中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于几何估计优化的多线激光三维重建

黄会明 刘桂华 邓磊 宋涛 钦付平

Multi-line laser 3D reconstruction based on geometric estimation optimization

HUANG Hui-ming, LIU Gui-hua, DENG Lei, SONG Tao, QIN Fu-ping

引用本文:
黄会明, 刘桂华, 邓磊, 宋涛, 钦付平. 基于几何估计优化的多线激光三维重建[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 274-286. doi: 10.37188/CO.2024-0184
HUANG Hui-ming, LIU Gui-hua, DENG Lei, SONG Tao, QIN Fu-ping. Multi-line laser 3D reconstruction based on geometric estimation optimization[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 274-286. doi: 10.37188/CO.2024-0184

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0184

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于转动式二维激光扫描仪和多传感器的三维重建方法

3D reconstruction method based on a rotating 2D laser scanner and multi-sensor

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 663 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0159

重投影优化的自由双目相机位姿估计方法

Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1400 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0105

基于双注意力机制的车道线检测

Lane detection based on dual attention mechanism

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 645 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0033

复合椭球腔太阳能聚光均匀线光源设计

Design of solar concentrated uniform linear light source of composite ellipsoid cavity

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 144 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0138

显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述

3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry：a review

中国光学（中英文）. 2021, 14(3): 447 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0199

线扫描虚拟结构调制共聚焦显微成像

Line-scanning confocal microscopic imaging based on virtual structured modulation

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 431 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0120

文章编号 2097-1842(2025)02-0274-13

基于几何估计优化的多线激光三维重建

黄会明, 刘桂华*, 邓 磊, 宋 涛, 钦付平
（西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621000）

摘要: 传统的多线激光三维重建技术由于多线激光线不可避免地会受到噪声的影响, 导致检测的激光中心坐标存在一定误差, 这将导致直接使用基于极线约束找到的匹配点进行三维重建时无法获得高精度的三维数据。为了解决上述问题, 本文提出了一种基于几何估计方法来实现多线激光的三维重建。首先, 标定出多线激光的二次曲面方程, 结合双目极线约束的方法可以计算出多线激光的初始匹配点。在找到正确的初始匹配点之后, 利用图像点与双视图极线的关系约束来建立一个几何距离最小化的估计模型。通过这个几何距离最小化的优化估计, 可以重新计算出更加符合极线约束的新匹配点, 从而提高激光图像点的匹配精度, 最后根据这些新的匹配点来完成多线激光的三维重建。实验结果显示: 相较于传统方法, 本文提出的算法在匹配度和精度方面表现更优, 最终的三维重建精度可以达到 0.02 mm 左右。通过这种方法可以显著提高双目多线激光重建的整体精度, 从而获得更加精确和可靠的三维数据。

关 键 词: 多线激光; 极线约束; 几何估计; 多线激光重建
中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0184 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0184

Multi-line laser 3D reconstruction based on geometric estimation optimization

HUANG Hui-ming, LIU Gui-hua*, DENG Lei, SONG Tao, QIN Fu-ping
(*Southwest University of Science and Technology*, *School of Information Engineering*, *Mianyang* 621000, *china*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *liughua_swit*@163.*com*

Abstract: In traditional multi-line laser 3D reconstruction technology, due to the inevitable noise affecting the multi-line laser lines, the extracted laser center coordinates often contain specific errors. These errors can lead to the inability to obtain high-precision 3D data when using matching points found based on epipolar constraints for 3D reconstruction directly. To address this issue, we propose a method based on geometric estimation to achieve 3D reconstruction of multi-line lasers. First, by calibrating the quadratic surface equations of the multi-line laser, combined with the binocular epipolar constraint method, the initial matching points of the multi-line laser can be calculated. After finding the correct initial matching points, a geometric distance minimization estimation model can be established using the distance constraint from points to epi-

收稿日期: 2024-10-08; **修订日期:** 2024-10-29
基金项目: 装备预先研究共用技术项目（No. 50927010302）; 广东省电网公司广州供电局的项目（No. 080044KK52190002）
Supported by Equipment Pre-research Common Technology Project (No. 50927010302); the Projects of Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd (No. 080044KK52190002)

polar lines. This geometric distance refers to the distance from the laser center points in the left and right images to their corresponding epipolar lines. New matching points that better conform to the epipolar constraints can be recalculated through this geometric distance minimization optimization estimation. Finally, these new matching points can be used to complete the 3D reconstruction of the multi-line laser. Compared to the traditional method based on epipolar constraints, the algorithm proposed in this paper performs better in matching and accuracy. The accuracy of the final 3D reconstruction can reach about 0.02 mm. This method can significantly improve the overall accuracy of binocular multi-line laser reconstruction, thereby obtaining more accurate and reliable 3D data.

Key words: multi-line laser; epipolar constraint; geometric estimation; multiline laser reconstruction

1　引　言

随着机器视觉与三维重建技术的持续发展, 相关技术在众多行业中的应用已取得显著成效, 尤其在工业领域, 其应用范围极广。然而随着工业场景的不断拓展, 非接触式光学方法在获取三维数据时遭遇诸多挑战, 特别是在汽车、锻造、航空制造等领域[1], 许多零件的反光特性使得基于光栅相位的三维重建技术难以达到使用要求。基于激光的三维重建技术成为解决反光问题的有效方案。激光测量系统凭借其高稳定性、快速度和高精度等优势, 在物体表面轮廓测量、在线检测、医学等领域获得了越来越广泛的应用。多线激光三维重建技术也在建筑、汽车制造、文物保护等多个领域展现了其应用潜力。在建筑领域这项技术可用于建筑物的三维建模、测量和可视化。在汽车制造领域它有助于汽车外形设计、碰撞测试和生产过程控制。在文物保护领域, 它可用于文物的三维建模、修复和可视化。此外, 多线激光三维重建技术在地形测量、逆向工程和人体测量等方面也扮演着重要角色。

多线激光的三维重建技术是视觉行业的一个研究热点。Li 等[2] 提出了一种基于结构约束的光学条纹聚类方法来测量平面内一定高度的物体。其根据相邻光学条纹间横坐标的偏移量来判断条纹所属的光学平面。Zhang 等[3] 通过求解多个空间坐标点, 利用像素坐标下的激光条纹质心, 同时结合相机的内部参数以及光平面方程, 对左侧图像进行辅助定位。随后采用两个相机的姿态参数与内部参数的变换矩阵, 将所得的空间坐标点映射至相应图像上实现精确匹配。Cui 等[4] 采用多线激光投影技术与双目立体视觉测量方法, 对沥青路面纹理进行精确测量。在此过程中, 运用八邻域算法实现多行激光条纹的有效匹配, 并对相同条纹进行准确标记。Sun 等[5] 提出了一种将单线激光与三线激光相结合的测量技术。该技术保持三线结构光的静态状态, 并通过移动单线激光器使其与三线激光器相交。利用相交坐标能够校准扫描光平面, 从而实时获取物体的三维形态。赵海等[6] 撰写综述性文章全面介绍了激光扫描三维重建技术。阐述了激光扫描仪的基本工作原理、点云数据的处理流程及三维重建算法, 并着重指出激光扫描技术在三维重建领域的巨大应用潜力。然而, 该技术在实践过程中也面临诸多挑战与问题, 主要涉及数据处理速度的提升、数据准确性的保障以及系统鲁棒性的增强等方面。Wan 等[7] 提出了一种高效的三维扫描测量系统。该系统基于非对称三目视觉与多线激光技术。在该系统中激光条纹通过采用 kmeans++聚类算法进行分层处理, 并据此完成多线激光条纹的标引工作。Ping 等[8] 设计了一种实用的线结构光学系统标定方法, 该方法无需对相机及光学元件平面进行标定。而是通过提取光学平面的特征点, 并计算相应的单应性矩阵从而映射出光学平面与成像平面之间的关联关系。Cao Y[9] 等提出了一种多线激光扫描技术的三维物体重建方案。该方案通过同步采集多个视角的点云数据, 利用这些数据构建物体的三维模型。文中详尽阐述了多线激光扫描仪的工作机理, 以及运用多线激光扫描数据进行三维重建的具体途径。同时还深入剖析了多线激光三维重建技术的优势及其存在的局限性。Jian X[10] 等系统性地回顾了激光扫描三维重建技术的相关内容, 涵盖激光扫描仪的运行机

制、点云数据的处理流程以及三维重建算法等多个维度，并指出该技术面临的一系列挑战与问题，具体表现为数据处理速度提升困难、精度难以保证以及鲁棒性有待增强等方面。Oesau S[11] 针对室内场景的重建问题，提出了一种基于多线激光的三维扫描与处理方案。构建了一个包含数据采集、点云处理、场景分割及三维重建等多个步骤的室内场景重建框架。实验结果显示该方案在室内场景重建方面展现出了优良效果。Kwoczynska B[12] 提出了一种半自动化的建筑三维重建技术，该技术采用多线激光扫描数据以构建建筑模型。设计了一种基于深度学习的算法，旨在将多线激光扫描数据转化为建筑模型的几何与纹理信息。该方法在建筑三维重建领域展现出较高的精确度和效率。Zhang C[13] 提出了一种实时三维手部重建技术。该技术采用多线激光扫描仪对手部表面进行扫描以获取点云数据，研发了一套手部跟踪系统，旨在实时捕捉手部的动态运动，并对其实施三维重建处理。PJ Chiang 等[14] 在机器人上装配了相机与激光投射装置，将激光投射至工件表面，通过精确提取激光线条的中心点，并依据对极几何原理匹配相应的点，从而实现了重建过程。使得机器人能够准确判断工件的深度信息，并有效识别存在的缺陷及具体形状。

多线激光重建技术主要依赖于激光平面方程与极线约束原理以实现精准的三维重建。该技术的核心前提是激光投射形成的是多条直线，这些直线在空间中进一步构成多个三维平面，需运用特定的标定算法精确计算出各空间平面的具体参数。然后，结合双目视觉的极线约束条件，共同完成多线激光数据的三维重建。然而，在实际应用中由于制作工艺的限制，激光器投射出的多条激光线并非直线而是呈现出一定弯曲的曲线，在空间中表现为特定的空间曲面，这种情况下，若仍然采用基于空间平面的方法重建这些激光线将无法获取准确的匹配点，即空间平面参数无法准确对应实际空间曲面特征，从而为后续基于空间平面方程的激光点匹配带来不确定性。此外，激光本身具有高斯噪声，导致提取的激光中心点存在一定误差。如果在找到正确匹配点后直接进行三维重建，将导致最终重建的三维点精度较低。

为了解决这个问题，本文提出了一种基于几何估计的多线激光三维重建方法。该方法将多线激光线投射的空间视为空间二次曲面方程，通过标定空间二次曲面方程实现多线激光的校准。然后，根据极线约束和空间二次曲面方程进行匹配点的筛选。在找到准确的匹配点之后采用一种基于点到极线距离约束的最小化极线距离几何估计方法，用于更新已匹配的图像点。这种方法可以使重新计算的匹配点更加符合极线约束条件，从而提高多线激光三维重建的精度。最后，根据几何估计方法更新匹配点，从而完成多线激光的三维重建。

本文提出的方法在处理激光线非直线性和高斯噪声问题上具有显著优势，有助于提高多线激光三维重建的精度和可靠性。

2 多线激光空间方程的标定

2.1 多线激光数学模型

多线激光三维重建技术的核心在于交叉的七线激光束。该技术采用两组七线激光装置，分别以特定角度对目标物体进行照射。在激光照射过程中，系统通过硬件触发机制同步启动相机，以捕捉物体表面交错的七线激光投射图像。图 1 展示了二通道激光器及交叉七线激光示意图，其中二通激光器包括两组七线激光装置（LD1 与 LD2）。这两组七线激光与水平面呈 30°夹角。所有激光的波长均为 450 nm，以确保在图像采集过程中获得最佳对比度和分辨率。

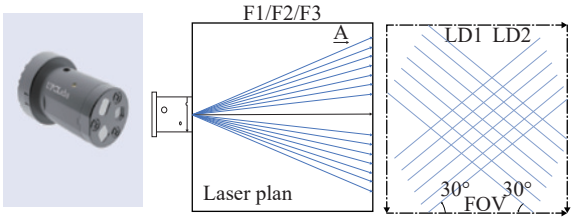


图 1 二通道激光器及交叉七线激光示意图

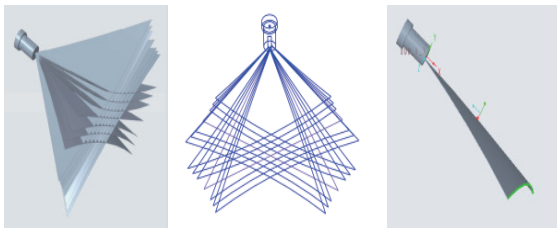
Fig. 1 Schematic diagram of two-channel laser and cross-seven-line laser

传统的激光线标定技术[15] 采用的是基于激光平面的标定方法。该方法将激光投射的空间视为由多个平面组成，其中激光器发射的交叉七线激光在投射后形成若干三角形平面。相机所采集到的激光线实际上是激光平面与物体表面的交线。每个光平面在三维空间中的数学模型可以描述为：

$$A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0, (i = 0 \cdots n) \quad , \qquad (1)$$

其中A_i, B_i, C_i, D_i 为平面方程的系数。

在基于激光空间平面标定的时候, 假定激光投射形成的是一条直线, 而且在三维空间中呈现为一个平面。标定时需运用特定的算法[16-17] 计算该空间平面的参数。然而在实际应用中, 由于制造工艺的局限性, 激光器发射的多条光线并非完全直线, 而是呈现出一定程度的弯曲, 所形成的面为空间曲面。因此, 若采用基于平面的标定方法来标定这些激光线, 将不可避免地导致标定结果不准确, 即计算出的空间平面参数无法精确反映真实的空间曲面特性。这将为后续基于空间平面方程的激光点匹配带来不确定性。针对这一问题, 本文对多线激光成像原理进行深入剖析, 将多线激光成像空间视作二次曲面并运用基于空间二次曲面方程的多线激光标定技术, 对这些空间二次曲面方程进行标定, 实现多线激光的精确校准, 如图 2 所示。



(a)　(b)　(c)

图 2　多线激光曲面结构示意图。(a) 交叉 7 线模型图; (b) 激光投射的曲线; (c) 单个激光的曲面结构图

Fig. 2　Multi-line laser surface structure diagram. (a) Cross-seven-line model diagram; (b) curves of laser projection; (c) surface structure diagram of a single laser

由于单个激光的空间形状是弯曲的, 所以投射到物体表面时与物体相交的地方是一条曲线。因此多线激光投射的曲面可视为多个二次曲面[18]。对应的二次曲面方程如下:

$$z(x,y) = a_i x^2 + b_i xy + c_i y^2 + d_i x + e_i y + f_i, (i = 0 \cdots 13), \qquad (2)$$

其中$[a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i]$为需要标定的多个激光二次曲面方程的参数。

2.2　多线激光的标定

多线激光标定的核心目的在于精确求解每一条激光线在三维空间中的具体方程。借助如式 (2) 所示的数学表达式, 能够将激光线的空间分布特征定义为二次曲面方程的形式。采用一款配备双通道的交叉 7 线激光器装置, 鉴于每通道均涵盖七条激光线, 故整个系统在最终的标定环节中能够确立并导出共计 14 个独立的曲面方程。这些曲面方程对于后续数据处理及分析工作具有举足轻重的意义, 因为它们能够精确提供激光线在空间中的位置信息及方向指引, 进而保障测量结果的精确度和可信度。

在标定过程中采用了圆形标定板方法。标定时, 需将左斜多线激光与右斜多线激光分别投射至标定板上, 如图 3 所示。在此基础上, 使用激光线中心提取算法[19-20] 检测出所有激光线的中心点二维坐标。为了便于后续处理, 需对检测所得的激光线中心点坐标进行编号, 具体如图 3 所示。在成功完成双目相机的内外参数标定后, 将图 3 中的标定板置于标定视场内。通过在不同位置多次放置标定板并进行测量, 获得了标定板相对于相机的外部参数$[R, T]$。这些外参数对于后续的图像处理和分析工作具有重要意义。将标定板圆心三维点$P_{\text{plane}}(x_i, y_i, z_i)$转换到相机坐标系下$P_{\text{camera}} = RP + T$, 并拟合出标定板在相机坐标系下的平面方程:

$$a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0, (i = 0 \cdots n) \quad , \qquad (3)$$

其中$[a_i, b_i, c_i, d_i]$为标定板在相机坐标下的平面参数, n表示标定板的不同位置编号。

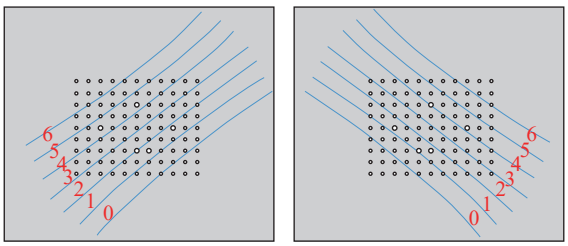


图 3　激光线投射在标定板上以及激光线编号

Fig. 3　The laser lines projected on the calibration plate and numbered

根据标定板在相机坐标系下的平面参数以及成像模型, 可得到每个编号的激光在相机坐标系下的三维坐标。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} \quad , \qquad (4)$$

$$\begin{cases} z_L = -d_i/(a_i(u-u_0)f_x + b_i(v-v_0)f_y) \\ x_L = z_L(u-u_0)f_x \\ y_L = z_L(v-v_0)f_y \end{cases}, \quad (5)$$

其中 (u,v) 为激光点坐标，(u_0,v_0) 为相机中心，(f_x,f_y) 为相机的像素焦距，(x_L, y_L, z_L) 为激光点的三维坐标。

依据式 (5) 可以计算出激光线与标定板相交区域的激光线在左相机所建立的三维坐标系中的三维坐标。随后如图 4(b) 所示调整标定板的位置，以便获取激光线在多个不同位置的三维点坐标。利用这些在不同位置获取的激光线三维坐标，可以拟合出激光线的二次曲面方程。对公式 (2) 进行变形处理得到：

$$\boldsymbol{A}_L \boldsymbol{X}_i = \boldsymbol{B}_L \quad , \quad (6)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_L = \left[x_L^2, y_L^2, x_L y_L, x_L, y_L, 1\right] \\ \boldsymbol{B}_L = [z_L] \\ \boldsymbol{X}_i = [a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}, a_{i5}], (i = 0 \cdots 13) \end{cases}, \quad (7)$$

其中 $\boldsymbol{A}_L$ 是由公式 (5) 计算的每条激光线在不同位置处的 x,y 值组成的矩阵，$\boldsymbol{B}_L$ 为每条激光线 z 值组成的矩阵，$\boldsymbol{X}_i$ 为待求的二次曲面参数，由于采用的是交叉七线激光器，所以需要计算出 14 个激光曲面方程参数。可以采用基于最小二乘的 SVD (singular value decomposition) 分解 $\min\limits_x \|\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B}\|_2^2$ 来解式 (6)。

矩阵 $\boldsymbol{A} \in R^{m\times n}$，$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U\Sigma V}^{\mathrm{T}}$。对应的特征值为 $\sigma_1 \geqslant \cdots \geqslant \sigma_r \geqslant \sigma_{r+1} = \sigma_{\min(m,n)} = 0$

由于 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 是正交矩阵，则有：

$$\|\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B}\|_2^2 = \|\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B})\|_2^2 = \|\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\|_2^2 = \|\boldsymbol{\Sigma V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}-\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\|_2^2 \quad , \quad (8)$$

$$\min_x \|\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B}\|_2^2 = \min_x \left[\sum_{i=1}^{r}(\sigma_i\Delta_i - \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^2 + \sum_{i=r+1}^{m}(\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})\right] \quad (9)$$

当 $\sigma_i\Delta_i = \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}$ 时可以得到最小二乘的解为：$\Delta_i = \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}/\sigma_i$，最小值为：

$$\min_x \|\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B}\|_2^2 = \sum_{i=r+1}^{m}(\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^2 \quad . \quad (10)$$

由 $\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$ 可得到 $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{V\Delta}, (\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}/\sigma_i)$ 依据前述方法，就能够计算出所有激光线的二次曲面方程，为后续的多线激光三维重建工作奠定坚实基础。

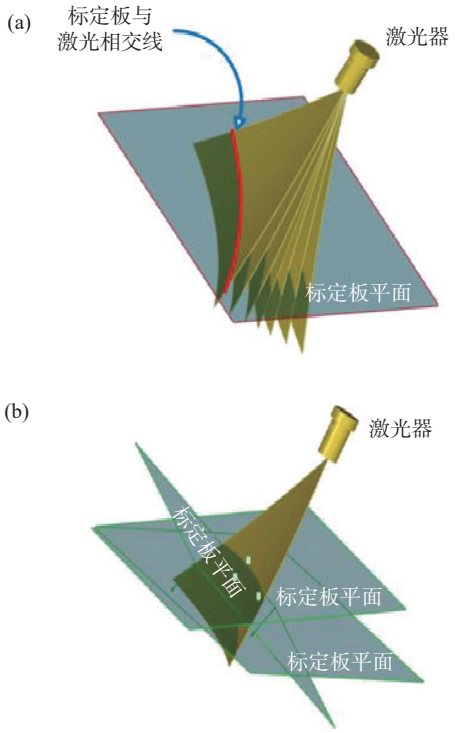


图 4 多线激光曲面与标定平面相交图。(a) 多线激光空间二次曲面与标定板相交情况。(b) 单个激光二次曲面与多个位置标定相交情况

Fig. 4 Intersection diagram of multi-line laser surface and calibration plane. (a) The intersection of the multi-line laser spatial quadratic surface with the calibration plate. (b) The intersection of a single laser quadratic surface with multiple positions

3 基于几何估计的多线激光三维重建

在完成多线激光标定之后，利用双目相机参数和激光曲面方程即可对激光线进行三维重建。关键步骤是确定左右视图的匹配点，并通过双目立体视觉算法计算这些点的三维坐标。采用双目极线匹配与反投影约束相结合的方式进行重建。首先，需计算左右视图之间的极线，随后利用右极线信息，将左图像中的一个激光点映射至右图像上，以获取所有可能的匹配点。同时依据激光曲面方程与相机成像原理，计算出左图像上激光点在七个激光曲面方程下的三维坐标，进而将这些三维坐标转换至右相机坐标系，并对其进行反投影操作，以获得在右相机上的反投影坐标。通过对比右图像上的反投影坐标与所有匹配点的坐标，可确定出与反投影坐标像数距离最近的初始匹配点。此过程需重复进行，以实现左右图像上

所有激光点的匹配。

根据双目相机极线几何原理可知, 空间点X在左右视图的投影点分别位于各自的极线上, 如图 5 所示。

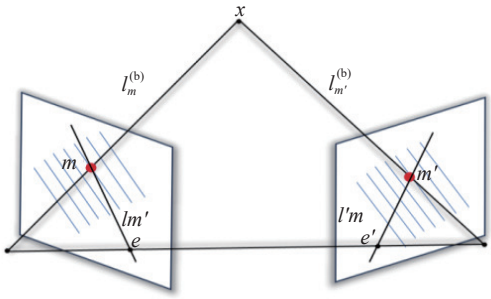


图 5　极线约束示意图

Fig. 5　Polar constraint diagram

匹配点表示为$m \leftrightarrow m'$, 基本矩阵描述了图像点与极线的对应关系。设左右相机矩阵分别为$\boldsymbol{K},\boldsymbol{K}'$, 像平面分别为$\boldsymbol{I},\boldsymbol{I}'$, e,e'分别为左右图像的极点, $\forall \boldsymbol{m}\in \boldsymbol{I}$反投影极线的参数方程可表示为:

$$X(s)=\boldsymbol{K}^{+}m+s\boldsymbol{C}, s\in(-\infty,+\infty) \quad , \qquad (11)$$

其中$\boldsymbol{K}^{+}$是$\boldsymbol{K}$的广义逆, 即$\boldsymbol{K}\boldsymbol{K}^{+}=\boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{C}$是第一个相机的光心, 即$\boldsymbol{K}\boldsymbol{C}=0$, 于是可得到右图像对应的极线方程$l'_m$:

$$\begin{aligned} l'_m =& e'm' = (K'C)(K'X(s)) = \\ & (K'C)((K'Pm+sK'C)) = \\ & (K'C)((K'Km) = [e']_{+}K'K^{+}m \quad , \end{aligned} \qquad (12)$$

即$l'_m=[e']_{+}\boldsymbol{K}'\boldsymbol{K}^{+}$m, 所以两个相机之间的基本矩阵为$\boldsymbol{F}=[e']_{\times}\boldsymbol{K}'\boldsymbol{K}^{+}$。根据右相机与左相机之间的坐标变换关系$[\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}]$, 左右相机的投影矩阵可以表示为:

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{I},\boldsymbol{0}], \boldsymbol{P}'=\boldsymbol{K}'[\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}] \quad . \qquad (13)$$

根据$\boldsymbol{K}^{+}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{K}^{-1}\\ \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}\end{pmatrix}, \boldsymbol{e}'=\boldsymbol{K}'\boldsymbol{t}$, 所以:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{F} =& [\boldsymbol{K}'\boldsymbol{t}]_{\times}\boldsymbol{K}'\boldsymbol{K}^{+}=[\boldsymbol{K}'\boldsymbol{t}]_{\times}(\boldsymbol{K}'\boldsymbol{R},\boldsymbol{K}'\boldsymbol{t})\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}^{-1}\\ \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}= \\ & [\boldsymbol{K}'\boldsymbol{t}]_{\times}\boldsymbol{K}'\boldsymbol{R}\boldsymbol{K}^{-1} \quad . \end{aligned} \qquad (14)$$

在得到两个相机的内外参数后, 根据公式 (14) 即可以计算出对应的基本矩阵, 进而确定相机间的极线约束。根据双目极线的约束条件, 即两幅图像上匹配点$m\leftrightarrow m'$满足$m'Fm=0$。设左图像提取到的一个激光点的图像坐标为$p(u,v)$, 则在右图像的极线上可以找到多个匹配点$q_i(u_i,v_i)$, $i=0\cdots6$, 并满足关系式$pFq_i=0, i=0\cdots6$, 如图 6 所示。

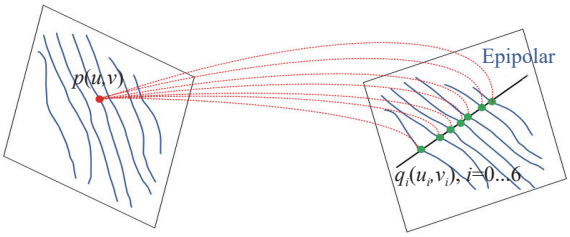


图 6　极线匹配示意图

Fig. 6　Schematic diagram of polar line matching

根据标定的 7 个激光曲面方程和相机成像原理, 在右图像上匹配到多个激光点之后, 可以计算出左相机的激光二维坐标$p(u,v)$对应的 7 个三维坐标。根据公式 (4) 表示的相机成像模型以及公式 (2) 所示的激光曲面方程可得到:

$$\begin{cases} z(x,y)=a_ix^2+b_ixy+c_iy^2+d_ix+e_iy+f_i, (i=0\cdots13) \\ \begin{bmatrix}u\\ v\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_x & 0 & u_0\\ 0 & f_y & v_0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ Y\\ Z\end{bmatrix} \end{cases} . \qquad (15)$$

将公式 (15) 中的相机模型变形为:

$$\begin{cases} X=Z(u-u_0)/f_x \\ Y=Z(v-v_0)/f_y \end{cases} , \qquad (16)$$

将公式 (16) 代入公式 (15) 中的激光二次曲面方程可得:

$$(a_ik_1^2+b_ik_2^2+c_ik_1k_2)Z^2+(d_ik_1+e_ik_2-1)Z+f_i=0, \qquad (17)$$

其中$k_1=(u-u_0)/f_x, k_2=(v-v_0)/f_y$。

联立公式 (16) 和公式 (17) 可得:

$$\begin{cases} m_{1i}Z^2+m_{2i}Z+f_i=0, Z\geqslant 0 \\ X=Z(u-u_0)/f_x \\ Y=Z(v-v_0)/f_y \end{cases} , \qquad (18)$$

其中$m_{1i}=a_ik_1^2+b_ik_2^2+c_ik_1k_2, m_2=d_ik_1+e_ik_2-1$。

根据公式 (18) 可以计算出左图像上一个激光点在多个激光曲面方程上的三维点。此时的三维点坐标系是建立在左相机上的, 为了得到右边图像的匹配点, 需要将重建的多个激光点转换到右相机上。根据双目标定的结果, 可以得到左相机三维点到右相机的转换关系$\boldsymbol{P}'_i=\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_i+\boldsymbol{t}$, 然后根据公式 (19) 将右相机坐标系下的三维点进行反投影。

$$\begin{bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{K}_R \boldsymbol{P}_i' = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{19}$$

根据公式 (18) 可以计算出所有激光曲面上的三维点，然后根据公式 (19) 可以得到激光曲面上三维点在右相机上的反投影点$q'(u_i', v_i'), (i = 0 \cdots 6)$，再结合前面基于基础矩阵匹配到的点$q_i(u_i, v_i)$，$i = 0 \cdots 6$，根据公式 (20) 找到像素距离最小的点，即为对应的匹配点：

$$\min\left(\left|q_i q_j'\right|\right) = \min\left(\sqrt{(u_i - u_j')^2 + (v_i - v_j')^2}\right), \quad (i = 0 \cdots n, j = 0 \cdots m) \quad . \tag{20}$$

根据公式 (20) 可以计算出左右激光点的所有初始匹配点，但是由于激光噪声以及极线匹配误差的影响，其匹配的点对不是最佳的匹配点，如图 7 所示。

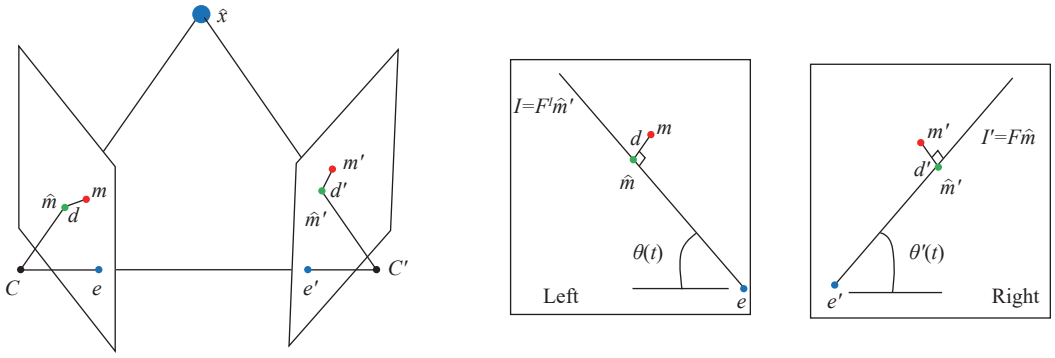


图 7 极线几何距离误差示意图

Fig. 7 Schematic diagram of geometric distance error of polar lines

三维点X在左右图像上的投影点对为$m \leftrightarrow m'$，但是$m \leftrightarrow m'$并不是在极线上的最佳匹配点，最佳的匹配点为$\hat{m} \leftrightarrow \hat{m}'$，并且满足$\hat{m}' F \hat{m} = 0$的约束。因此根据测量值$m \leftrightarrow m'$如何计算得到最佳匹配点对$\hat{m} \leftrightarrow \hat{m}'$是本文算法的关键。为了计算出最佳匹配点，构造了一个基于极线距离最小的几何估计，设$I \leftrightarrow I'$是双目图像上的一个极线对，则点对$m \leftrightarrow m'$到极线的距离为：

$$\begin{cases} D(m, I) = MIN_{x \in I} D(m, x) = D(m, m_{\perp}(I)) \\ D(m', I') = MIN_{x \in I'} D(m', x') = D(m, m'_{\perp}(I')) \end{cases}, \tag{21}$$

其中$m_{\perp}(I)$，$m'_{\perp}(I')$表示点到极线的垂足。显然初始匹配点$m \leftrightarrow m'$在极线垂足上的匹配点$\hat{m} \leftrightarrow \hat{m}'$是精确的匹配点，因此问题转化为求极线几何距离最小化对应的匹配点$\hat{m} \leftrightarrow \hat{m}'$。最小化函数为：

$$\min f(t) = \min_t (D^2(m, I(t)) + D^2(m', I'(t))) \quad . \tag{22}$$

根据公式 (22) 知，最小化参数t是式 (23) 的解，即：

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} = 0 \quad . \tag{23}$$

由于$I \leftrightarrow I'$表示的极线方程，因此设$I(I_1, I_2, I_3)$，$I'(I_1', I_2', I_3')$以及$\hat{I}(I_1, I_2)$，$\hat{I}'(I_1', I_2')$，则有：

$$f(t) = (\boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I})^2 / \hat{\boldsymbol{I}}^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}} + (\boldsymbol{m}'^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}')^2 / \hat{\boldsymbol{I}}'^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}}' \quad , \tag{24}$$

通过导数计算可得：

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} = 2 \left\{ \frac{(\boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}) \left[\boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{I}}{\partial t} (\hat{\boldsymbol{I}}^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}}) - (\boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}) \frac{\partial (\hat{\boldsymbol{I}}^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}})}{\partial t} \right]}{(\hat{\boldsymbol{I}}^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}})^2} + \frac{(\boldsymbol{m}'^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}') \left[\boldsymbol{m}'^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{I}'}{\partial t} (\hat{\boldsymbol{I}}'^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}}') - (\boldsymbol{m}'^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}') \frac{\partial (\hat{\boldsymbol{I}}'^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}}')}{\partial t} \right]}{(\hat{\boldsymbol{I}}'^{\mathrm{T}} \hat{\boldsymbol{I}}')^2} \right\} \quad . \tag{25}$$

为了能方便求解上述方程，先将两幅图像的中心分别移到测量点，此时$m \leftrightarrow m'$都变为齐次坐标$m = (0, 0, 1)$，$m' = (0, 0, 1)$，两个极点为$e = (1, 0, f)$，$e' = (1, 0, f')$。

由于$\boldsymbol{F}(1, 0, f)^{\mathrm{T}} = (1, 0, f')\boldsymbol{F} = 0$，则定义基本矩阵的特殊形式为：

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} ff'd & -fc & -f'd \\ -fd & a & b \\ -fd & c & d \end{bmatrix} \quad . \tag{26}$$

考虑左图像上一个通过点$(0, t, 1)$和极点$(1, 0, f)$

的极线, 设这条极线为$I(t)$, 这条极线的向量用叉积$(0,t,1)\times(1,0,f)=(tf,1,-t)$表示, 所以原点到这条极线的距离为:

$$D(m,I(t))^2=t^2/[1+(tf)^2]\quad .\tag{27}$$

根据基本矩阵 (26) 计算右图像的极线为:

$$I'(t)=F(0,t,1)^T=(-f'(ct+d),at+b,ct+d)^{\mathrm{T}}\quad ,\tag{28}$$

得到:

$$D(m',I'(t))^2=(ct+d)^2/[(at+b)^2+f'^2(ct+d)^2]\quad ,\tag{29}$$

得到总的距离平方和公式为:

$$f(t)=t^2/[1+(tf)^2]+(ct+d)^2/[(at+b)^2+f'^2(ct+d)^2].\tag{30}$$

对公式 (30) 求导得到:

$$f'(t)=\frac{2t}{(1+f^2t^2)^2}-\frac{2(ad-bc)(at+b)(ct+d)}{[(at+b)^2+f'^2(ct+d)^2]^2}\quad .\tag{31}$$

$f(t)$的极值在导数为 0 时得到, 化简式 (31) 使$f'(t)=0$可得:

$$\begin{aligned}g(t)=&t[(at+b)^2+f'^2(ct+d)^2]^2-\\&(ad-bc)(1+f^2t^2)^2(at+b)(ct+d)=0\quad .\end{aligned}\tag{32}$$

通过解公式 (32) 来确定最终的解。计算代价函数 (30) 在$g(t)$的每个根的实部值, 选择使代价函数 (30) 取最小值$t_{\min}$, 然后根据$t_{\min}$计算两条极线:

$$\begin{cases}I=(t_{\min}f,1,-t_{\min})\\I'=(-f'(ct_{\min}+d),at_{\min}+b,ct_{\min}+d)\end{cases}\quad .\tag{33}$$

利用式 (33) 计算左右极限线上最接近原点的点:

$$\begin{cases}\hat{m}_{t_{\min}}=\begin{bmatrix}-ft_{\min}^2 & t_{\min} & (ft_{\min})^2+1\end{bmatrix}\\\hat{m}'_{t_{\min}}=\begin{bmatrix}f'(ct_{\min}+d)(ct_{\min}+d)\\-(at_{\min}+b)(ct_{\min}+d)\\f'^2(ct_{\min}+d)^2+(ct_{\min}+d)^2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{34}$$

设最终优化后的点为$\hat{m}(u_l,v_l,1),\hat{m}'(u_r,v_r,1)$, 则根据公式 (34) 计算得到的最新点是在归一化齐次坐标下的点, 需要将其转化到原始图像上, 即;

$$\hat{\boldsymbol{m}}=\begin{bmatrix}1&0&-u_l\\0&1&-v_l\\0&0&1\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}e_1&e_2&0\\-e_2&e_1&0\\0&0&1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{m}}_{t_{\min}}^{\mathrm{T}},\tag{35}$$

$$\hat{\boldsymbol{m}}'=\begin{bmatrix}1&0&-u_r\\0&1&-v_r\\0&0&1\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}e'_1&e'_2&0\\-e'_2&e'_1&0\\0&0&1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{m}}_{t_{\min}}'^{\mathrm{T}},\tag{36}$$

其中$e=(e_1,e_2,e_3),e'=(e'_1,e'_2,e'_3)$为左右图像的极点。

根据公式 (35) 和公式 (36) 可以得到初匹配点对$m\leftrightarrow m'$的一个新的近似估计匹配点$\hat{m}\leftrightarrow\hat{m}'$, 并且最终的精确匹配点的计算只与基础矩阵有关, 从而可以在获得更精确的匹配点的同时降低复杂度。

精确计算出匹配点后, 可依据双目视觉重建原理实现对激光点的三维重建。设左右相机的精确匹配点为$\hat{m}(u_l,v_l,1)$和$\hat{m}'(u_r,v_r,1)$, 相机矩阵为$\boldsymbol{P},\boldsymbol{P}'$。

$$\lambda_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{P}\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix},\ \lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{P}'\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}.\tag{37}$$

两个匹配点的反射线在世界坐标系中的方程为:

$$\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b}\quad ,\tag{38}$$

其中$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}u_1m_{31}^1-m_{11}^1&u_1m_{32}^1-m_{12}^1&u_1m_{33}^1-m_{13}^1\\v_1m_{31}^1-m_{21}^1&v_1m_{32}^1-m_{22}^1&v_1m_{33}^1-m_{23}^1\\u_2m_{31}^1-m_{11}^2&u_2m_{32}^1-m_{12}^2&u_2m_{33}^2-m_{13}^2\\v_2m_{31}^2-m_{21}^2&v_2m_{32}^2-m_{12}^2&v_2m_{33}^2-m_{23}^2\end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\end{bmatrix},\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}m_{14}^1-u_1m_{34}^1\\m_{24}^1-v_1m_{34}^1\\m_{14}^2-u_2m_{34}^2\\m_{24}^2-v_2m_{34}^2\end{bmatrix}$.

依据最小二乘原理即可得出:

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}\quad .\tag{39}$$

综上所述, 本文方法首先采用公式 (20) 来确定多线激光的初始匹配点。这一过程是通过极线约束和激光曲面约束相结合的方式实现的。为了进一步提高匹配点的精度, 运用公式 (35) 和公式 (36) 所描述的几何估方法对初始匹配点进行调整。这种方法利用极线几何关系和已知参数对初始匹配点进行精确调整, 以求得更为精确的匹配点坐标。最后, 利用公式 (39) 可以将这些精确匹配点转换为激光点的三维坐标。通过一系列严谨

且系统的操作，可以全面实现多线激光扫描数据的三维重建，进而获取物体表面的精确三维模型。

4 实 验

手持多线激光三维重建系统的硬件设备如图 8 所示。该系统主要由以下几个部分组成，两个高精度的工业相机以及与之配套的镜头；一个具备多通道功能的交叉七线激光器。此外，系统还包括两个 LED 灯用于提供充足的照明，以确保相机能够捕捉到清晰的图像。整个系统由一个硬件控制器进行统一管理，确保各个部件协同工作。在标定过程中，使用了一块反光材质的圆型标定板，如图 9 所示。其圆心之间的距离被精确设定为 15 mm，这样的设计有助于提高标定精度和可靠性。通过这块标定板系统能够更准确地校准相机和激光器的参数，从而确保三维重建的准确性。

图 8 手持多线激光硬件

Fig. 8 Handheld multi-line laser hardware

激光器和相机的具体参数如表 1 所示。这些参数包括激光器的功率、波长、相机的分辨率、帧率等。在硬件配置方面该系统采用了性能卓越的英特尔酷睿 i9-7400 处理器，其能够快速处理大量的三维数据。此外，系统还配备了 32 GB 的内存，以及 NVIDIA RTX3070 显卡。

在对多线激光进行标定的同时采集标定板图像和激光图像，如图 10 所示。每个标定位置采集一张标定板图和两张多线激光图像，采集 5 组以上的数据进行多线激光标定。提取激光中心点后进行激光线的分类操作，如图 11(彩图见期刊电子版) 所示。最后，根据公式 (10) 标定出所有多线激光的曲面方程参数，左斜七线激光的曲面参数如表 2 所示。

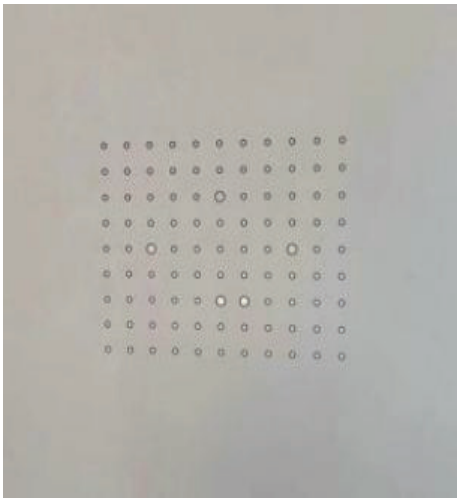


图 9 反光标定板

Fig. 9 Reflective calibration plate

表 1 手持多线激光硬件参数

Tab. 1 Parameters of the handheld multi-line laser hardware

多线激光		相机	
波长(nm)	450	分辨率	1 280×1 024
交叉角度	120	焦距	12 mm
通道数	2	角度	120
投射范围		300~400 mm	
投诉距离		400 mm	

完成多线激光标定后，利用几何估计方法可重建多线激光的三维坐标。首先检测左右图像中激光线中心点的二维坐标。选定左图像中一个激光点坐标，利用双目极线约束在右图像中找到所有的初始匹配点，此时左图像点对应的匹配点为一对多情况，如图 12(彩图见期刊电子版) 所示左图像上一个激光点坐标在右图上的匹配情况，根据极线约束在右图极线上找到了 5 个匹配点。然后使用激光曲面方程的约束关系，以及标定参数和公式 (19)，计算左图像的一个激光点对应的多个激光曲面方程上的三维点；将这些三维点转换到右相机坐标系，再反投影到右相机上得到 7 个反投影图像点。最后使用公式 (20) 计算最小像素距离从而确定初始匹配点，如图 12 所示第三个点为最佳的初始匹配点，此方法适用于所有激光点的初匹配。

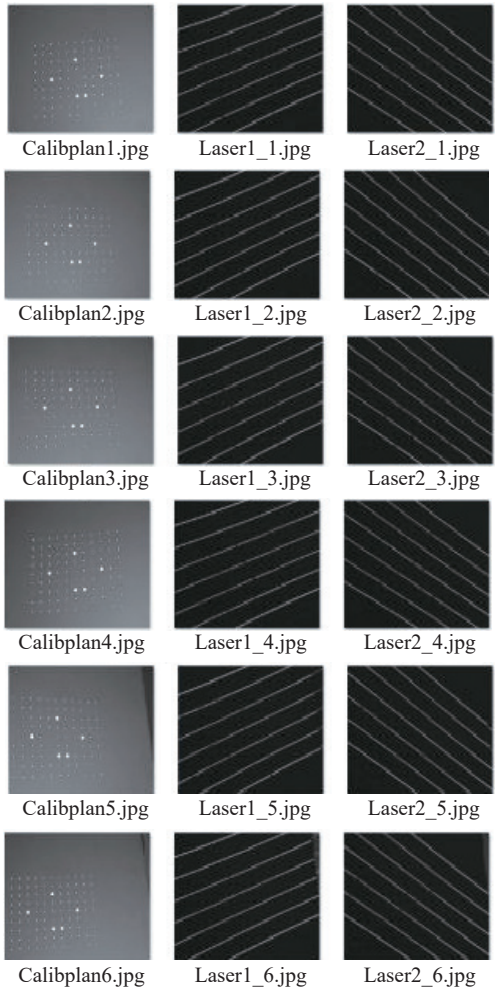


图 10　多线激光曲面方程标定采集

Fig. 10　Calibration and acquisition of multi-line laser surface equation

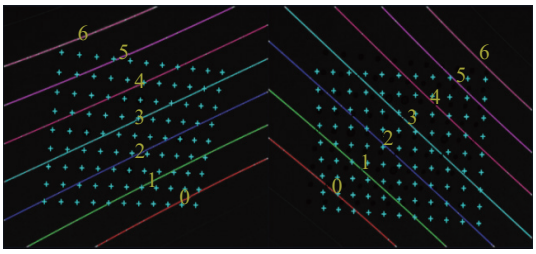


图 11　多线激光中心提取与分类

Fig. 11　Extraction and classification of multi-line laser center

在完成多线激光的初步匹配之后, 根据公式 (35) 和公式 (36) 采用基于几何估计优化的方法对初匹配点进行优化处理, 从而得到更精确的匹配点。如图 13 所示重建的效果, 图 13(b) 展示了特定区域的某段激光优化前的重建效果, 图 13(c) 为优化后的重建效果, 可以看出采用基于几何估计优化之后的点云更加平滑、没有跳动情况。表 3 显示的是随机选取的 5 组匹配点在优化前后的坐标和到极线的距离, 可以看出优化之后的图像点更加接近极线。

表 2　左斜七线激光的激光线拟合的二次曲面参数

Tab. 2　Parameters of quadric surface by laser lines fitting

$$f(x,y)=a_0x^2+a_1y^2+a_2xy+a_3x+a_4y+a_5$$

序号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	−0.043 55	−0.176 52	−0.168 47	−4 532.34	−846.79	3 523.582 4
2	1.104 494	5.582 00	4.952 49	−323.814	−730.008	2 189.032 2
3	0.018 882	0.102 88	0.086 28	−9.978 31	−23.655 6	1 133.342 5
4	−0.001 24	−0.010 61	−0.006 90	−3.257 50	−8.056 48	502.280 98
5	−0.000 03	−0.002 79	0.000 062	−2.122 23	−5.616 80	332.880 23
6	0.000 487	0.001 00	0.003 433	−1.360 85	−4.005 20	251.743 69
7	0.000 148	−0.000 15	0.002 501	−0.966 19	−3.228 64	200.972 73

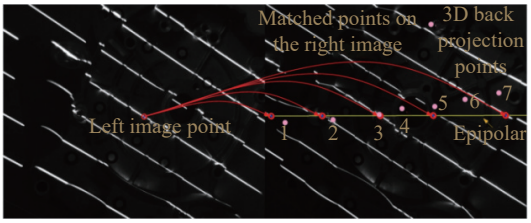


图 12　激光点匹配与反投影

Fig. 12　Laser point matching and back-projection

为了更精确的验证基于几何估计算法的优越性, 采用标准球测试优化前后的点云精度, 球心标准距离为 60.002 mm。通过多线激光系统采集图像并重建点云数据, 分别用原始匹配和几何估计优化方法进行三维重建。如图 14 所示的点云结果, 可以看出几何估计优化方法得到的点云更平滑有序, 而原始匹配方法的点云噪声较大。同时统计了 5 组优化前后的标准球心距离, 如表 4 所示, 可以看出优化之前的球心距离误差误差在 0.302 9 mm, 优化之后的球心距离误差提高了到 0.024 1 mm。

此外还进行了物体的整体重建数据测试, 如图 15 所示, 图中展示了优化前后的点云效果。通过对比可以明显看出, 本文所提出的基于几何估计的优化方法在恢复激光点云数据方面具有更高的精确度。具体来说优化前的点云数据可能存在一些模糊和不准确的地方, 而经过本文方法优化后的点云数据则显得更加清晰和精确。这种改进

不仅提高了数据的质量，还为后续的处理和分析提供了更为可靠的基础。通过这种方法可以更好地捕捉物体的细节特征，从而在三维重建、虚拟现实和其他相关领域中发挥更大的作用。

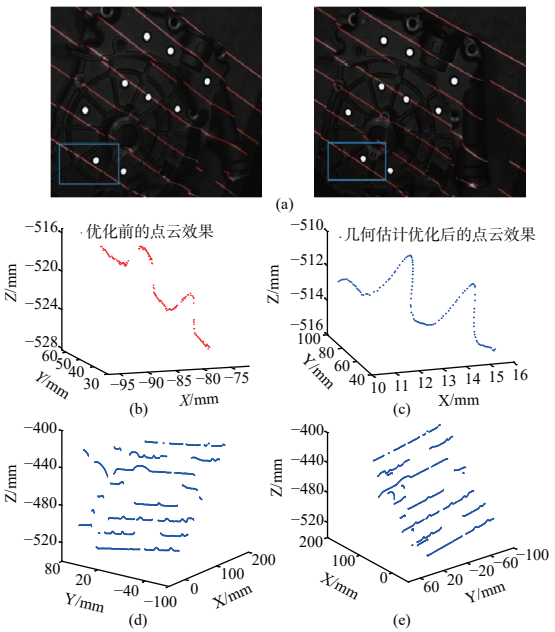


图 13 基于几何估计优化前后的点云效果对比结果。(a) 左右多线激光提取效果和框选的区域；(b) 框选区域优化前的点云效果；(c) 框选区域几何估计优化后的点云效果；(d)(e) 几何估计优化后的整体点云重建效果

Fig. 13 Comparison of point cloud effect before and after optimization based on geometric estimation. (a) Left and right multi-line laser extraction effect and box selection area; (b) the point cloud effect of box selection area before optimization; (c) geometrically estimated point cloud effect after optimization; (d) and (e) overall point cloud reconstruction effect after geometric estimation optimization

表 3 图像点到极线的距离

Tab. 3 The distance from image points to epipolars

初始匹配点	优化后点	极线距离/像素	
		优化前	优化后
[433.768 ,200.620] [429.553 ,226.722]	[432.983 ,200.125] [428.876 ,226.360]	0.28	0.064
[477.079,411.815] [464.988,426.827]	[476.825,411.129] [464.167,426.114]	0.41	0.055
[434.472,201.047] [430.743,227.391]	[434.018,200.538] [430.003,226.994]	0.37	0.089
[477.767,412.273] [465.754,427.245]	[477.380,411.992] [465.104,426.833]	0.28	0.051
[733.345,200.354] [687.059,204.529]	[732.914,200.019] [686.653,204.178]	0.32	0.0643

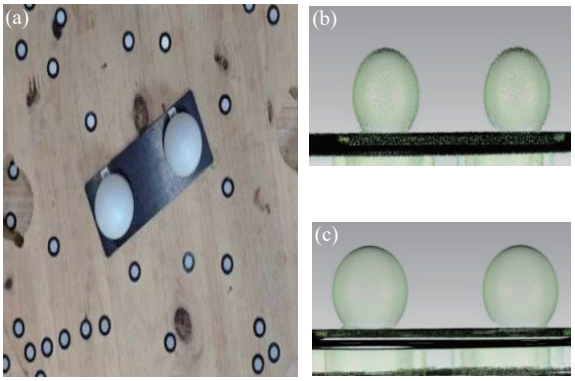


图 14 标准球重建结果。(a) 标准球实物；(b) 初始匹配重建的点云效果；(c) 几何估计优化之后的点云效果

Fig. 14 Reconstruction result of standard ball.(a) Standard ball physical object; (b) point cloud effect of original match reconstruction; (c) geometrically estimated point cloud effect after optimization

表 4 算法优化前后的球心距和误差

Tab. 4 The center distance and error before and after optimization by the proposed algorithm

序号	优化前标准球心距离/mm	优化后标准球心距离/mm
1	60.2455	60.0234
2	60.2570	60.0229
3	60.3084	60.0301
4	60.3123	60.0214
5	60.4015	60.0325
平均误差	0.3029	0.0241

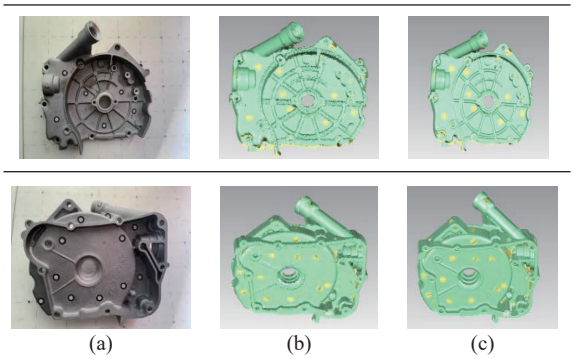


图 15 实物三维重建结果对比。(a) 被测物体；(b) 优化前点云效果；(c) 优化后点云效果

Fig. 15 Comparison of 3D reconstruction results. (a) Test object; point cloud effects (b) before and (c) after optimization

5 结 论

在手持多线激光三维重建过程中，提出一种

新颖的几何估计优化方法，旨在解决多线激光三维重建过程中左右激光图像点的不精确匹配问题。这种方法的核心是基于几何距离最小化原则，通过精确计算图像点到相机极线的距离，从而有效减少激光线噪声对匹配结果的影响。具体来说，该方法通过对激光图像中的点到极线距离进行几何距离的最小化计算，实现更准确和稳定的匹配效果。为了验证该方法的有效性，本文进行了大量的实验。实验结果表明该方法能够显著提升匹配精度和稳定性，从而进一步提高三维重建的整体效果。通过对比实验可以看到与传统方法相比，本文提出的方法在多线激光图像精确匹配方面具有明显优势。从标准球的精度验证结果可以看出优化之后可以获得 0.024 1 的平均精度。与其他物体的整体扫描效果相比，本文方法在物体细节和数据平滑方面可以获得更好的效果。实验结果显示了该方法的优越性。未来将进一步优化算法，提高计算效率，以满足实际应用中对三维重建速度和精度的更高要求。

参考文献:

[1] 许新傲, 李艺璇, 钱佳铭, 等. 基于全局优化的实时高精度模型重建[J]. 液晶与显示, 2023, 38(6): 748-758.
XU X A, LI Y X, QIAN J M, *et al*.. Real-time high-precision model reconstruction based on global optimization[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(6): 748-758.

[2] LI W G, HOU D M, LUO Z X. Clustering of divergent multi-line structured light stripes based on structural constraint[J]. *Optik*, 2022, 265: 169178.

[3] ZHANG J, SUN J, ZHANG Z. Identifying multiple line-structured lights from images via a local-to-global graph representation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15611-15624.

[4] CUI X ZH, ZHOU X L, LOU J J, *et al*.. Measurement method of asphalt pavement mean texture depth based on multi-line laser and binocular vision[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(5): 459-471.

[5] SUN Q C, REN Z M, ZHU J L, *et al*.. A three-dimensional structured light vision system by using a combination of single-line and three-line lasers[J]. *Sensors*, 2023, 23(1): 13.

[6] CUI B, TAO W, ZHAO H. High-precision 3D reconstruction for small-to-medium-sized objects utilizing line-structured light scanning: a review[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4457.

[7] WAN M S, ZHENG R H, WANG S D, *et al*.. Efficient 3D scanning measurement system based on asymmetric trinocular vision and a multi-line laser[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(8): 2145-2153.

[8] PING Y S, LIU Y K. A calibration method for line-structured light system by using sinusoidal fringes and homography matrix[J]. *Optik*, 2022, 261: 169192.

[9] CAO Y, FENG Y, CHEN Y J, *et al*.. A method of 3D scene reconstruction with vehicle-borne laser scanner based on monocular visual positioning[C]. *Proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Laser Sensing and Imaging; and Biological and Medical Applications of Photonics Sensing and Imaging*, SPIE, 2011, doi: 10.1117/12.900981.

[10] JIAN X, CHEN X, HE W P, *et al*.. Outdoor 3D reconstruction method based on multi-line laser and binocular vision[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 9554-9559.

[11] OESAU S, LAFARGE F, ALLIEZ P. Indoor scene reconstruction using feature sensitive primitive extraction and graph-cut[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 90: 68-82.

[12] KWOCZYŃSKA B, MAŁYSA B. Integration of data obtained from laser scanning and UAV used to develop a 3D model of the building object[J]. *Archives of Civil Engineering*, 2022, 68(4): 311-330.

[13] ZHANG CH B, CUI H H, YIN W, *et al*.. A robust real-time laser measurement method based on noncoding parallel multi-line[C]. *Proceedings of Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IV*, SPIE, 2016: 1002321.

[14] CHIANG P J, LIN C H. Active stereo vision system with rotated structured light patterns and two-step denoising process for improved spatial resolution[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 152: 106958.

[15] 杨洪涛, 刘士萍, 刘月琪, 等. 线扫描齿轮测量机转台基准轴标定方法[J]. 应用激光, 2024, 44(3): 115.
YANG H T, LIU S P, LIU Y Q, *et al*.. A calibration method for rotary table reference axis of line scan gear measuring machine[J]. *Applied Laser*, 2024, 44(3): 115. (in Chinese).

[16] 袁小翠, 王咏涛, 刘宝玲, 等. 基于 3D 线激光传感器的轨道弹条扣件结构缺陷检测方法[J]. 红外与激光工程,

2024, 53(7): 20240176.
YUAN X C, WANG Y T, LIU B L, *et al*.. Detection method for structural defects of railway clip fastener based on 3D line laser sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(7): 20240176. (in Chinese).

[17] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
HAN J J, ZHOU J P, XUE R L, *et al*.. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402010. (in Chinese).

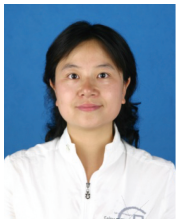
[18] HUANG H M, LIU G H, XIAO C J, *et al*.. Spatial quadric calibration method for multi-line laser based on diffractive optical element[J]. *AIP Advances*, 2024, 14: 035017.

[19] 李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304002.
LI W M, PENG G, GAO X Y, *et al*.. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304002. (in Chinese).

[20] 蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.
CAI H Y, FENG ZH D, HUANG ZH H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308006. (in Chinese).

作者简介：

黄会明(1984—)，男，安徽安庆人，博士研究生，主要从事三维重建方面的研究。E-mail: 372813807@qq.com



刘桂华(1972—)，女，博士，教授，博士生导师，2012 年于西南交通大学获得博士学位，主要研究方向包括计算机视觉、图像处理、基于 FPGA 的集成电路设计等。E-mail: liughua_swit@163.com