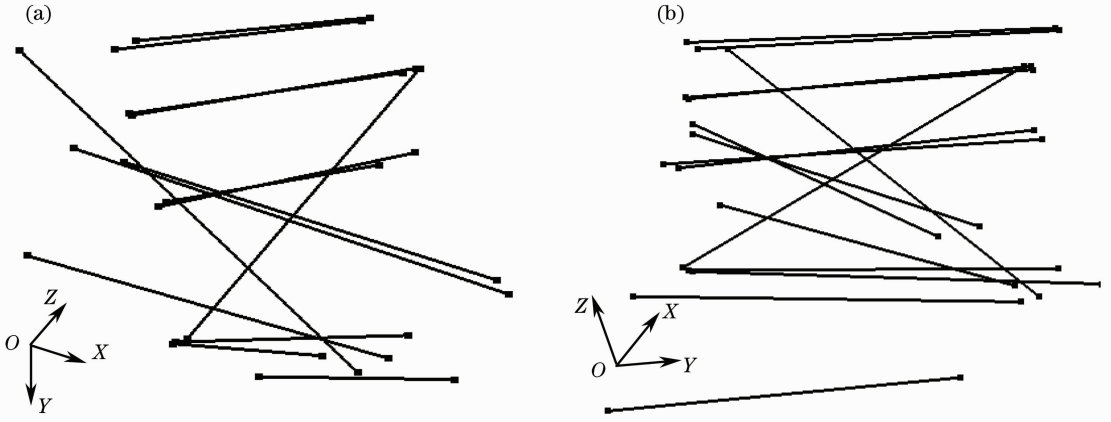


图 12 各次测量、重建的标尺空间分布示意图。(a) 视角 1; (b) 视角 2

Fig. 12 Spatial distribution of a staff measured and reconstructed several times. (a) View 1; (b) view 2

表 2 标准长度 D 的重建结果(单位:毫米)

Table 2 Reconstruction results of standard length D (unit: mm)

Serial number	3D coordinate of target point P_1			3D coordinate of target point P_2			Measure distance	Absolute error
	X	Y	Z	X	Y	Z		
1	-295.724	85.990	1603.461	303.136	-27.545	1655.860	611.777	0.023
2	307.802	-32.053	1682.583	-281.476	242.721	1569.767	611.829	-0.029
3	-229.008	-2.918	1554.854	358.310	-11.019	1725.962	611.789	0.011
4	369.372	-10.438	1667.997	-231.172	-2.266	1551.468	611.800	0.000
5	355.790	-52.554	1640.159	-239.342	-43.583	1498.905	611.733	0.067
6	-253.963	-163.694	1504.622	351.316	-146.172	1591.783	611.775	0.025
7	354.531	234.401	1616.677	-246.880	230.355	1504.541	611.790	0.010
8	-248.933	227.428	1519.353	354.163	233.264	1622.180	611.828	-0.028
9	-250.189	174.958	1522.083	356.808	188.149	1597.316	611.785	0.015
10	349.696	186.880	1603.975	-256.330	176.447	1520.965	611.774	0.026
11	338.578	121.292	1635.476	-260.519	103.262	1513.097	611.736	0.064
12	-248.847	101.502	1524.953	355.622	124.902	1615.956	611.730	0.070
13	-254.546	141.282	1536.133	342.012	14.104	1583.107	611.770	0.030
14	-229.400	-1.667	1543.590	350.500	187.045	1591.947	611.748	0.052
15	301.640	-0.489	1559.656	-289.042	158.548	1550.845	611.782	0.018

从表 2 可以看出,标准长度 D 进行 15 次测量后,获得平均值为 611.776 mm,标准差 0.030 mm。当然,测量实验的精度不仅与标定精度有关,还受靶点中心定位精度等因素影响。所以在本文表 2 的数据中,会出现个别次测量绝对误差偏大的情况,如第 5、11、12、14 次的测量。

5 结 论

提出了一种基于十字靶标的双目立体测量系统现场标定方法。由多视图几何约束和光束平差优化首先精确获得两相机内参数,再由两组三维特征点集之间的刚体变换求得系统外参数,直接得到最终标定结果。利用本文算法标定的结果,对长度为 611.800 mm 的标

尺进行重建, 测量平均值 611. 776 mm, 标准差 0. 030 mm。

与其他的标定方法相比, 本文方法具有如下特点和优势:

1) 该方法只需双相机同时拍摄第一对靶标图像, 再由两相机单独各拍摄几幅图像即可, 现场操作简单方便;

2) 可拆装十字靶标具有突出的便携性和使用方便性, 且只需精确测量每根靶尺上两个靶点之间的物理距离, 无需已知每个靶点的坐标位置, 无需靶点共面, 相对于其他标定物, 大尺寸的十字靶标更容易加工, 方便实现更大视场的现场标定;

3) 十字靶标的每个靶点具有唯一确定的身份号且便于识别, 使图像间匹配以及图像点和空间点的对应匹配方便快捷;

4) 从靶标设计及加工、标定算法实现和现场操作过程都可以看出, 本文方法可方便地扩展至多目相机系统的标定。

参 考 文 献

- Zhang Qiong, Wang Zhiliang, Chi Jian *et al.*. Calibration for gaze tracking system based on stereo cameras and plane mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 1308~1314
张琼, 王志良, 迟健男等. 基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 1308~1314
- Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- Zhang Hui, Zhang Liyan, Wei Hu. Three-step calibration for binocular stereo system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(16): 1899~1903
张辉, 张丽艳, 韦虎. 双目立体测量系统标定的三步法[J]. *中国机械工程*, 2009, **20**(16): 1899~1903
- Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- R. K. Lenz, R. Y. Tsai. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-d machine vision metrology [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, **10**(5): 713~720
- Li Weimin, Meng Hao, Wang Jianping *et al.*. Wide view calibration of single cameras [J]. *J. University of Sci. & Technol. of China*, 2007, **37**(6): 627~630
李为民, 孟昊, 王建平等. 单场景摄像机的大视场标定[J].

- 中国科学技术大学学报, 2007, **37**(6): 627~630
- Wang Yongqiang, Lu Naiguang, Deng Wenyi *et al.*. The new online calibration method in large-scale videogrammetry system [J]. *Opt. Tech.*, 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
 - Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
姜广文, 晁志超, 伏思华等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
 - Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1297~1303
朱嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1297~1303
 - Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming *et al.*. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
 - Ye Nan, Zhang Liyan. Determining plastic strain ration of sheet metal based on stereo vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3515~3523
叶南, 张丽艳. 基于立体视觉的板料塑性应变比测量[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3515~3523
 - G. Q. Wei, S. D. Ma. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiment [J]. *IEEE Trans Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 1994, **16**(5): 469~480
 - Zhou Ling, Zhang Liyan, Zheng Jiandong. Automated reference point detection in close range photogrammetry [J]. *J. Appl. Sci.*, 2007, **25**(3): 288~294
周玲, 张丽艳, 郑建冬. 近景摄影测量中标记点的自动检测[J]. *应用科学学报*, 2007, **25**(3): 288~294
 - R. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Hefei: Anhui University Press, 2002. 173~176
计算机视觉中的多视图几何[M]. 韦穗, 杨尚骏, 章权兵等译. 合肥, 安徽大学出版社, 2002. 173~176
 - Ye Nan. Key Techniques and Systems of Sheet Metal Formability Analysis Based on Machine Vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. 66~67
叶南. 基于机器视觉的板料成形性能分析关键技术及系统实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011. 66~67
 - M. I. A. Lourakis, A. A. Argyros. The design and implementation of a generic sparse bundle adjustment software package based on the Levenberg-Marquardt algorithm [R]. Technical Report FORTH2ICS/ TR2340, 2004, 1~19
 - K. S. Arun, T. S. Huang, S. D. Blostein. Least squares fitting of two 3-D point sets [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, **9**(5): 698~700
 - B. K. P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4): 629~642

栏目编辑: 李文洁