

DOI: 10.7652/xjtuxb202002021

结构光系统含平面距离约束的平差标定 及加权集成测量模型

何曾范¹, 黄军辉¹, 王昭¹, 方熊琪¹, 邢超¹, 郝俊杰¹, 高建民²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统标定方法严重依赖标定物精度、普通平差标定模型参数求解精度受限等问题,提出了一种含平面距离约束的结构光系统平差标定方法。该标定方法首先将平面标定物中的部分标志点作为控制点,利用控制点间的距离信息构建约束方程,然后将约束方程与平差模型相结合构建含平面距离约束的光束法平差模型,最后通过该模型优化求解系统参数。同时,为获得更高的测量精度,提出了一种加权集成测量模型,该模型根据系统各测量器件平差标定精度的差异,对各器件分配不同权重,构建了系统加权集成测量模型。搭建了系统测量实验平台,对所提标定及测量方法的有效性进行验证,实验结果表明,在 250 mm×200 mm 的标定视场下,所提的含平面距离约束的平差方法相较于传统方法,标定精度提升了 25%,加权集成测量模型的综合测量精度提升了 88%。

关键词: 结构光;光束法平差;约束;加权集成测量

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0166-09

A Calibration Method for Adjustment of Structured Light System with Planar Distance Constraints and a Weighted Integrated Measurement Model for Binoculars

HE Zengfan¹, HUANG Junhui¹, WANG Zhao¹, FANG Xiongqi¹,
XING Chao¹, HAO Junjie¹, GAO Jianmin²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A calibration method for adjustment of structured light system with planar distance constraints is proposed to improve the shortcomings of traditional calibration methods, such as the serious dependence on the accuracy of calibrators and the limited accuracy of solving parameters of ordinary adjustment calibration model. The method firstly takes some marked points in the plane calibrator as control points, and uses the distance information between the control points to construct constraint equations. Then, a beam adjustment model with plane distance constraint is constructed by combining the constraint equations and the adjustment model. Finally, the system parameters are determined by optimization solution of the model. Further, a weighted integrated measurement model is proposed to obtain higher measurement accuracy. The model assigns different weight to each measuring device according to its difference

收稿日期: 2019-06-19。 作者简介: 何曾范(1992—),男,硕士生;黄军辉(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0210501)。

网络出版时间: 2019-10-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191031.0832.002.html>

of calibration accuracy. Finally, a system measurement experiment platform is built to verify the effectiveness of the proposed calibration and measurement methods. Experimental results and a comparison with the traditional method in the 250 mm×200 mm calibration field of view show that the proposed adjustment method with planar distance constraints increases the calibration accuracy by 25% and the comprehensive measurement accuracy of the weighted integrated measurement model by 88%.

Keywords: structured light; beam adjustment; constraint; weighted integrated measurement

结构光系统主要由摄像机和投影仪组成,其系统标定是影响系统测量精度的关键因素之一。

西安交通大学王昭团队,依据射影变换原理建立投影与摄像平面映射关系,对映射误差进行了补偿,并利用光束法平差对系统进行了捆绑优化,降低了标定误差对系统标定精度的影响^[1-3]。华中科技大学李中伟团队,对相机内参及双目间的相对外参分开进行标定^[4-5],并利用相移法将投影仪标定转化为相机标定^[6],此外,在系统参数优化方面,通过增加相机参数约束,建立了受约束的稀疏光束法平差模型,提高了求解稳定性及精度^[7]。河北工业大学张宗华团队,为提高标定精度与灵活性,提出基于相位标靶的相机标定方法,避免了传统方法中的特征提取^[8];在此基础上,提出基于直接相位测量的系统参数标定方法^[9]。

此外,Xu等借助移动机械臂及双频相移算法标定系统参数,在提高标定的自动化水平同时增加了硬件成本^[10];Zhang等利用相移法及交比不变性建立了相机与投影仪成像平面映射关系,避免投影仪标定引入相机标定误差,但是系统标定精度受限于标志物的精度^[11];Francis等通过投影编码图建立了相机和投影仪图像匹配关系,并利用对极几何构建优化目标函数对标定参数进行了优化,但该方法易受到标定参数初值精度的影响^[12];Zhou等分析了单目结构光系统中投影仪主点及焦距参数的误差对测量精度的影响,通过二次标定对参数进行矫正,提高了系统标定精度^[13];Lu等提出了一种基于图案几何约束的标定方法^[14];Fu等研究了一种基于虚拟相机的投影仪标定方法^[15],但由于需要精确调整投影图的位置,造成了标定过程较为烦琐;Yeong等将不同高度的量块组作为参照物实现了系统的标定^[16],然而受参照物限制,应用范围有限;Zhang等利用极平面上入射光线的深度变化在摄像机图像平面上引起像点沿着极线移动的特点,无需标定系统参数,但对于测量环境有噪声干扰的场合该方法将不适用^[17];Chen等借助液晶屏作为标定参照物,降

低了硬件成本,但受屏幕分辨率影响,标定图案的特征提取精度会降低^[18];Li等提出基于最优条纹投影角度的标定方法^[19];Ye等通过控制标志点间距离或角度误差最小来优化系统标定参数,但优化效果易受初值精度影响^[20]。

针对上述方法硬件成本高、严重依赖标定物精度和求解精度不足等问题,提出一种含平面距离约束的系统参数标定方法。该方法借助一块平面标定物,并选取平面标定物中的部分标志点作为控制点,利用控制点间的几何信息构建距离误差方程,并与平差模型相结合为观测值的误差修正提供基准,以提高系统标定精度。同时,根据各测量器件标定精度的差异构建加权集成测量模型,提高了测量精度。

1 含距离约束的标定模型构建与求解

光束法平差属于一种非线性优化算法,可在优化求解过程中修正平差模型中的部分参数,从而获得精度较高的修正参数。传统的平差模型由于欠缺约束条件,容易陷入局部极值,造成优化结果不稳定。常用的几何约束包含共线、共面、交比和距离等形式,其中距离约束具有模型简单、易于构建的优点,因此选用距离约束来构建附加约束方程。

1.1 距离约束模型

对于标定视场上任意两点 (X_1, Y_1, Z_1) 和 (X_2, Y_2, Z_2) 的条件方程式可表达为

$$F_{12} = L_{12}^2 = F'_{12} + \Delta F = [(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2] + \Delta F = F'_{12} - 2(X_1 - X_2)(\Delta X_1 - \Delta X_2) - 2(Y_1 - Y_2)(\Delta Y_1 - \Delta Y_2) - 2(Z_1 - Z_2)(\Delta Z_1 - \Delta Z_2) \quad (1)$$

式中: F_{12} 为距离真值; F'_{12} 为计算值; ΔF 为计算误差。距离约束矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} X_1 - X_2 \\ Y_1 - Y_2 \\ Z_1 - Z_2 \\ -(X_1 - X_2) \\ -(Y_1 - Y_2) \\ -(Z_1 - Z_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Z_2 \end{bmatrix} = \frac{F'_{12} - L_{12}^2}{2} \quad (2)$$

式(2)即为距离约束条件方程,其实质为在控制点空间坐标修正过程中,控制点间的距离要严格满足该约束方程。

1.2 距离约束形式

由于三维距离约束在投影仪平差模型的构建上,仍然严重依赖相机进行转换,其转换精度并不理想,而二维平面的距离约束可以直接通过标定板上的标志点来提供,无需外加装置,因此易于实现。平面距离约束控制点位置如图1所示。

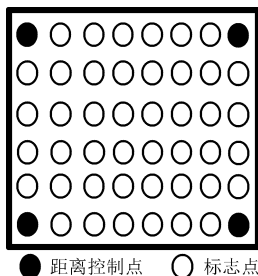


图1 平面距离约束控制点位置

对于一块点阵标定板,选用4个边缘标志点作为距离约束的控制点,通过高精度影像测量仪来获得控制点间精确的圆心距,将该圆心距视为真值来构建距离约束。标志点的相机图像坐标可以直接由相机拍摄并通过圆心提取获得,而对应的投影仪图像坐标则可以借助相机和射影变换的方法获得,并可通过多项式拟合来补偿映射误差,因此该方法可以获得较为准确的投影仪像点坐标,相比三维空间距离约束具有更高的参数求解精度。

综上所述,从参数求解精度、实现难易程度和硬件成本等角度考虑,选用二维平面距离来构建距离约束方程,且由于选用标志点作为距离控制点,而标志点的空间坐标为平差模型中观测量,因此同样将控制点间的距离作为观测量来构建约束方程。

1.3 含距离约束平差模型的标定流程

构建含距离约束的光束法平差标定模型,其标定流程如图2所示。

根据求解流程,将平差模型中的线性参数、主点、镜头畸变参数、标志点的物空间坐标和对应的图像坐标均视为观测量。同时,为了控制不同参数的修正程度,以及减弱参数间的耦合效应,对不同的观测量赋予了不同的权重。其中,权重赋值的总体原则为:参数初值精度越高,需要修正的程度越小,赋大权重避免过度修正,反之赋小权重即可。将各参数及控制点的距离均视为观测量后,系统参数求解

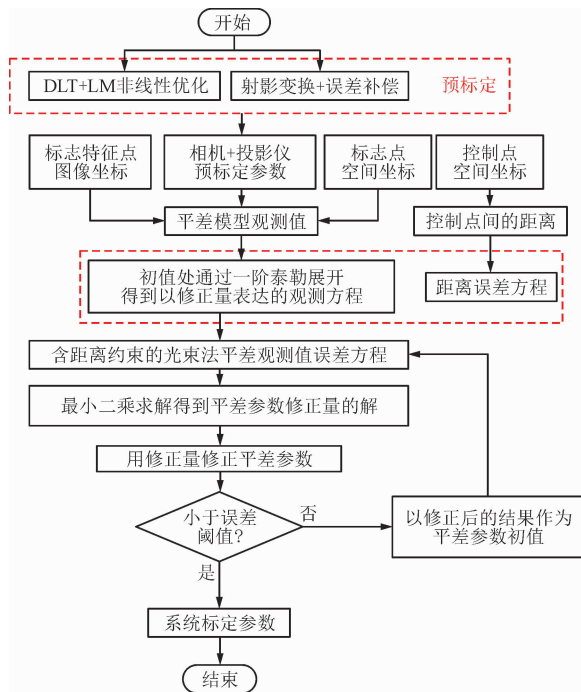


图2 含距离约束的平差标定参数求解流程图

的综合误差方程为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_p &= \mathbf{A}t + \mathbf{D}k + \mathbf{B}x - \mathbf{L} \\ \mathbf{V}_t &= t \\ \mathbf{V}_k &= k \\ \mathbf{V}_x &= x \\ \mathbf{V}_l &= \mathbf{H}x - \mathbf{L}_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{p}$ 为像点坐标; $\mathbf{V}_p$ 为像点误差; $\mathbf{V}_t$ 为线性参数误差; $\mathbf{V}_k$ 为主点及畸变参数误差; $\mathbf{V}_x$ 为标志点空间坐标误差; $\mathbf{V}_l$ 为控制点距离误差; $\mathbf{A}$ 为线性变换参数泰勒级数展开一次项; t 为对应的线性变换参数改正量; $\mathbf{D}$ 为主点及镜头畸变参数泰勒级数展开一次项矩阵; $\mathbf{k}$ 为畸变参数改正量矩阵; $\mathbf{B}$ 为物空间坐标的泰勒展开一次项矩阵; $\mathbf{x}$ 为物空间坐标改正量; $\mathbf{L}$ 为实际像点坐标与每次迭代计算近似值间的偏差; $\mathbf{H}$ 为控制点间距离线性展开项; $\mathbf{L}_l$ 为距离计算偏差。

综合误差方程的矩阵表达为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_p \\ \mathbf{V}_t \\ \mathbf{V}_k \\ \mathbf{V}_x \\ \mathbf{V}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{D} & \mathbf{B} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ k \\ x \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)对应的法方程为

$$\begin{bmatrix} A^T & E & 0 & 0 & 0 \\ D^T & 0 & E & 0 & H^T \\ B^T & 0 & 0 & E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_p \\ W_t \\ W_k \\ W_x \\ W_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & D & B \\ E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & E \\ 0 & H & E \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} t \\ k \\ x \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^T & E & 0 & 0 & 0 \\ D^T & 0 & E & 0 & H^T \\ B^T & 0 & 0 & E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_p \\ W_t \\ W_k \\ W_x \\ W_l \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L_l \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中: W_p 为像点权重矩阵; W_t 为线性参数权重矩阵; W_k 为畸变参数权重矩阵; W_x 为物空间坐标权重矩阵; W_l 为平面距离对应的权重矩阵。

式(5)展开后,可得

$$\begin{bmatrix} A^T W_p A + W_t & A^T W_p D & A^T W_p B \\ D^T W_p A & D^T W_p D + W_k + H W_l H & D^T W_p B + H^T \\ B^T W_p A & B^T W_p D & B^T W_p B + W_x \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} t \\ k \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T W_p L \\ D^T W_p L + H^T W_l L_l \\ B^T W_p L \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)通过逐点法化消元即可求得各观测值的修正量。

2 双目结构光系统测量模型改进

根据上述提出的平差模型,相应地改进了双目结构光系统测量模型,以提高系统的测量精度。

2.1 集成测量模型

如图 3 所示,结构光系统中每个元件(相机、投影仪)都可看作一个独立的测量单元,在测量视场中,被测物体上任意一点会同时在每个元件的像面成像,根据光路可逆原理,即光线从元件像面上的像点出发,透过镜头中心而汇聚于被测物点。根据成像原理,对于同一物点,每个元件可以构建两个独立的约束方程。左图单目结构光系统,被测点为两条光束的交点,对应于成像模型中可构建 4 个方程来求解被测点的空间坐标;右图双目结构光系统,由两台左右对称的相机和一台投影仪组成,被测点在 3 条光束相交的位置,因此相较单目系统多了一条成

像光线约束,从而可以更准确地定位被测点的位置,获得更精确的被测点空间坐标。

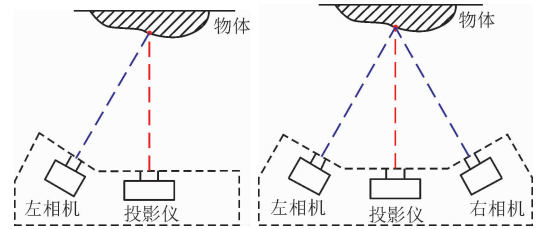


图 3 系统测量示意图

基于单目结构光的测量原理,推广到双目结构光系统,可以构建融合 3 个元件成像约束的集成测量模型,以求解被测物空间坐标,3 个模型如下

$$\lambda_{c1} \begin{bmatrix} u_{c1} \\ v_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}; \lambda_p \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = M_p \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{c2} \begin{bmatrix} u_{c2} \\ v_{c2} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c2} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: λ_{c1} 、 λ_{c2} 、 λ_p 为非零的比例因子; (u_{c1}, v_{c1}) 、 (u_p, v_p) 、 (u_{c2}, v_{c2}) 为像点坐标; $M = [M_{c1}, M_p, M_{c2}]$ 为投影矩阵; (X_w, Y_w, Z_w) 为空间点三维坐标;下标 c1、c2 和 p 分别代表左相机、右相机和投影仪。式(7)消去比例因子得

$$\begin{bmatrix} u_{c1} \\ v_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = M'_{c1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = M'_p \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} u_{c2} \\ v_{c2} \\ 1 \end{bmatrix} = M'_{c2} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于空间点坐标相同,式(8)可整合为

$$[\lambda_{c1} u_{c1} \quad \lambda_{c1} v_{c1} \quad \lambda_p u_p \quad \lambda_p v_p \quad \lambda_{c2} u_{c2} \quad \lambda_{c2} v_{c2}]^T =$$

$$\begin{bmatrix} M'_{c1} \\ M'_p \\ M'_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)即为集成测量模型,可用符号简记为

$$P = MX \quad (10)$$

式中: P 代表图像坐标; M 为综合投影矩阵; X 为空

间坐标。该集成测量模型融合了系统中3个元件对同一物点的成像约束,可通过最小二乘法对空间坐标进行求解

$$\mathbf{X} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{P} \quad (11)$$

集成测量模型将3个独立测量元件捆绑为一个整体来共同确定被测物空间坐标。然而,实际构建的测量系统并不能完全保证成像光线汇聚于一点,故其实际物理含义为使得被测点到3条光束的距离最短,利用该约束来计算空间坐标。

2.2 加权集成测量模型

集成测量模型通过最小二乘法求解,所得的空间点坐标同时近似满足3个元件的成像约束。标定过程中,受成像质量、特征提取精度等因素影响,每个器件的标定精度并不一致,造成其测量精度也不相同,因此为了获得更高的测量精度,考虑采用权重分配策略,根据标定精度对不同器件分配不同的权重系数,然后利用最小二乘求解空间坐标

$$\begin{bmatrix} \lambda_{c1} u_{c1} \\ \lambda_{c1} v_{c1} \\ \lambda_p u_p \\ \lambda_p v_p \\ \lambda_{c2} u_{c2} \\ \lambda_{c2} v_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'_{c1} \\ M'_p \\ M'_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过给3个元件加权来设置物点空间坐标求解的偏向性,即求解过程中,物点应偏向于权重大的成像约束,由于标定是测量的逆过程,故标定精度高的赋大权重,权重系数可由各自标定误差的均方差并进行归一化等方法求解获得。各测量器件加权后,物空间坐标的求解方程为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{M}^T \mathbf{W} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{W} \mathbf{P} \quad (13)$$

式中

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 & & & \\ & \mathbf{W}_1 & & \\ & & \mathbf{W}_p & \\ & & & \mathbf{W}_p \\ & & & & \mathbf{W}_r \\ & & & & & \mathbf{W}_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{W}$ 为权重矩阵, $\mathbf{W}_1$ 为左相机权重, $\mathbf{W}_p$ 为投影仪权重, $\mathbf{W}_r$ 为右相机权重。

3 实验及结果

为验证所提方法的有效性,进行了实验验证。搭建的双目结构光测量系统平台如图4所示。

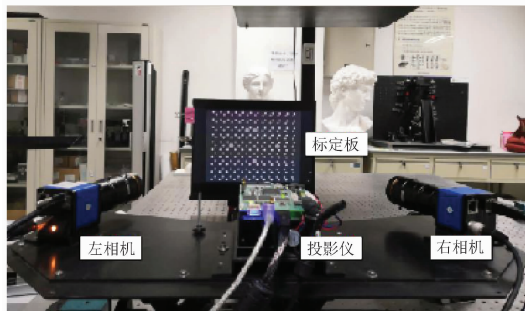


图4 实验平台

3.1 系统标定实验

首先对双目结构光系统进行预标定,以预标定的参数作为初值,对模型中的观测值赋予不同的权重,其中像点权重为1.00,线性参数权重为0.01,主点及镜头畸变参数权重为0.01,标志点物空间坐标系数为1000(未归一化),距离约束系数为1000(未归一化)。利用距离平差模型对系统参数迭代修正,获得的标定参数如下。

(1)左相机主点: $u_0 = 2\,372.6$, $v_0 = 1\,291.4$; 左相机畸变: $k_1 = 5.296 \times 10^{-9}$, $k_2 = -3.807 \times 10^{-17}$, $p_1 = 7.675 \times 10^{-6}$, $p_2 = 1.184 \times 10^{-6}$; 线性参数

$$\mathbf{A}_1 =$$

$$\begin{bmatrix} 6.930 & 0.477 & 4.336 \times 10^{-4} & -0.020 \\ -6.609 & 2.858 \times 10^{-5} & -0.201 & -1.803 \\ -0.001 & 815.663 & 1.920 \times 10^3 & 1.000 \end{bmatrix}$$

(2)投影仪主点: $u_0 = 787.139$, $v_0 = 1\,489.5$; 投影仪畸变: $k_1 = -4.965 \times 10^{-9}$, $k_2 = -5.577 \times 10^{-18}$, $p_1 = -8.669 \times 10^{-6}$, $p_2 = -7.784 \times 10^{-6}$; 线性参数

$$\mathbf{A}_p =$$

$$\begin{bmatrix} 3.476 & 0.106 & 7.392 \times 10^{-4} & -0.010 \\ -3.481 & -2.409 \times 10^{-5} & -0.803 & -0.528 \\ -0.001 & 207.374 & 712.210 & 1.000 \end{bmatrix}$$

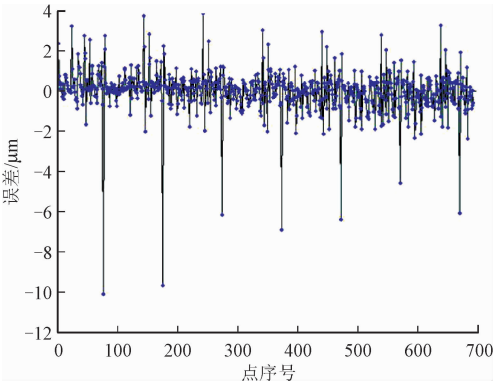
(3)右相机主点: $u_0 = 1\,567.0$, $v_0 = 1\,053.3$; 右相机畸变: $k_1 = 5.255 \times 10^{-9}$, $k_2 = -8.046 \times 10^{-17}$, $p_1 = 4.729 \times 10^{-6}$, $p_2 = -2.049 \times 10^{-7}$; 线性参数

$$\mathbf{A}_r =$$

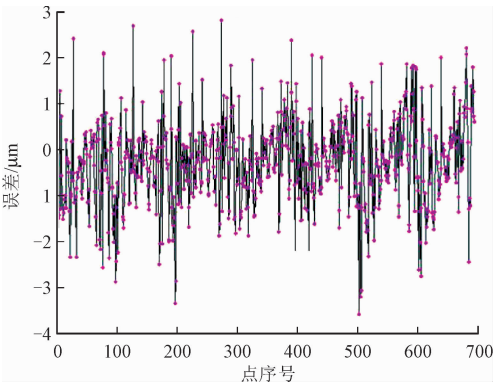
$$\begin{bmatrix} 5.112 & -0.551 & -4.170 \times 10^{-4} & -0.008 \\ -6.020 & 1.474 \times 10^{-5} & -3.684 & -1.559 \\ -0.001 & 989.238 & 1.842 \times 10^3 & 1.000 \end{bmatrix}$$

标定结束后利用系统标定参数和标志点的像点坐标,通过成像模型计算标志点的空间坐标,其计算值与理论值之间的差值即为标定误差。对比了普通平差与含距离约束平差模型的系统标定精度,结果

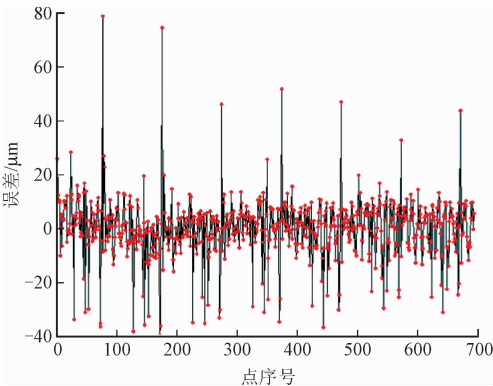
如图 5、图 6 所示。从图中可见,Y 方向标定残差标



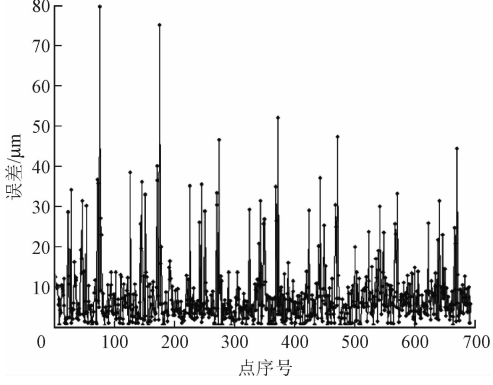
(a) X 方向



(b) Y 方向

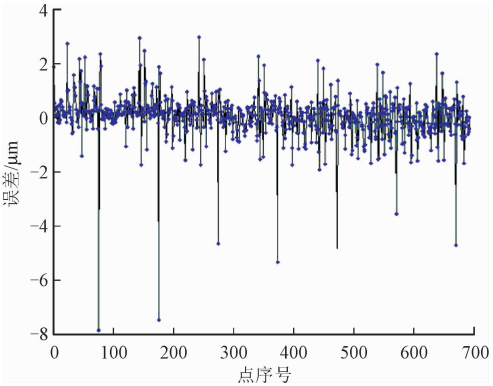


(c) Z 方向

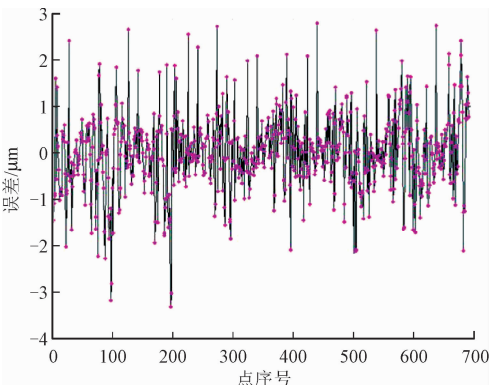


(d) 标定点综合位置

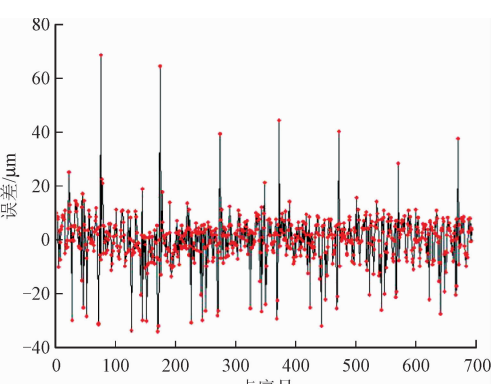
图 5 采用普通光束法平差标定方法的误差



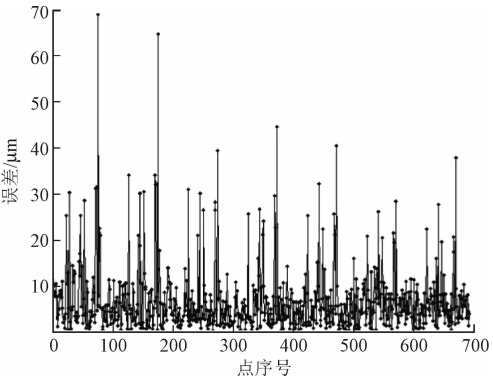
(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向



(d) 标定点综合位置

图 6 采用含距离约束平差标定方法的误差

准差最小,因为系统在标定过程中处于标定空间 Y 方向的中心,图像透视投影失真较小,信噪比更高。 Z 方向标定残差较大主要由于标定板自身的平面度误差较 X - Y 方向上的标志点位置误差大。

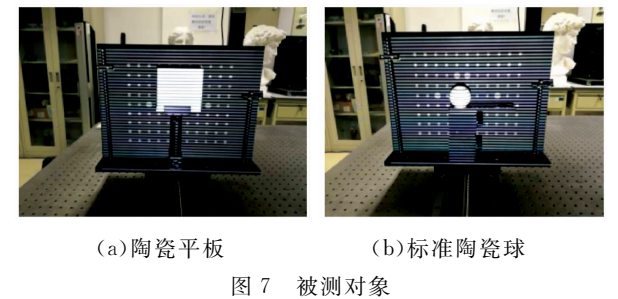
对图 5、图 6 中系统标定残差进行统计,结果如表 1 所示,光束法平差所得的系统标定残差标准差在 X 、 Y 、 Z 方向上分别为 1.10、0.97 和 11.40 μm ,将各方向标定残差引起的标定点位置误差作为综合误差,其综合误差的标准差为 8.60 μm ;引入距离约束后,标定残差降低为 0.89、0.86 和 9.90 μm ,综合误差的标准差为 6.90 μm ,标定残差降低了 25%。由此可得,引入平面距离约束后可降低系统标定残差,提高系统标定精度。

表 1 标定残差对比

标定方法	坐 标	残差/ μm		
		平均误差	标准差	最大误差
普通平差	X	1.10	5.94×10^{-3}	3.80
	Y	0.97	-0.29	2.80
	Z	11.40	-7.82×10^{-3}	7.91
距离平差	X	1.22×10^{-3}	0.89	2.90
	Y	-5.56×10^{-3}	0.86	2.80
	Z	-7.13×10^{-4}	9.90	68.70

3.2 系统测量实验

基于含平面距离约束平差标定所得的系统参数,分别利用集成测量模型和加权集成测量模型对如图 7 所示的陶瓷平板及陶瓷球进行测量。



3.2.1 集成测量 利用平板和标准球的测量点云分别拟合平面和球体,平板的拟合残差位于-40.0~40.0 μm 之间,球体拟合残差位于-100.0~100.0 μm 之间。

对拟合残差进行误差分析,结果如表 2、表 3 所示。陶瓷平板的平面拟合残差标准差为 17.0 μm 。对于标准半径 2.540×10^4 μm 的哑光陶瓷球,利用集成测量模型的实测半径为 2.546×10^4 μm ,与真实值的偏差为 60.0 μm ,球体拟合残差标准差为

52.0 μm 。

表 2 平板集成测量结果

残差最大值/ μm	标准差/ μm
40.0	17.0

表 3 标准球集成测量结果

真值/ μm	拟合半径/ μm	拟合误差/ μm	标准差/ μm
2.540×10^4	2.546×10^4	60.0	52.0

3.2.2 加权集成测量 在相同的测量平台上,利用加权集成测量模型测量上述被测物体,以对比两种模型的测量精度。

利用含距离约束的光束法平差标定结果作为系统标定参数,各个测量元件的重投影误差如表 4 所示。其中右相机的重投影误差最大,赋最小的权重系数,左相机与投影仪的重投影误差无法直接比较,故将 u 、 v 两个方向重投影误差引起的像点位置误差作为综合重投影误差,其中左相机的综合重投影误差为 20.0 μm ,投影仪的综合重投影误差为 17.0 μm ,故投影仪的标定精度高于左相机的标定精度,从而对投影仪赋最大的权重,根据权重赋值对各测量元件赋值后最终的平板及标准球测量结果如表 5、表 6 所示。

表 4 各元件标定重投影误差的标准差

元件	标准差/ μm		
	u 方向	v 方向	综合
左相机	15.0	25.0	20.0
投影仪	19.0	16.0	17.0
右相机	22.0	28.0	25.0

表 5 加权集成测量平面拟合残差

权重值			残差/ μm	
左相机	投影仪	右相机	最大值	标准差
0.2	0.7	0.1	38.0	15.0

表 6 加权集成测量球体拟合残差

权重值			拟合半径/ μm	拟合误差/ μm
左相机	投影仪	右相机	μm	μm
0.2	0.7	0.1	2.543×10^4	32.0

对利用加权集成测量模型所得的平板和陶瓷球点云进行拟合。对比两种测量模型的测量残差,结果如表 7、表 8 所示,对于平板的测量,加权集成测

量的残差最大值降低了 $2.0\ \mu\text{m}$,标准差也降低了 $2.0\ \mu\text{m}$;而对于标准球的测量,加权集成测量的半径测量误差减小到 $32.0\ \mu\text{m}$,故曲面测量误差综合测量精度提升了 88% (改进后球体(曲面)测量精度(标准差)提升了 $28/60=47\%$,提升量占加权集成测量精度的 $28/32=88\%$),从而验证了加权集成测量模型对于测量精度提升的有效性。

表 7 平面拟合残差对比

测量方式	残差最大值/ μm	标准差/ μm
集成测量	40.0	17.0
加权集成	38.0	15.0

表 8 球体拟合残差对比

测量方式	理论半径/ μm	拟合半径/ μm	误差/ μm
集成测量	2.54×10^4	2.546×10^4	60.0
加权集成	2.54×10^4	2.543×10^4	32.0

4 结 论

在普通平差模型的基础上,引入平面距离约束,并对约束的具体形式进行了分析,提出了一种含平面距离约束的光束法平差系统参数标定方法;同时,根据各测量器件标定精度的差异,提出了一种加权集成测量模型;通过搭建双目结构光系统实验平台对标定及测量精度进行了验证。实验表明,利用改进的平差模型,在 $250\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ 视场下,系统标定精度可达到 $6.9\ \mu\text{m}$,与普通平差相比,标定精度提升了 25% ;标准球及平板测量结果相比集成测量模型,综合测量精度可提升 88% ,验证了所提系统标定及测量方法的有效性。

参考文献:

[1] HUANG Junhui, WANG Zhao, XUE Qi. Projector calibration with error surface compensation method in the structured light 3D measurement system [J]. Optical Engineering, 2013, 52(4): 1-10.

[2] 王昭,黄军辉,高建民,等. 基于光束法平差的结构光测量系统标定方法 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 32-40.

WANG Zhao, HUANG Junhui, GAO Jianmin, et al. Calibration of the structured light measurement system with bundle adjustment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 32-40.

[3] 高志华,王昭,黄军辉,等. 基于射影变换的结构光测量系统中投影仪标定方法 [J]. 中国激光, 2012, 39

(10): 1008004.

GAO Zhihua, WANG Zhao, HUANG Junhui, et al. Projector calibration method based on projective transformation for structured light measurement system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1008004.

[4] 李中伟,王从军,史玉升. 3D 测量系统中的高精度摄像机标定算法 [J]. 光电工程, 2008, 35(4): 58-63.

LI Zhongwei, WANG Congjun, SHI Yusheng. High precision camera calibration algorithms in 3D measurement system [J]. Optoelectronic Engineering, 2008, 35(4): 58-63.

[5] 李中伟,史玉升,钟凯,等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3061-3065.

LI Zhongwei, SHI Yusheng, ZHONG Kai, et al. Calibration algorithm of projector in structured light measurement technology [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3061-3065.

[6] 倪章松,顾艺,柳庆林,等. 大视场双目立体视觉柔性标定 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1882-1889.

NI Zhangsun, GU Yi, LIU Qinlin, et al. Flexible calibration of large field binocular stereo vision [J]. Optical Precision Engineering, 2017, 25(7): 1882-1889.

[7] 夏泽民,李中伟,钟凯. 受约束的稀疏光束法平差在相机标定中的应用 [J]. 光电工程, 2015, 42(5): 13-19.

XIA Zeming, LI Zhongwei, ZHONG Kai. Application of constrained sparse beam adjustment in camera calibration [J]. Optoelectronic Engineering, 2015, 42(5): 13-19.

[8] 于瑾,陈超,高楠,等. 基于相位标靶的相机标定 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 270-276.

YU Jin, CHEN Chao, GAO Nan, et al. Camera calibration based on phase target [J]. Advances in Laser and Photoelectronics, 2018, 55(11): 270-276.

[9] 邓小婷,高楠,张宗华. 基于直接相位测量术的系统参数标定方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061204.

DENG Xiaoting, GAO Nan, ZHANG Zhonghua. Calibration method of system parameters based on direct phase measurement [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061204.

[10] XU Jing, CHEN Rui. Self-recalibration of a robot-assisted structured-light-based measurement system [J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 8857-8865.

[11] ZHANG Wei, LI Weishi. Sub-pixel projector calibration method for fringe projection profilometry [J].

- Optics Express, 2017, 25(16): 19158-19169.
- [12] LI F, SEKKATI H, DEGLINT J, et al. Simultaneous projector-camera self-calibration for three-dimensional reconstruction and projection mapping [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2017, 3(1): 74-83.
- [13] ZHOU Ping, YU Yunlei, CAI Guochao, et al. Projector recalibration of three-dimensional profilometry system [J]. Applied Optics, 2016, 55(9): 2294-2300.
- [14] LU Peng, SUN Changku, LIU Bin. Accurate and robust calibration method based on pattern geometric constraints for fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 784-794.
- [15] FU Mingliang, LENG Yuquan, ZHANG Huien. A calibration method for structured light systems based on a virtual camera [C]// 8th International Congress on Image and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 57-63.
- [16] LEE Y B, KIM M H. Integrated calibration of multi-view phase-measuring profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 118-122.
- [17] ZHANG Ruihua, GUO Hongwei. Depth recovering method immune to projector errors in fringe projection profilometry by use of cross-ratio invariance [J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29272-29286.
- [18] CHEN Rui, XU Jing, YE Zhiling, et al. Easy-to-operate calibration method for structured light systems [J]. Applied Optics, 2016, 55(30): 8478-8485.
- [19] LI Beiwen, ZHANG Song. Structured light system calibration method with optical fringe angle [J]. The Optical Society, 2014, 53(33): 7942-7950.
- [20] YE Yuping, SONG Zhang. A practical means for the optimization of structured light system calibration parameters [C]// 23rd IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 1190-1194.

(编辑 刘杨)

(上接第 143 页)

- [11] KADDOUM G, RICHARDSON F, GAGNON F. Design and analysis of a multi-carrier differential chaos shift keying communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3281-3291.
- [12] KADDOUM G, SOUJERI E. NR-DCSK: a noise reduction differential chaos shift keying system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II Express Briefs, 2016, 63(7): 648-652.
- [13] KADDOUM G, SOUJERI E, NIJSURE Y. Design of a short reference non-coherent chaos-based communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2): 680-689.
- [14] XU W K, WANG L, CHEN G R. Performance analysis of the CS-DCSK/BPSK communication system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers, 2014, 61(9): 2624-2633.
- [15] YANG H, JIANG G P. High-efficiency differential-chaos-shift-keying scheme for chaos-based noncoherent communication [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II Express Briefs, 2012, 59(5): 312-316.
- [16] 张刚, 陈和祥, 张天骐. 多用户降噪差分混沌键控通信方案 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 362-368.
- [17] ZHANG Gang, CHEN Hexiang, ZHANG Tianqi. A multiuser noise reduction differential chaos shift keying system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(2): 362-368.
- [18] ABEL A, GOTZ M, SCHWARZ W. Statistical analysis of chaotic communication schemes [C]// Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1998: 465-468.
- [19] KADDOUM G, CHARGE P, ROVIRAS D, et al. A methodology for bit error rate prediction in chaos-based communication systems [J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2009, 28(6): 925-944.
- [20] MANDAL S, BANERJEE S. Analysis and CMOS implementation of a chaos-based communication system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers, 2004, 51(9): 1708-1722.
- [21] PROAKIS J G. Digital communications [M]. New York, NY, USA; McGraw-Hill, 2001: 825-830.

(编辑 刘杨)