

基于畸变偏移矢量的结构光区域标定

芦颖*, 王泽民**, 杨博瑞

西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 712021

摘要 针对结构光测量系统直接标定法存在的物像映射模型全局适用性差问题,提出了一种基于畸变模型的分区域标定方法。首先,用张正友平面标定法则估计相机的线性成像投影矩阵。然后,将该矩阵作为初值,通过最小二乘法求解相机的畸变参数。最后,根据畸变偏移矢量分布规律划分出图像子区间并进行标定。在相同场景中的实验结果表明,相比全局直接标定方法,本方法在 X 方向和 Y 方向的标定精度分别提升了 37.40% 和 56.20%,在结构光测量领域具有广泛的适用性。

关键词 激光光学; 激光阵列; 结构光测量; 畸变偏移矢量; 分区域标定; 有限元

中图分类号 TP391.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0214002

Calibration of Structured Light Area Based on Distortion Shift Vector

Lu Ying*, Wang Zemin**, Yang Borui

College of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 712021, China

Abstract Aiming at the problem of poor global applicability of the object image mapping model in the direct calibration method of structured light measurement system, this paper proposes a subarea calibration method based on the distortion model. First, the projection matrix of camera linear imaging is estimated by using Zhang Zhengyou's plane calibration rule. Then, the matrix as the initial value is taken to solve the camera distortion parameters by ordinary least square. Finally, the image subarea is divided according to the distribution law of distortion shift vector for calibration. The experimental results in the same scene show that compared with the global direct calibration method, the calibration accuracies of the method in X direction and Y direction are increased by 37.40% and 56.20%, respectively, and it has wide applicability in the field of structural light measurement.

Key words laser optics; laser array; structural light measurement; distortion shift vector; subarea calibration; finite element

1 引言

随着工业的迅速发展和测量需求的不断变化,结构光测量技术作为一种三维立体视觉测量方法^[1-2],具有非接触、测量速度快、效率高、硬件配置要求低等优点,在工业检测、逆向工程、快速原型设计等领域具有广泛的研究和应用前景^[3-4]。系统标定是结构光测量中的关键部分^[4-5],很大程度上会影

响系统测得物体表面特征点的空间坐标精度。目前,结构光测量系统的主要标定方式有传统标定法和直接标定法^[6]。其中,传统标定方法将待求参数分为两部分,先基于针孔成像原理建立数学几何模型,再结合光平面与相机位置关系求解结构参数,完成系统标定;直接标定法则根据三维坐标与图像坐标间的对应关系直接构建函数映射模型^[7]。

传统标定方法中光平面^[8]和逆向相机标定^[9]过

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-02-26; 录用日期: 2021-03-09

通信作者: *lyokla@foxmail.com; **zeminwang@163.com

程均直接依赖于相机自身的参数,其中,光平面方程通常利用交比不变原理计算,需将平面标靶上的特征点亚像素坐标代入相机标定的单应性矩阵中,获得最终的系统标定结果;逆向相机标定则将光源视为逆向相机,利用相机标定参数转换坐标系,标定光源的内外参数,完成结构光的系统标定。这种涉及相机自身参数的矩阵计算,扩散误差易导致系统整体的标定精度较低。近年来,人们研究了结构光测量系统的直接标定法,避免了对中间参数的求取。张广军等^[10]利用标定样本库建立了径向基函数(RBF)神经网络模型,针对密集点云实现了结构光测量系统的标定一体化。熊会元等^[11]使用精加工的锯齿形状标定块,利用多项式拟合建立结构光系统标定模型。但现有的直接标定法是针对像平面全局的物像映射模型进行求解,存在视野中心标定精度高、边缘标定精度低的问题。

本文在结构光测量系统直接标定法的基础上,提出了一种基于畸变模型的分区标定法。首先,利用棋盘格二维标定板确定相机的畸变参数并进行可视化分析,确保相机自身各项参数不直接参与系统标定关系式的计算。然后,借助等高线将畸变偏移矢量划分为特定的图像子区间分别进行多项式拟合,求取模型参数。最后,得到图像像素坐标与三个方向世界坐标精确的物像映射关系。

2 结构光测量原理

为了进行更高分辨率、更高精度的非接触式测量,采用斜射式三角测量法,投射源投射的组阵点阵结构光在被测物表面上形成一些规则排布的点。对于世界坐标系中物体表面的任意一物点 P ,其三维坐标为 (X, Y, Z) 。基于点结构光的三角法测量原理如图 1 所示,其中,点结构光投射器的成像中心为 O ,相机的镜头中心为 Q , B 为二者之间的距离。直线 OP 与平面 XOZ 的夹角为 ϕ ;直线 OP 与 x 轴

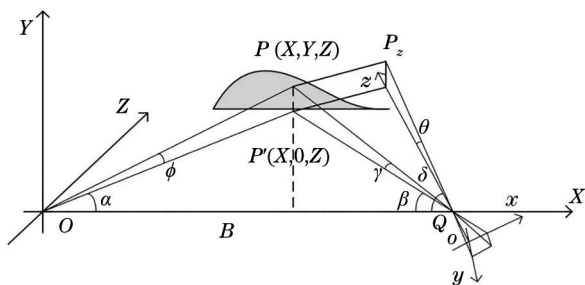


图 1 点结构光的三角测量原理

Fig. 1 Triangulation principle of the point structured light

夹角为 α ,也被称为投射角;镜头光轴 oz 与 OQ 之间的夹角为 δ ; oQ 为相机镜头的焦距 f ;直线 QP 与平面 XOZ 之间的夹角为 γ , γ 在 yoZ 上的投射角为 θ ;直线 QP 在平面 XOZ 上的投影与 x 轴的夹角为 β ,物点 P 在 XOZ 面上的投影为 P' 。

将相机像面水平方向上的像素序号记为 n ,总像素数为 $(2N + 1)$;相机像素在垂直方向上的像素序号记作 m ,总像素数为 $(2M + 1)$ 。在光路系统中,入射光线与被测表面法线成小于 90° 的固定入射角投影到待测表面上,激光光点在光电探测器成清晰的像点后,再根据沙姆定律(Scheimpflug principle)和相似三角形比例关系进行计算,得到待测物被投影面上所有激光点的三维坐标,可表示为

$$X = Z \cdot \cot \alpha, \tag{1}$$

$$Y = \frac{Z \cdot \tan \theta \cdot m/M}{\sin \delta - \cos \delta \cdot \tan \beta \cdot n/N}, \tag{2}$$

$$Z = \frac{B}{\cot \alpha + \frac{\cot \delta + \tan \beta \cdot n/N}{1 - \tan \beta \cdot \cot \delta \cdot n/N}}, \tag{3}$$

式中, n, m, N, M 可由图像信息直接得到,角度 δ, β, θ 和基线长度 B 在工程中不易直接测量,需要借助结构光系统标定技术进行参数转换与计算。可通过相机成像过程及原理建立简化模型,用含有一定数量的参数模型表示空间点与成像图像平面点的对应关系^[12]。

多项式直接标定的原理如图 2 所示,将系统的绝对坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ (单位为 mm) 定义在刻度标定板原点位置处,设 $O_{wi} - X_{wi} Y_{wi} Z_{wi}$ 为第 i ($i = 1, \dots, n$) 个标靶平面的世界坐标系,所有平面的 Z_{wi} 方向同轴且与相机、激光光源呈固定角度。

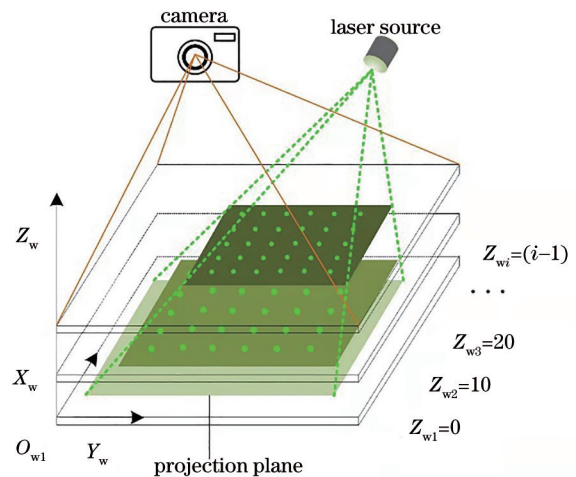


图 2 多项式直接标定模型的原理

Fig. 2 Principle of the polynomial direct calibration model

$P_{ij}(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$ 为第 i 个标靶平面上编号为 j 的激光特征点, 相邻标定面平行且间隔为 d 。

联立透视投影模型和激光方程, 基于“模型法”进行建模时, 需要求解相机内外参数和系统的结构参数, 构建数量庞大的激光方程, 步骤繁琐, 计算复

杂度高。因此, 采用基于映射模型的“直接法”进行系统标定, 将相机和激光器进行一体化建模^[13], 投影点阵上的任意特征点 $P_{wi}(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$ 可用系统直接标定法由图像平面上对应的激光点质心^[14-15]坐标 $p_i(u_i, v_i)$ 表示为二元多项式^[16-17]

$$\begin{cases} X_{wi} = a_0 + a_1 u_i + a_2 v_i + a_3 u_i^2 + a_4 u_i v_i + a_5 v_i^2 + a_6 u_i^3 + \dots \\ Y_{wi} = b_0 + b_1 u_i + b_2 v_i + b_3 u_i^2 + b_4 u_i v_i + b_5 v_i^2 + b_6 u_i^3 + \dots \\ Z_{wi} = c_0 + c_1 u_i + c_2 v_i + c_3 u_i^2 + c_4 u_i v_i + c_5 v_i^2 + c_6 u_i^3 + \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中, 向量 \mathbf{u} 、 \mathbf{v} 由点阵的像素坐标 $p_i(u_i, v_i)$ 构成, X_{wi} 、 Y_{wi} 、 Z_{wi} 为测量点阵实际空间位置 P_{wi} 三个方向的世界坐标。以 X_{wi} 为例, 通过最小二乘法 (OLS) 对残差平方和函数微分求极小值, 得到

$$\sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m [X_{wi} - X_i]^2, \quad (5)$$

构建正规方程组

$$\mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = \mathbf{C}^T \boldsymbol{\gamma}_x, \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & v_1 & u_1 v_1 & \dots & u_1^n v_1^q \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & u_m & v_m & u_m v_m & \dots & u_m^n v_m^q \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_x = [X_1, \dots, X_m]^T, \mathbf{a} = [a_1, \dots, a_n]^T, \quad (8)$$

式中, \mathbf{a} 为待求参数矩阵, \mathbf{C} 、 $\boldsymbol{\gamma}_x$ 分别为输入变量矩阵和 X 方向的多项式函数值向量。由于 $u, v, u^2, uv, v^2, u^3, \dots$ 互异, 故互异矩阵 \mathbf{C} 的 $n+1$ 列向量线性无关, 系数行列式 $|\mathbf{C}^T \mathbf{C}| \neq 0$, 即方程组有唯一确定解。同理, 对 Y 、 Z 方向进行多项式参数解算, 得到三组展开系数 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 。

设 $\mathbf{I}_i = [i_1, \dots, i_t]$ 由线性无关的多项式自变量组成, $\hat{\mathbf{l}}$ 为因变量预测值, \mathbf{a}_k 为第 k 个待求系数, 基于最小角回归 (LAR) 算法的拉索 (LASSO) 模型进行参数缩减, 可表示为

$$\min s(\mathbf{a}) = \sum_{h=1}^r \left(\mathbf{j}_h - \sum_{k=1}^t i_{hk} \mathbf{a}_k \right)^2, \quad (9)$$

式中, r 为总样本数目, t 为多项式的参数量, \mathbf{j}_h 为第 h 个估计坐标的真值。将 \mathbf{j} 等价替换成其在 i_1, i_2 所张空间中的投影 $\bar{\mathbf{j}}_2$, 假设当前预测结果为 $\hat{\mathbf{a}}_k$, 则当前相关系数为

$$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{c}(\hat{\mathbf{a}}_k) = \mathbf{I}'(\mathbf{j} - \hat{\mathbf{a}}_k), \quad (10)$$

式中, \mathbf{I}' 为标准差函数。将 \mathbf{j}_2 沿 $\boldsymbol{\mu}_A$ 方向逼近初始目标残差向量 \mathbf{y} , 即

$$\bar{\mathbf{y}}(\boldsymbol{\gamma}) = \mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_A - \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\mu}_A, \quad (11)$$

最大相关系数维度用集合表示为

$$\hat{\mathbf{C}} = \max_k \{ |\hat{\mathbf{a}}_k| \}, \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \{ k: |\hat{\mathbf{a}}_k| = \hat{\mathbf{C}} \}, \quad (13)$$

引入新元素

$$\mathbf{A}_+ = \mathbf{A} \cup \{ \hat{\mathbf{j}} \}, \quad (14)$$

式中, $\hat{\mathbf{j}}$ 为前进长度取最小值的 \mathbf{j} 。用 \mathbf{A}_+ 代替 \mathbf{A} 并重复上述步骤, 直到残差足够小或所有自变量都被使用过, 即可确定最终的回归模型参数。

在结构光测量系统中, 假设成像模型为线性模型, 则投影到物方的结构光某一点 $p(x, y)$ 在成像设备上的理想成像坐标为 (x_u, y_u) 。实际中成像设备存在设计和制造工艺的不足, 导致拍摄的图像会出现不同程度的畸变, 此时测量系统成为一个非线性系统^[18], $p(x, y)$ 在成像设备上的实际成像坐标为 (x_d, y_d) 。根据畸变理论, 得到投影中心 o_c 与像平面垂线在像平面的交点 (u_0, v_0) , 并以此建立像素坐标校准公式

$$\begin{cases} u_u = \frac{x_d + x_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4)}{dx} + u_0 \\ v_u = \frac{y_d + y_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4)}{dy} + v_0 \end{cases}, \quad (15)$$

式中, $r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$, (x_d, y_d) 可由像素坐标 $(u_d - u_0) dx, (v_d - v_0) dy$ 转换得到, dx, dy 为像元尺寸, k_1, k_2 为径向畸变参数。

基于映射模型的“直接法”对测量系统进行标定, 通过点与点的对应关系可直接得到空间坐标变换函数。但镜头畸变现象导致成像模型呈非线性, 用单一多项式得到的是映射关系的线性近似解, 标定参数对全局模型的解释性不够, 进一步导致测量精度下降。为了提高标定参数对全局模型的解释性, 参照畸变分布规律对标定子区间进行有限元划分, 针对回归残差较大的区域, 重新选择多项式参

数,以提高各子区域模型的拟合优度,进而提高整体测量系统的标定精度。

3 基于畸变偏移矢量的有限元区域标定

由畸变公式可知,远离主点的位置像差更大,与主点等距离的各点像差大小基本相同;邻近的像素

点偏移矢量方向大致相同且均指向图像边缘。考虑导致成像模型呈非线性的主要因素是镜头畸变,区域划分原则应遵循畸变规律。有限元区间的数量越多越,越逼近待求解的非线性模型。为避免小样本模型造成欠拟合或陷入局部最优解,区域数量应根据点阵数目进行合理选择。可视化分析畸变分布,实现标定区域划分的具体步骤如图 3 所示。

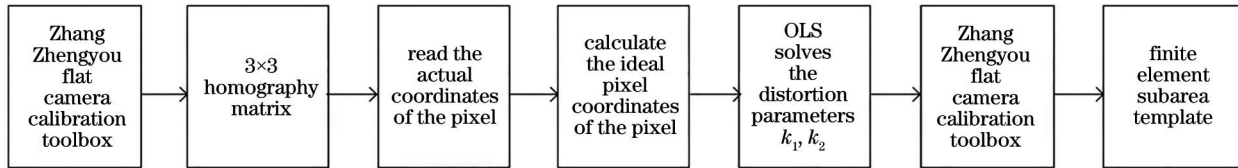


图 3 有限元区域划分的框图

Fig. 3 Diagram of the finite element region division

1) 利用张正友平面标定工具箱^[19]进行相机标定,计算相机投影成像线性模型,得到 3×3 的单应性矩阵 \mathbf{H} ,可表示为

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} [r_1 \quad r_2 \quad t], \quad (16)$$

式中, r_1 和 r_2 为旋转因子, t 为平移因子。

2) 利用几何成像模型计算图像中特征点的理想坐标 $p_u(x_u, y_u)$, 提取像素特征点实际成像坐标 $p_d(x_d, y_d)$ 。

3) 用最小二乘法求解径向畸变参数 k_1, k_2 , 可表示为

$$\begin{bmatrix} (u_u^1 - u_{u0}^1) [(x_u^1)^2 + (y_u^1)^2] & (u_u^1 - u_{u0}^1) \left\{ [(x_u^1)^2 + (y_u^1)^2]^2 \right\} \\ (v_u^1 - v_{u0}^1) [(x_u^1)^2 + (y_u^1)^2] & (v_u^1 - v_{u0}^1) \left\{ [(x_u^1)^2 + (y_u^1)^2]^2 \right\} \\ \vdots & \vdots \\ (u_u^n - u_{u0}^n) [(x_u^n)^2 + (y_u^n)^2] & (u_u^n - u_{u0}^n) \left\{ [(x_u^n)^2 + (y_u^n)^2]^2 \right\} \\ (v_u^n - v_{u0}^n) [(x_u^n)^2 + (y_u^n)^2] & (v_u^n - v_{u0}^n) \left\{ [(x_u^n)^2 + (y_u^n)^2]^2 \right\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d^1 - u_u^1 \\ v_d^1 - v_u^1 \\ \vdots \\ u_d^n - u_u^n \\ v_d^n - v_u^n \end{bmatrix}, \quad (17)$$

将(17)式表示为

$$\mathbf{Dk} = \mathbf{d}, \quad (18)$$

得到径向畸变参数

$$\mathbf{k} = [k_1 \quad k_2]^T = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d}. \quad (19)$$

4) 根据相机畸变矢量分布,制定区域划分样板。将偏差在图像 X、Y 方向的变化量 $\Delta x, \Delta y$ 定义为物方 p 点在成像设备上的理想坐标与实际坐标差值的绝对值,可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = |x_u - x_d| \\ \Delta y = |y_u - y_d| \end{cases}. \quad (20)$$

结合 $\Delta x, \Delta y$ 的占比得到的模板图如图 4 所示。由镜头畸变偏移矢量分布图可知,像素偏移量可用同心圆等高线划分为数个圆环。根据像素偏移方

向确定变化量 $\Delta x, \Delta y$ 间的大小关系,并利用等高线外接矩形进行区分。

在 ROXI1 和 ROIX3 中, $\Delta x > \Delta y$, X 方向偏移分量的比重更大,进行 X 方向的多项式直接标定时, u, u^2 等系数的变化比较明显;在 ROIX2 的上下部分, X 方向偏移分量的比重小于 Y 方向,而靠近主点的畸变不明显,对 u, u^2 等系数几乎无影响,因此将其划分为一个区域。

ROY 模板同理,对 $\Delta y > \Delta x$ 的区域进行划分,分别对应 ROIY1 和 ROIY3,进行多项式直接标定时, v, v^2 等系数的变化比较明显,而 ROIY2 中 Δy 所占的比例明显小于 Δx ,对 v, v^2 等系数几乎无影响。在主点附近像差不明显的第一个同心圆内,规定畸变矢量

$$d = 0, \quad (21)$$

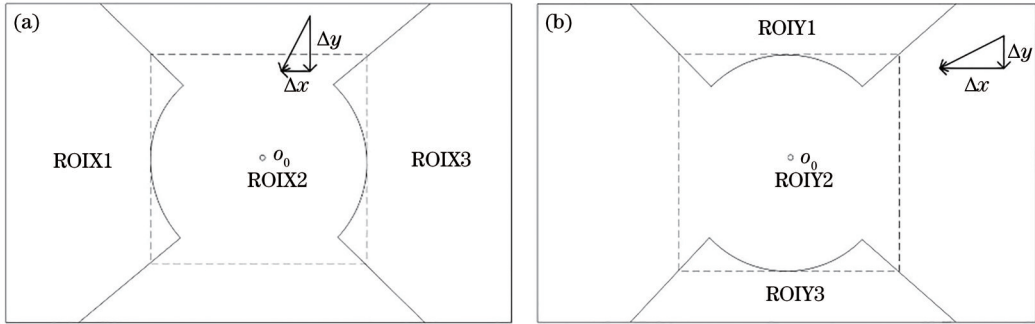


图 4 区域划分样板。(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 4 Area division template. (a) X direction; (b) Y direction

$$\begin{cases} \text{ROIX1, ROIX3, } \Delta x \geq \Delta y \\ \text{ROIX2, } \Delta x < \Delta y \text{ or } \Delta x = \Delta y = 0 \end{cases} \quad (22)$$

同理, 在 Y 方向标定分区

$$\begin{cases} \text{ROY1, ROY3, } \Delta y \geq \Delta x \\ \text{ROY2, } \Delta y < \Delta x \text{ or } \Delta y = \Delta x = 0 \end{cases} \quad (23)$$

成像点的理想坐标矢量为 p_u , 实际像素坐标矢量为 p_d , 则畸变偏移矢量 $d = p_u - p_d$, 箭头指向为畸变偏移方向, 长度为畸变的相对偏移量 $\Delta = |p_u - p_d|$ 。

以主点 o_0 作为中心点, 沿像差等高线同心圆将像平面划分为 n 个圆环, 环内所有点的相差偏移量 $\Delta = |p_u - p_d|$ 相同。引入变量 u, v 的贡献度增加角平分线, 根据 X、Y 方向的分区准则进行有限元标定区域的划分, 标定得到相机的畸变参数如表 1 所示。对相机的畸变规律进行可视化分析, 并进行区域划分, 结果如图 5 所示。

表 1 相机的径向畸变参数

Table 1 Radial distortion parameters of the camera

unit: pixel		
k_1	k_2	Mean reprojection error
-0.1452	-0.0254	0.1876

3 实验数据处理

为验证上述方法的有效性, 用图 6 中的结构光三维测量平台进行系统标定。其中, 相机为 U300 工业相机, 内置 CMOS 图像控制器, 分辨率为 1600 pixel × 1200 pixel; 结构光源采用波长为 532 nm 的绿色点阵激光器, 配备光学衍射器件 (DOE) 光栅灯头; 标定板采用贴有坐标纸的超平玻璃, 通过升降平台和激光测距仪竖直移动 5 个等间隔景深, 在室内采光良好的环境下进行激光特征点

连接同心圆外接矩形的 4 个顶点, 在 X 方向标定分区

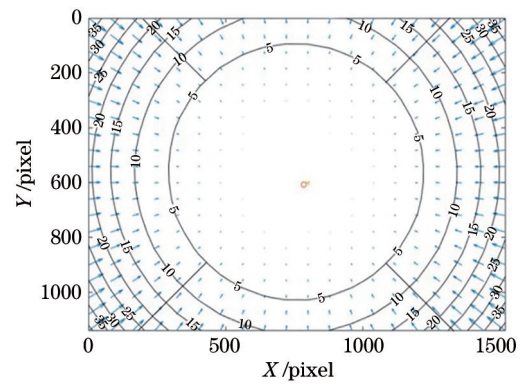


图 5 分区域标定的划分结果

Fig. 5 Division results of subarea calibration

数据的获取。

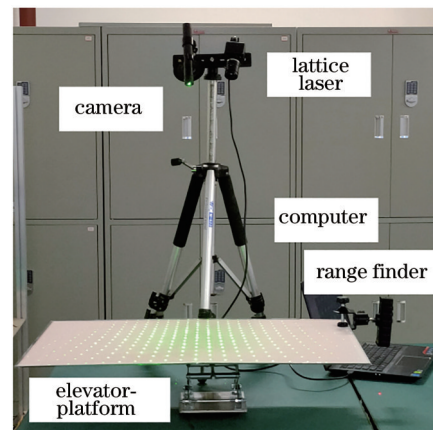


图 6 实验装置的实物图

Fig. 6 Physical image of the experimental device

进行单目相机标定时, 用 7 × 9 的等间距黑白棋盘格, 格距为 28 mm, 分别从不同角度拍摄 20 张平面标靶图像。为保证角点的提取精度, 将相机主光轴与物平面夹角调整在 45° 左右, 并利用最大似然估计得到相机各项参数的最优解。实验以 5 pixel 等

高线和外接矩形角平分线作为阈值,通过求解图像左边缘(ROIX1)、图像中部(ROIX2)、图像右边缘(ROIX3)三个区域的像素点坐标与其对应世界坐标系间的回归函数,得到 X 方向的分区域标定结果。同时,将 Y 方向分为图像上边缘(ROIY1)、图像中部(ROIY2)、图像下边缘(ROIY3)进行系统标定,根据光源产生的特征点密度增加有限元区域个数。 X 方向的全局直接标定及分区域(ROIX2)平面误差和残差分布如图 7 所示。可以发现,全局标定

法得到的回归残差较大且分布不均匀,图像边缘奇异值达到 14.97 mm,采用有限元分区域标定后,回归残差有明显减小,最大奇异值减小至 4.43 mm,标定精度得到了有效的提升。将 X 和 Y 方向的标定区域分别划分为 3 个子区域,结果表明,像素点畸变偏移量的变化量和变化率均单调递减且无拐点。因此,按照该方式沿偏移量等高线同心圆的轨迹,依次增加有限元区域数量,直到满足精度需求。

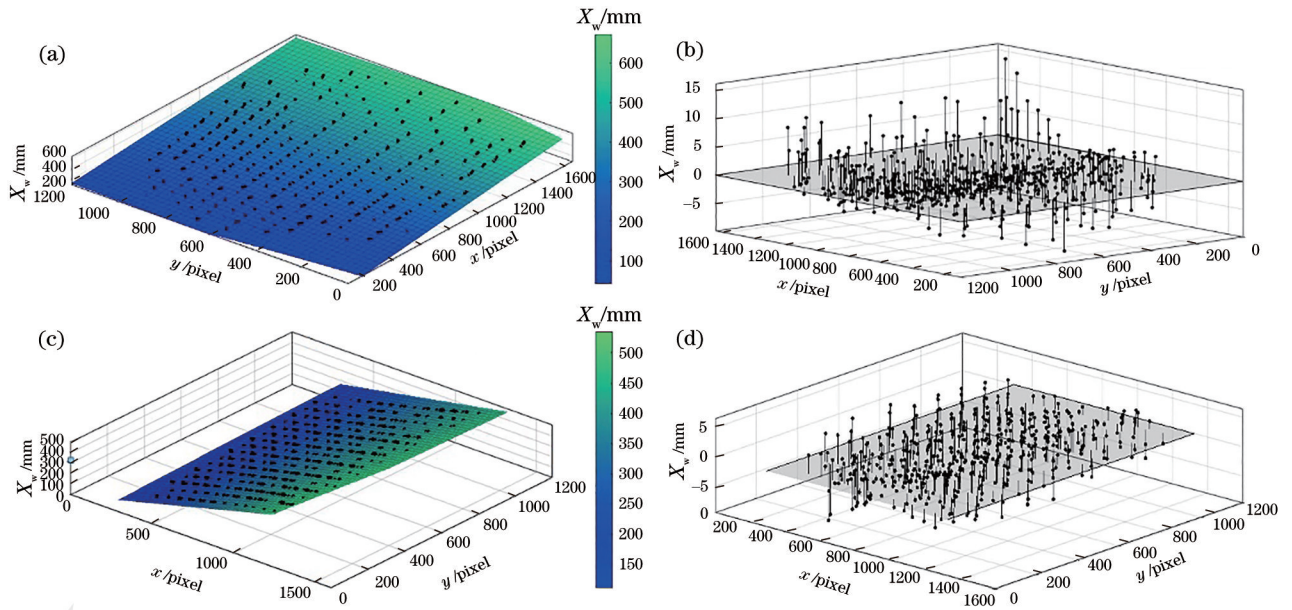


图 7 残差散点图。(a)全局直接法拟合的平面;(b)全局直接法拟合的残差分布;(c)分区域标定拟合的平面;(d)分区域标定拟合的残差分布

Fig. 7 Residual scatter plot. (a) Plane fitted by the global direct method; (b) residual distribution of the global direct method fitting; (c) plane of the subarea calibration and fitting; (d) residual distribution of the subarea calibration and fitting

实验过程中,单层投影 300 个激光阵列到标定板上,标定板的规格为 700 mm×450 mm。利用竖直位移升降台每 10 mm 拍摄一张标定板图像,即各组图像的 Z 轴坐标分别为 10、20、30、40、50 mm,相机与激光器的夹角约为 25°,经过直接法结构光系统标定的回归结果如表 2~表 4 所示,其中,Adjust-R-Square 为校正决定系数。可以发现,相比全局标定法,分区域多项式拟合法在 X 和 Y 方向的均方根误差(RMSE)分别减小了 37.48% 和 55.81%,标定精度得到了显著提升,可用于计算投影激光点阵的实际空间三维坐标。在样本与测试数据比例为 1:1 时进行标定实验,并随机采集 8 个激光特征点坐标作为测试数据,分别在标定空间 Z 轴为 15、20、25、35、45 mm 处随机取 2 个特征点进行误差分析,可以发现,相比全局标定法,分区域标定法输出坐标的平

表 2 分区域标定回归的坐标值误差

Table 2 Coordinate value error of the subarea calibration regression unit: mm

Subarea	RMSE	Adjust-R-Square /mm
ROIX1	1.597	0.9846
ROIX2	2.359	0.9992
ROIX3	2.041	0.9953
ROIY1	2.591	0.9932
ROIY2	3.059	0.9952
ROIY3	3.124	0.9918
Z	1.130	/

均绝对误差有明显减小, RMSE 在 X 和 Y 方向分别减小了 1.349 mm 和 3.686 mm,标定精度分别提升了 37.40% 和 56.20%。此外,标定精度与图像质量、标靶精度、激光光线角度等直接相关,因此在实验条件更加完备的情况下,系统标定精度可得到进

表 3 分区域标定前后的 RMSE

Table 3 RMSE before and after subarea calibration

unit: mm			
Method	X	Y	Z
Global calibration	3.649	6.519	1.130
Subarea calibration	2.281	2.881	/
Difference	1.368	3.638	/

一步提升。

分别对不规则的非结构化凸面、凹面纸膜进行表面特征点的空间坐标测量,以验证该标定方法的可行性。将采集到的原始图像上传到计算机,通过数字图像预处理和质心提取技术进行二维数据采集,并将点阵质心坐标代入系统标定的函数模型中

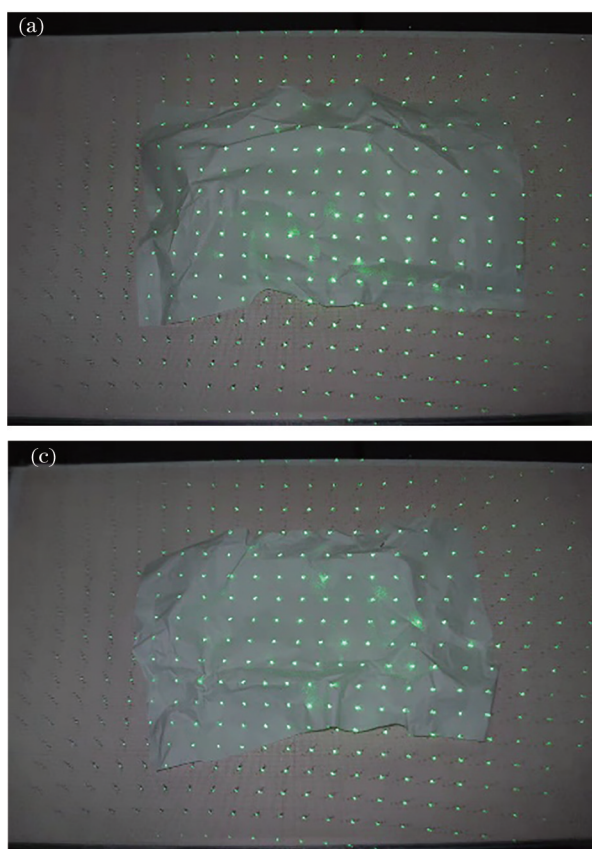


表 4 点阵激光系统的测量误差

Table 4 Measurement error of the point array laser system

unit: mm			
Method	X	Y	Z
Global calibration	3.607	6.559	1.228
Subarea calibration	2.258	2.873	/
Difference	1.349	3.686	/

进行特征点三维信息的解算。图像处理过程和标定计算结果的空间离散点云如图 8 所示。可以发现,测量结果与原始图像比较吻合,可以观察到图 8(b)中两个坡度的形貌和图 8(d)中四周高中心低的分布特点,真实还原了样本表面的几何外观。

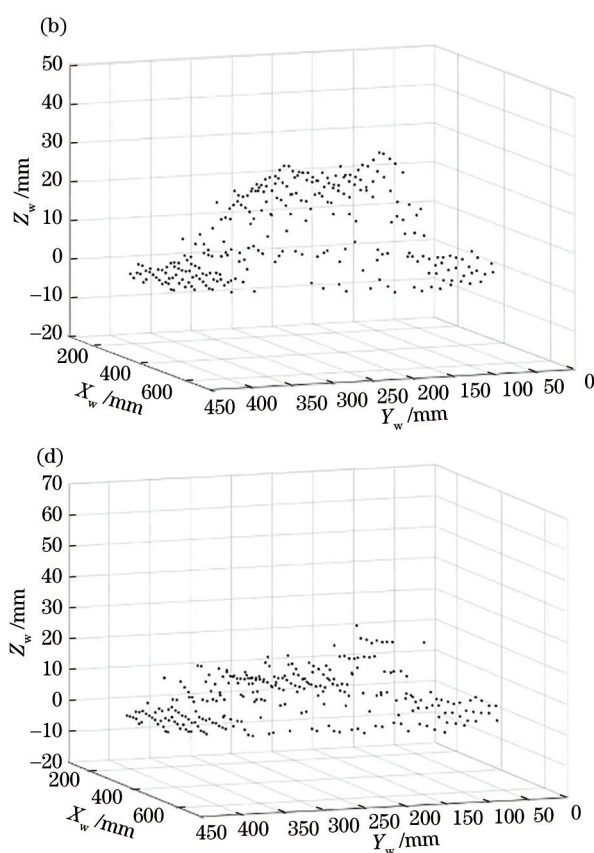


图 8 原始图像及其三维空间分布。(a)凸面的点阵投影;(b)凸面的三维散点图;(c)凹面的点阵投影;(d)凹面的三维散点图
Fig. 8 Original image and its three-dimensional spatial distribution. (a) Projection of convex surface; (b) three-dimensional scatter plot of convex surface; (c) projection of concave surface; (d) three-dimensional scatter plot of concave surface

4 结 论

提出了一种基于畸变规律的结构光三维测量系统有限元分区域标定法,该方法结合相机畸变的分布规律优化拟合算法,有效解决了直接标定模型全局适用性差的问题,进而提升了测量系统的标定精度,得到具体的多项式参数方程。测量时,结构

光源与相机的相对位置保持固定,就能利用物像映射模型从变形的组合点阵激光图像中还原出被测物体表面的三维轮廓信息。

参 考 文 献

[1] Chen D L, Hao F, Shi J J, et al. An overview of three-dimensional visual measurement method[J].

- Instrumentation Technology, 2019(6): 21-24, 30.
陈德林, 郝飞, 史晶晶, 等. 浅谈三维视觉测量方法[J]. 仪表技术, 2019(6): 21-24, 30.
- [2] Zhang G J, Wei Z Z. A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection[J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34(5): 373-380.
- [3] Geng K Z, Gao Z H. Calibration method for structured light 3D measurement system having single camera and single projector[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2): 225-229.
耿楷真, 高治华. 单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 225-229.
- [4] Zhang R F, Shu Z Y, Nan G L. Calibration method for line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 221101.
张瑞峰, 舒子芸, 南刚雷. 一种新的线结构光标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221101.
- [5] Wang Z M, Liu W T. Self-corrected algorithm for projective distortion of photogrammetry[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(5): 377-381.
王泽民, 刘文涛. 摄影测量的射影失真自修正算法[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(5): 377-381.
- [6] Kuang Y C, Cui L C. A new calibration method for line-structured light vision sensor based on linear scale[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 71-77.
邝泳聪, 崔亮纯. 基于线纹尺的线结构光视觉传感器标定新方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 71-77.
- [7] Zhang L. Research on calibration technology of structured light inspecting in road automatic detecting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
张磊. 路面自动检测装置中的结构光三维检测标定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] Li A J, Xin R, Wu S H. Efficient calibration method for line-structured light vision measurement system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 221505.
李爱娟, 辛睿, 武栓虎. 高效线结构光视觉测量系统标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221505.
- [9] Zhao M, Zhang Y F, Zhang Q. Holographic coding target and image back projection correction matching [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0612001.
赵敏, 张宇帆, 张琪. 全息编码靶标及图像逆投影校正匹配[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0612001.
- [10] Zhang G J, Li X, Wei Z Z. A method of 3D double-vision inspection based on structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(6): 604-607, 624.
张广军, 李鑫, 魏振忠. 结构光三维双视觉检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(6): 604-607, 624.
- [11] Xiong H Y, Zong Z J, Xu Y. Direct calibration method of structured light stripe visual sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(3): 38-41.
熊会元, 宗志坚, 许铀. 线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(3): 38-41.
- [12] Wang R. Measurement of shaft diameters based on the vision technology of point-array structured light [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
王睿. 基于点阵结构光视觉技术的轴径测量[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [13] Zhang H, Bao G Q, Liu K. Simple calibration method for three-dimensional imaging system with structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141102.
张翰, 包国琦, 刘凯. 一种结构光三维成像系统的简易标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141102.
- [14] Luo K L, Hui J Z, Liu Q, et al. Three dimensional measurement technology and experimental evaluation of structured light vision detection system based on indirect calibration method[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(7): 17-21.
罗凯璐, 惠记庄, 刘琼, 等. 基于间接标定法的结构光视觉检测系统三维测量技术与试验评估[J]. 现代制造技术与装备, 2018(7): 17-21.
- [15] Yu Q F, Sun X Y, Quan T H, et al. Accurate measurement of a 3D moving object through calibration and subpixel techniques[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(3): 38-42, 86.
于起峰, 孙祥一, 权铁汉, 等. 用标定和亚像素技术实现三维运动目标的高精度测量[J]. 宇航学报, 1999, 20(3): 38-42, 86.
- [16] Lu Z G, He P, Zhi L J, et al. Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 853-858.
卢治功, 贺鹏, 职连杰, 等. 基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 853-858.
- [17] Zhou J B, Li Y H, Qin Z Y, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412005.
周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412005.
- [18] Cui H, Guo R, Li X Q, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904003.