

文章编号 1004-924X(2012)02-0369-10

大视场多像机视频测量系统的全局标定

胡 浩*, 梁 晋, 唐正宗, 史宝全, 郭 翔
(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对大视场多像机视频测量系统的全局标定,提出并实现了一种基于近景摄影测量技术的高精度像机标定方法。首先,设计一种带有标志点的十字架形标定参考物,十字架正反两个表面粘贴有环形的编码标志点和圆形的非编码标志点。然后,在现场用工业摄影测量系统 XJTUDP 重建出双面标定十字架的精确结构尺寸数据;将标定十字架在公共视场范围内依次摆出多个姿态,并控制多像机同步拍摄各姿态的图像。最后,为大视场像机选择 10 参数非线性成像模型,对采集的图像组依次进行标定运算,标定出各像机的内参数和畸变参数,并全局定向出各个像机在统一坐标系下的外方位参数。实验结果表明,该标定方法的重投影误差小于 0.05 pixel;利用标定结果测量高精度标准尺长度,相对误差小于 1/4 000,可满足大视场多像机视频测量对精度和效率的要求。

关键词:视频测量;多像机标定;全局标定;光束平差;双面十字架

中图分类号:TP391;TN948.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0369

Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view

HU Hao*, LIANG Jin, TANG Zheng-zong, SHI Bao-quan, GUO Xiang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: huhaol36@163.com

Abstract: An accurate global calibration method for a multi-camera videogrammetric system with large field-of-view is presented. Firstly, a cross target with feature points pasted on its two sides is designed as the calibration reference pattern, and the world coordinates of these feature points are reconstructed using the XJTUDP photogrammetric system. Then, the calibration target is placed in the public field-of-view and its images shown at different orientations are captured by the four cameras simultaneously. Finally, based on a 10-parameter nonlinear camera model, the captured images are calibrated successively and the camera interior parameters and global orientation parameters with respect to a predefined global coordinate system are obtained. Experimental result indicates that the proposed calibration method can offer a considerable accuracy in a re-projection error less than 0.05 pixel. By the proposed method, the four-camera videogrammetric system can achieve a relative accuracy of 1/4 000 on length measurement. It can satisfy the demands of the multi-camera videogrammetric measurement with large field-of-view for precision and efficiency.

收稿日期:2011-09-19;修订日期:2011-11-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975219)苏州市应用基础研究计划资助项目(No. SYG201014)

Key words: videogrammetry; multi-camera calibration; global calibration; bundle adjustment; two-side cross target

1 引言

视频测量是近十几年来国际上迅速发展起来的新兴交叉学科,它是由传统的光学测量、摄影测量学、计算机视觉以及数字图像处理分析等学科交叉、融合,取各学科的优势形成的^[1]。随着 CCD 技术、计算机视觉、数字近景摄影测量技术的不断发展,视频测量技术的研究和应用也取得了长足的进步,视频测量已经被广泛应用于各种动态变形测量和运动测量,例如结构三维振动测量、飞机模型风洞实验、大型建筑物安全监测、铁路桥梁质量检测、飞行器弹道姿态等运动参数的测量等^[2-7]。视频测量的处理对象是物体运动或变形过程中的时间序列图像,为了从图像中定量提取、测量空间物体的几何信息和运动信息,必须建立图像中像点位置和空间中物点位置的相互对应关系,而这一相互关系由像机成像几何模型决定。该几何模型的参数称为摄像机参数,分为内参数和外参数,求解和确定这些参数的过程即为像机的标定。对于多像机视频测量系统,各个像机所获得的测量数据不具有统一性,不能对整个被测对象或场景实现一致的描述,因此,所有像机的标定结果还需要统一到一个坐标系下来表达,这一过程称为多像机测量系统的全局标定。

1987 年, Tsai^[8] 提出了经典的两步标定方法,采用立体或者平面的网格作为标定参考物,并使用像机供应商提供的数据作为初始值以简化初始值计算。如果标定参考物加工精度很高,则该方法的标定精度较高。1992 年, Weng^[9] 在 Tsai 的基础上提出了考虑径向畸变、切向畸变和像平面畸变的更为全面的像差修正模型,提高了像机标定的精度。1997 年, Heikkila 和 Silven^[10] 将两步法改进为四步法,增加的两步分别补偿圆特征提取误差和用逆向经验模型修正径向和切向畸变。1999 年, Zhang^[11-12] 提出了一种用平面棋盘网格模板的标定方法,该方法要求绘制一个具有

精确定位点阵的棋盘网格模板,只需对平面模板在不同方位拍摄两幅以上的图像即可完成标定运算。在国内,陈刚等^[13]提出了一种基于立体模板匹配的双目摄像机标定方法。孙军华等^[14]提出了一种用于大视场双目摄像机标定的方法。这些方法通常需要知道标定参考物精确的物方坐标,这给其加工带来了很大困难,尤其是对于多像机标定。Faugeras 等^[15]于 1992 年提出了像机自标定的思想,使得在场景未知和像机作任意运动的一般情形下的标定成为可能。自标定法不需要已知参考物和其他的空间三维信息或摄像机参数,仅利用多次成像之间的约束关系计算像机参数,是当前计算机视觉和摄影测量学界研究的热点。

针对大视场多像机视频测量系统全局标定的难题,本文为大视场像机选择非线性成像模型,借助于设计的双面标定十字架,在现场用工业摄影测量系统 XJTUDP 重建出标定十字架的结构数据作为多像机系统的标定参考物;然后,将标定十字架在公共视场范围内依次摆出多个姿态,并控制多像机同步拍摄各姿态的图像;最后,对采集的图像组利用光束平差法依次进行标定运算,标定了各像机的内参数和畸变参数,并全局定向出各个像机在统一坐标系下的外方位参数。

2 大视场多像机标定

2.1 非线性像机成像模型

物体点经过像机镜头摄影后成像到像平面上,理想的投影成像模型是几何光学中的小孔成像模型。但实际中使用的像机,由于各种干扰因素的存在,成像时,主点的像平面坐标不严格为零,存在一个微小值。另外,由于镜头存在径向畸变,离心畸变和像平面畸变等^[16],使得各像点在像平面上相对其理论位置也存在偏差,实际像机的成像模型是非线性的如图 1 所示,通过摄影测量共线方程表述为

$$\left. \begin{aligned} x-x_0+dx &= -f \frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0+dy &= -f \frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

其中, (x, y) 是图像点在图像坐标系的坐标, (x_0, y_0) 是主点坐标, f 是焦距, (dx, dy) 为畸变量, (X, Y, Z) 是物体点在物方坐标系的三维坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 是镜头中心在物方坐标系的三维坐标。

$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$ 是物方坐标系相对于像机坐标系的变换矩阵。

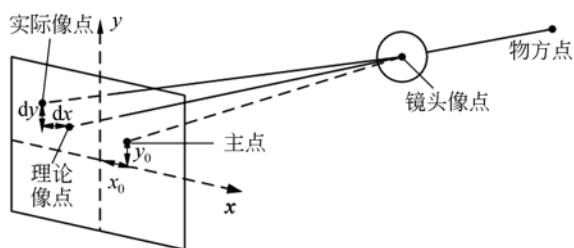


图 1 像机成像非线性模型
Fig. 1 Nonlinear camera model

为了降低计算的复杂度,许多研究者的标定算法通常只考虑二阶径向畸变,这样势必会降低标定的精度。本文的标定算法将所有可能的畸变都考虑在内,所采用的畸变模型为

$$dx = A_1 x(r^2 - r_0^2) + A_2 x(r^4 - r_0^4) + A_3 x(r^6 - r_0^6) + B_1(r^2 + 2x^2) + 2xyB_2 + E_1 x + E_2 y, \quad (2)$$

$$dy = A_1 y(r^2 - r_0^2) + A_2 y(r^4 - r_0^4) + A_3 y(r^6 - r_0^6) + B_2(r^2 + 2y^2) + 2xyB_1, \quad (3)$$

其中, A_1, A_2, A_3 是径向畸变系数, B_1 和 B_2 是切向畸变系数, E_1 和 E_2 是像平面畸变系数, $r^2 = x^2 + y^2$, r_0 是畸变曲线的二次零点,再加上 2 个主点坐标 (x_0, y_0) 及焦距 f 共 10 个内参数,本文称之为 10 参数非线性成像模型。

2.2 基于光束平差的像机标定

像机标定是为了确定像机的内部参数和外部参数。内部参数定义了像机的光学和几何特性,而外部参数则描述了像机坐标系相对于某预定义的全局坐标系的旋转和平移信息。

将共线方程(1)线性化可得相应的误差方程

$$V = AX_1 + BX_2 + CX_3 - L, \quad (4)$$

其中, V 为像点坐标残差,也称重投影误差, $X_1,$

X_2, X_3 分别为内参数(包括畸变参数)、外参数和物方点坐标的改正数, A, B, C 分别是相应的偏导数矩阵, L 是观测值。对于误差方程(4),如果以图像坐标为观测值,把摄像机内、外方位参数和物方点坐标都当作未知数来求解,该过程称为光束平差^[17]。如果已知物方点坐标求内参数和外参数,对应的误差方程可简化为

$$V = AX_1 + BX_2 - L. \quad (5)$$

方程(4)、(5)都可以通过最小二乘算法求解。这一过程属于多参数非线性优化,所有的内参数、外参数以及物体点三维坐标被不断地优化直到合适的精度。

2.3 标定参考物设计

为了满足大视场多像机全局标定及计算自动化的需要,专门设计制作了带有标志点的双面标定十字架(图 2)。十字架正反两个表面粘贴有环形的编码标志点和圆形的非编码标志点,标定图像采集过程中十字架各姿态无需精确控制,只需在视场范围内不同方位近似均匀出现即可。此型标定十字架易拆卸、携带和组装,不易变形,适于大视场现场标定。



图 2 标定十字架
Fig. 2 Cross-shaped calibration target

对于所设计的双面标定十字架,对其表面标志点的检测采用如下步骤:

- (1) 采用 Canny 算法^[18]搜索标定图像中的所有边缘,得到单像素宽的闭合边缘集;
- (2) 用梯度幅值作为权值来计算沿梯度方向

的位置加权值,对边缘位置沿梯度方向做亚像素级校正

$$\delta d = \frac{\sum_{i=1}^n g_i d_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (6)$$

其中, d_i 是一个像素沿梯度方向与检测到的边缘点的距离, g_i 是梯度幅值;

(3)利用圆度准则检测出边缘集中的椭圆,并利用其它先验信息去除不符合条件的椭圆,如椭圆的面积大小、凹凸性、封闭性、与相邻椭圆的距离等^[19];

(4)采用两次最小二乘拟合出椭圆的中心,第一次拟合后去除掉距离大于 3σ 的边缘,再进行第二次拟合;

(5)判断椭圆外围是否有环带,如果没有则为非编码点;如果有则径向作内外边界的连线,在连线上等距离采样 5 次,以 5 次采样的中值与标志点的灰度阈值作比较,大于阈值则本环带的编码为 1,否则为 0;每 36° (对应于 10 位编码点)重复上述操作,旋转一周后得到形如“0100100111”的二进制编号;

(6)查表得到编码标志点的 ID。

实验表明上述算法的标志点定位精度可达到 0.02 pixel。

标定十字架在现场组装完成后,由于标志点之间原来的结构关系可能会发生变化,因此,还需要对其结构数据进行重新测定。利用本课题组开发的工业摄影测量系统 XJTUDP 完成此项工作,具体测量过程详见文献^[20]。图 3 显示了 5 m 幅面标定十字架三维结构数据的测量结果。

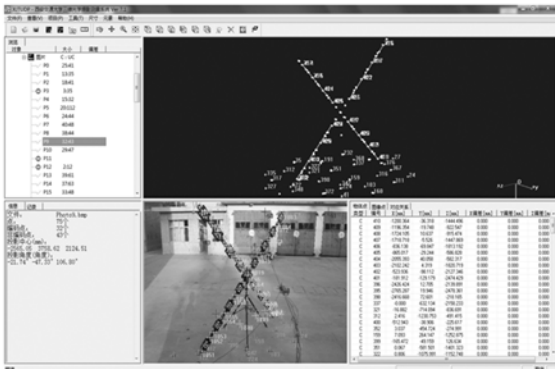


图 3 用 XJTUDP 系统计算十字架三维结构数据

Fig. 3 3-D reconstruction of calibration target by XJTUDP system

2.4 多像机全局标定

测得标定十字架结构数据后,将标定十字架在公共视场范围内摆出多个姿态,并控制多像机同步拍摄各姿态的图像,姿态数以 8~24 个为宜。以 5 m 视场为例,实验中采用 4 个高速像机采集了标定十字架在测量范围内的 24 个不同姿态图像,图 4 列出了其中某一姿态下 4 个像机分别拍摄的图像。

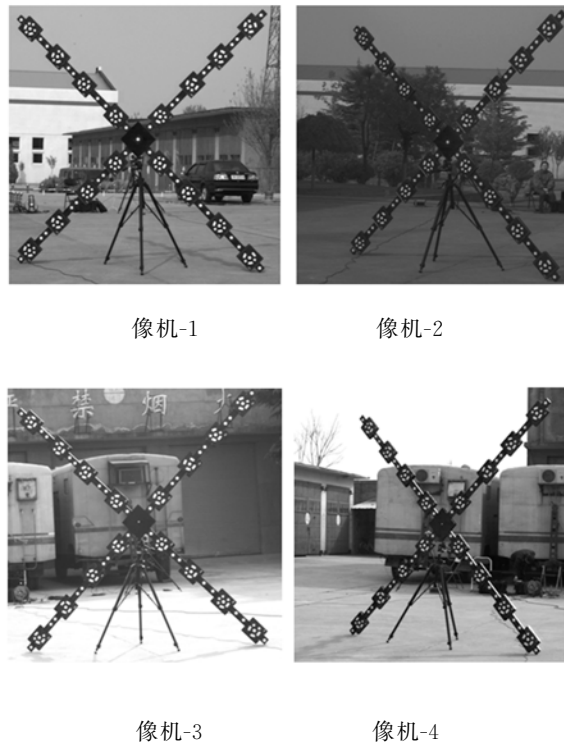


图 4 标定十字架某姿态在 4 个像机中的成像

Fig. 4 Images for calibration taken by four calibrating cameras

根据所采集的标定图像,进行多像机标定运算和全局定向,具体算法包含以下步骤:

(1)将同一像机所拍摄的所有不同位置姿态的标定十字架图像编号,构成单像机标定图像组;

(2)利用 2.3 节中提出的标志点检测方法,得到所有图像中圆形特征点的图像坐标和编码点的编码值;

(3)以标定十字架坐标系为世界坐标系,以 XJTUDP 系统检测得到的编码标志点为控制点,从第一幅图像开始绝对定向。利用控制点的世界坐标,根据图像上识别出的控制点的多少选择使

用直接线性变换或角锥法,计算图像的旋转矩阵 \mathbf{R} ,再计算平移矩阵 \mathbf{T} ;

(4)所有图片定向完毕后,考虑镜头畸变误差,使用 10 参数非线性像机成像模型。以图像定向结果为外参数初始值,根据立体视觉原理求得像机内参数的初始值;

(5)每一图像的内参数初始值由像机厂家提供,所有畸变系数初始值设置为 0,利用光束平差算法对所有图像的内外参数进行整体求解;

(6)对其余像机所拍的标定图像组重复上述标定及定向计算,即可得到全部图像的内、外部参数。最后,将标定得到的图像外参数转换到以像机-1 为基准的坐标系下,完成对大视场多像机测量系统的全局标定。

令 $\mathbf{R}_{i,j}, \mathbf{T}_{i,j}$ 分别为某一标定图像相对于世界坐标系的旋转和平移矩阵,其中 $i=1,2,3,4, j=1,2,\dots,n$ (n 为标定十字架摆放的总姿态数)。要实现多像机测量系统的全局标定。首先,将像机-1 所拍图像的外参数转换到坐标原点;然后,将其余图像的外参数转换到以像机-1 为原点的坐标系下:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_{i,j}' &= \mathbf{R}_{i,j}^{-1} \mathbf{R}_{1,j} \\ \mathbf{T}_{i,j}' &= \mathbf{R}_{i,j}^{-1} (\mathbf{T}_{1,j} - \mathbf{T}_{i,j}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

最后,根据下式计算 4 个像机的外参数:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{R}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{R}_{i,j}' \\ \mathbf{T}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{i,j}' \end{aligned} \right. \quad (8)$$

以像机-1 为坐标系原点,则 $\mathbf{R}_1 = \mathbf{I}, \mathbf{T}_1 = \mathbf{O}$ 。

3 实验及分析

使用 4 台高速像机构成如图 5 所示的四像机视频测量系统,像机-1 和像机-2 交向布设,构成第一组双目系统作为一个三维测量单元,像机-3 和像机-4 构成第二组三维测量单元。

所用像机型号为 Photron Fastcam SA-1,如图 6 所示,该像机在最大分辨率 $1\,024\text{ pixel} \times 1\,024\text{ pixel}$ 时,最大采集速度可达到 $5\,000\text{ frame/s}$,并配有高精密像机同步触发控制器,以保证 4 台像机的同步触发。

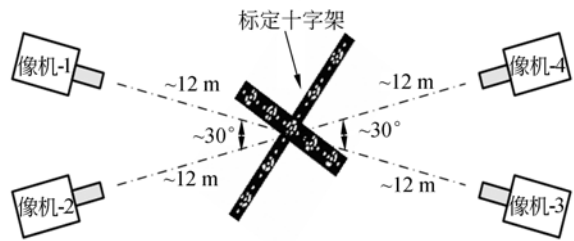


图 5 四像机视频测量系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of four-camera videography



图 6 Photron Fastcam SA-1.1 型高速像机

Fig. 6 Photron Fastcam SA-1.1 camera

3.1 大视场四像机标定实验

将标定十字架置于 4 台像机的公共视场中,采用如前所述的标定流程对 4 台像机进行标定,得到 4 台像机的内参数标定结果见表 1。

表 1 四像机内参数标定结果

Tab. 1 Interior parameters of four cameras

内参数	像机-1	像机-2	像机-3	像机-4
f/pixel	2 646.306	2 627.512	2 671.762	2 659.414
$\Delta x_0/\text{pixel}$	-56.244	-36.723	-53.854	-60.683
$\Delta y_0/\text{pixel}$	-46.280	-27.958	-130.984	-115.465
$A1/\times 10^{-8}$	-2.172	2.717	-1.755	-1.339
$A2/\times 10^{-15}$	6.036	-2.417	-4.335	5.502
$A3/\times 10^{-20}$	-1.377	18.855	8.545	-2.338
$B1/\times 10^{-7}$	5.986	-1.387	-1.647	-2.281
$B2/\times 10^{-6}$	-7.449	-1.134	-3.344	-3.788
$E1/\times 10^{-2}$	-2.293	-2.208	-2.396	-2.357
$E2/\times 10^{-3}$	5.225	6.193	7.291	3.348

以像机-1 作为世界坐标系原点,四像机的全局定向参数即旋转矩阵和平移矩阵的计算结果如下:

像机-1:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{pmatrix}$$

像机-2:

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.890621 & 0.0270267 & -0.453936 \\ -0.0271204 & 0.999611 & 0.00630469 \\ 0.453931 & 0.00669597 & 0.891008 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} -5356.5 \\ 86.4696 \\ -1236.87 \end{pmatrix}$$

像机-3:

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} -0.99893 & -0.0450813 & 0.0103097 \\ -0.0447352 & 0.998497 & 0.0316512 \\ -0.011721 & 0.0311562 & -0.999446 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_3 = \begin{pmatrix} 826.972 \\ 756.991 \\ -22867.5 \end{pmatrix}$$

像机-4:

$$\mathbf{R}_4 = \begin{pmatrix} 0.882854 & 0.0832905 & -0.462189 \\ -0.084964 & 0.996233 & 0.0172361 \\ 0.461885 & 0.0240529 & 0.886606 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_4 = \begin{pmatrix} -5558.91 \\ 157.138 \\ -1284.78 \end{pmatrix}$$

为了评估本文标定方法的精度,根据标定结果中 4 台像机的内、外部参数,将重建出的标定十字架上的标志点的三维坐标投影到 4 个像平面上,计算其重投影误差,用重投影误差来评估算法

的精度。图 7 所示为其中 3 个姿态下标定十字架上标志点在 4 个像机像平面上的重投影误差分布。从分布图上可以看出,重投影误差均小于 0.05 pixel,表明本文标定方法具有较高的精度。

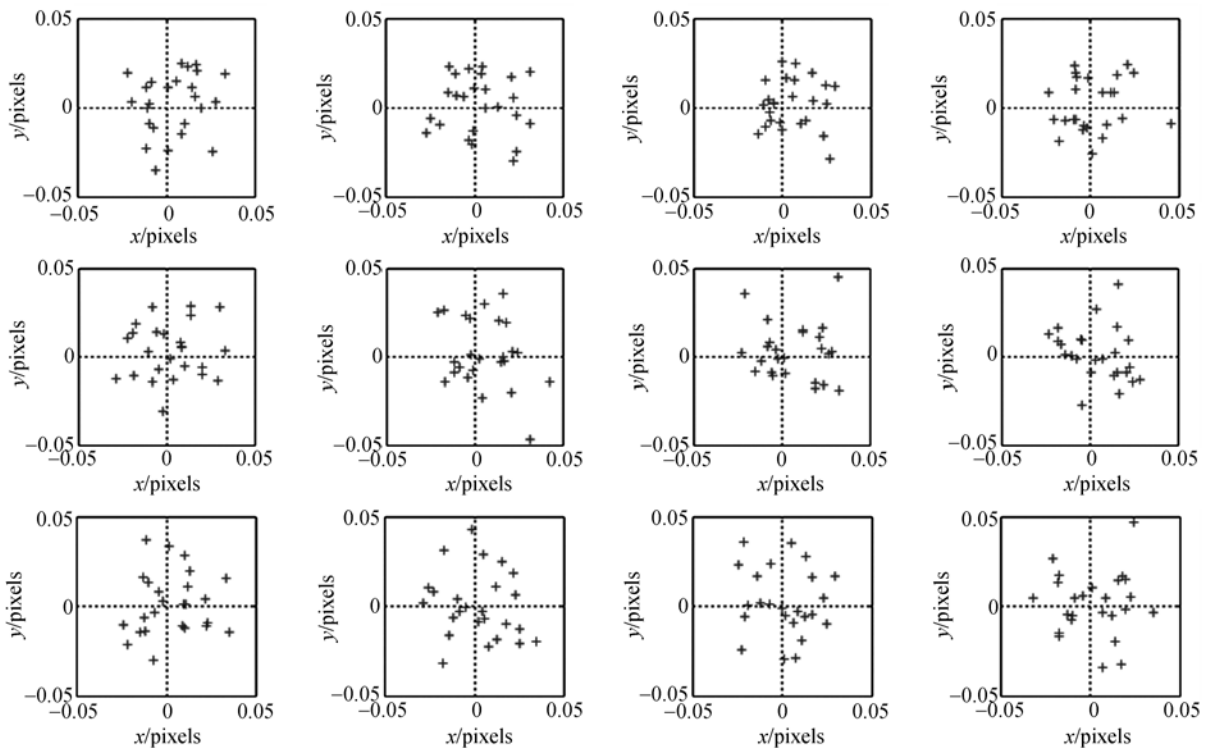


图 7 标定结果在 3 个姿态下的重投影误差分布

Fig. 7 Reprojection error in images of cross target shown at three orientations

3.2 标准尺长度测量实验

参照德国 VDI-2634 part 1 精度测试标准,采用图 8 所示长度为 1 100.057 mm(精度为 0.003 mm)的因瓦合金高精度标尺作为长度基准,使用上述四目视频测量系统对其进行多次不同角度的拍摄并重建出三维长度,并与基准长度作对比来评估该测量系统在三维空间的测量精度。

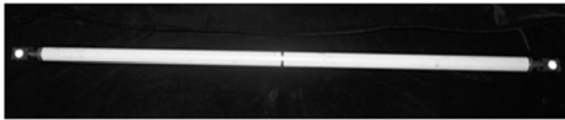


图 8 因瓦合金标准尺

Fig. 8 Invar scale bar used as length standard

手持标尺在测量范围内慢速自由运动,尽量使运动范围充满整个测量空间,标尺运动期间保持标尺端两个标志点大致面向相机方向,以 5 s 的间隔重复拍摄并测量标尺两端点间的长度,再与真实值比较,得到空间长度测量误差,实验结果见表 2。

从表 2 实验结果看,使用本文的标定方法,空间标准尺的长度测量数据不存在粗差。其中最大绝对测量误差为 0.545;测量标准差为 0.235;相对误差为测量标准差(0.235)与测量长度(1 100.057)之比,为 2.14/1 000;由此估计本系

表 2 标准尺长度测量结果

Tab. 2 Results of scale bar length measurement

位置	测量值/mm	误差/mm
1	1 100.336	0.279
2	1 100.366	0.309
3	1 100.315	0.257
4	1 100.337	0.279
5	1 100.424	0.367
6	1 100.445	0.388
7	1 100.603	0.545
8	1 100.405	0.348
9	1 099.944	-0.113
10	1 099.954	-0.102
11	1 099.887	-0.170

标准差: 0.235

统相对测量精度约为 1/4 000。分析影响测量精度的主要因素包括:(1)像机成像质量及分辨率;(2)镜头畸变的影响;(3)被测标尺运动过快使椭圆失真、边缘模糊;(4)多台像机的同步性;(5)标定点定位精度;(6)环境光照均匀性等。因此,随着图像采集部件性能的提高和测量环境的改善,采用本文标定方法能够获取更高的三维测量精度。

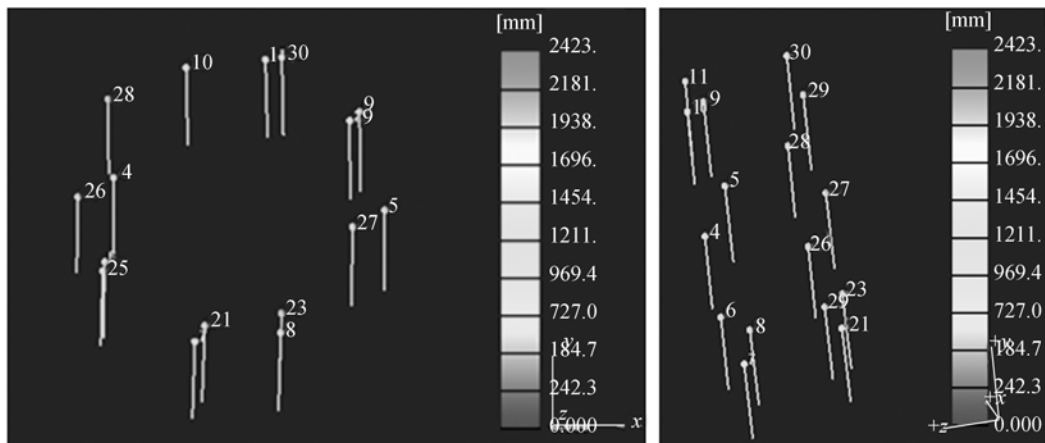
3.3 轮胎落体运动测量实验

为进一步验证本文标定方法的性能,选用汽车内胎模拟落体运动,采用 4 台如图 6 所示的高



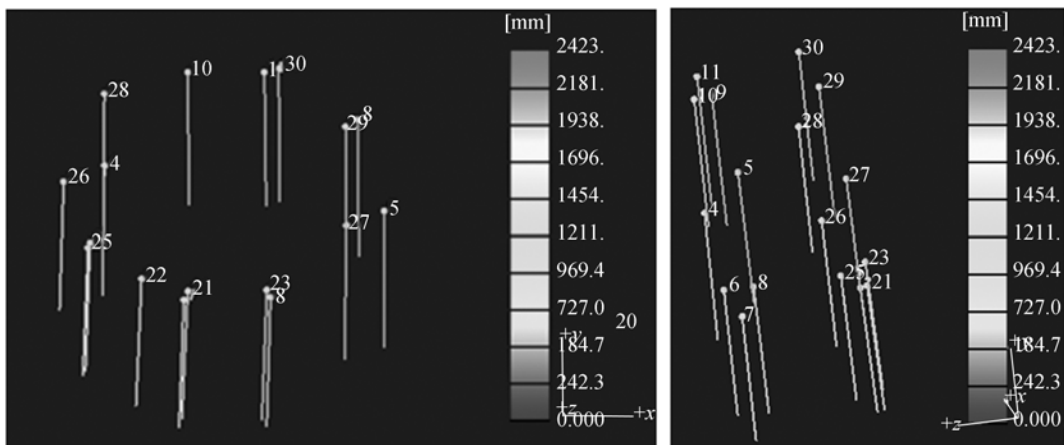
图 9 四台像机捕捉的部分时刻轮胎运动变形图像

Fig. 9 Images acquired by four different cameras in three motion stages and result of feature point recognition



(a)第 50 帧图像

(a) Frame=50



(b)第 100 帧图像

(b) Frame=100

图 10 轮胎表面部分时刻的三维位移场

Fig. 10 Result of 3-D displacement field of feature points on falling tire in different motion stages

速数字摄像机构建图 5 所示的大视场多像机测量系统。对该系统进行标定后,开启 4 台摄像机以 125 frame/s 的帧率连续采集从 3 m 高度自由下落的轮胎两侧的视频图像。4 个像机的测量距离约为 12 m,测量视场约为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。图 9 列出了 4 台像机捕捉到视频图像序列中的第 50 帧和 100 帧。

图 10 显示了汽车内胎两侧面在第 50 帧和 100 帧时的三维标志点及其位移变形场,左边为正视图,右边为侧视图。白点表示标志点,由其引出的射线表示当前状态与初始状态相比标志点的位移大小及方向,显示在 3-D OpenGL 窗口中,通过旋转可从不同角度观察位移信息。由测量结果可知,在任意时刻,汽车内胎两个侧面上的众多标

志点构成了运动中的内胎轮廓,其表面位移场能够直观地反映被测目标整体的运动及形变全貌。

4 结 论

提出并实现了一种基于近景摄影测量技术的大视场多像机全局标定方法。该方法采用自制的双面标定十字架,基于 10 参数非线性像机成像模型,利用光束平差算法实现了大视场多像机全局标定的计算。实验结果表明,本文方法的重投影误差小于 0.05 pixel;利用标定结果测量高精度标尺长度,相对误差小于 $1/4\ 000$,且能直观地测得汽车内胎的近似轮廓和表面位移场;可满足大视场多像机视频测量对标定精度和效率的要求。

另外,试验现场环境(光照、温度、风速、粉尘等)、采集设备性能(成像质量、镜头畸变、多台像机同

步性等)以及可能的人工干预等因素都会影响测量的精度,对此我们将展开进一步的研究。

参考文献:

- [1] BURNER A, LIU T. Videogrammetric model deformation measurement technique[J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(4):745-754.
- [2] CHANG C, JI Y. Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(6):656-664.
- [3] WOODHOUSE N, ROBSON S, EYRE J. Vision metrology and three dimensional visualization in structural testing and monitoring[J]. *The Photogrammetric Record*, 1999, 16(94):625-641.
- [4] LIU T, CATTAFESTA L, RADEZTSKY R, et al.. Photogrammetry applied to wind-tunnel testing [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(6):964-971.
- [5] WALLACE ID, LAWSON NJ, HARVEY AR, et al.. High-speed photogrammetry system for measuring the kinematics of insect wings[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17):4165-4173.
- [6] JIANG R, JAUREGUI D. A novel network control method for photogrammetric bridge measurement[J]. *Experimental Techniques*, 2007, 31(3):48-53.
- [7] 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.
- 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)
- [8] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4):323-344.
- [9] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10):965-980.
- [10] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. 1997 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97)*, Washington, DC, USA: IEEE, 1997:1106-1112.
- [11] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece: IEEE*, 1999:666-673.
- [12] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [13] 陈刚,车仁生,叶东,等. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6):626-631.
- CHEN G, CHE R SH, YE D, et al.. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6):626-631. (in Chinese)
- [14] 孙军华,吴子彦,刘谦哲,等. 大视场双目立体视觉传感器的现场标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):633-640.
- SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, et al.. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):633-640. (in Chinese)
- [15] FAUGERAS O, LUONG Q, MAYBANK S. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]. *European Conference on Computer Vision, Florence, Italy*, 1992:321-334.
- [16] SANSONI G, CAROCCI M, RODELLA R. Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(3):628-636.
- [17] LUHMANN S R T, KYLE S, HARLEY I. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*[M]. London: Whittles Publishing, 2006.
- [18] CANNY J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1986, 8(6):679-714.
- [19] MAI F, HUNG Y S, ZHONG H, et al.. A hierarchical approach for fast and robust ellipse extraction[J]. *Pattern Recogn.*, 2008, 41(8):2512-

2524.

[20] ZHANG D H, LIANG J, GUO C, *et al.*. Exploita-tion of photogrammetry measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(3):037005-1-11.

作者简介:



胡浩(1985—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2007年于华中农业大学获得学士学位,2010年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: huhao136@163.com



郭翔(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,2005年、2008年于西安交通大学获得学士、硕士学位,主要从事逆向工程、三维光学检测等方面的研究。E-mail: Xiang.Guo@stu.xjtu.edu.cn



唐正宗(1982—),男,山东日照人,博士研究生,2005年、2008年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: nevret@gmail.com

导师简介:



梁晋(1968—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn



史宝全(1982—),男,陕西延安人,博士研究生,2005年、2008年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事逆向工程、三维光学检测等方面的研究。E-mail: shbq@stu.xjtu.edu.cn

● 下期预告

脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 合金熔池 流动传热特性分析

吴东江,王占宏,马广义,杨义彬,郭玉泉,郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

为了研究脉冲激光焊接 0.5 mm 厚 Hastelloy 薄板熔池的流动行为及其传热特性,基于流体动力学方程和传热方程建立了三维瞬态模型。应用 Fluent 软件,采用有限容积法(FVM)求解控制方程,用 SIMPLE 算法处理速度与压力的耦合。引入 Pe 来衡量焊接熔池中对流传热与传导传热的相对强弱,以此来分析焊接熔池的传热特性。结果表明:沿焊接方向,随着离熔池中心距离的增加焊接熔池的流动速度先增加后减小;在给定试验条件下,熔池流动速度在离熔池中心为 0.2 mm 左右时出现最大值,且沿焊接方向前方稍大于后方,而后迅速减小为零;焊接熔池中对流的存在使得焊接熔池熔深较小且熔宽较大;最终的焊接形貌由对流传热与传导传热相互作用而成。对焊缝形貌的数值模拟结果与实验结果进行了比较,计算结果与实验结果吻合较好,此模型可为 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接熔池流体流动行为分析提供理论依据。