

杨其望,张慧,刘江涛,等. 双目结构光目标三维重建方法研究[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(5): 121-128. doi: 10.12052/gdutxb.240106.
Yang Qiwan, Zhang Hui, Liu Jiangtao, et al. Research on target 3D reconstruction technology based on binocular structured light[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2025, 42(5): 121-128. doi: 10.12052/gdutxb.240106.

双目结构光目标三维重建方法研究

杨其望, 张 慧, 刘江涛, 王钦若

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对双目结构光三维重建在左右图像的立体匹配过程中匹配基源选取不当造成的重建精度低等问题, 提出一种基于绝对相位的匹配方法, 从而降低误匹配率, 提高重建精度。首先, 在相移法与多频外差法求解的绝对相位基础上, 利用极线约束对左右图像像素点采用全局搜索与局部搜索创建搜索匹配区域; 然后对搜索区域进行3次样条插值实现亚像素立体匹配; 最后利用三角测距原理完成匹配点二维坐标到三维坐标的转换, 实现对目标表面的三维重建。实验结果表明: 本文提出的方法较绝对误差和(Sum of Absolute Differences, SAD)与误差平方和(Sum of Squared Differences, SSD)匹配算法在匹配耗时上缩短了87.77%, 在重建精度上分别提高了77.75%和90%, 具有较强的通用性和实用性。同时三维重建后的点云无水波纹现象, 表面平整光滑更接近实物。

关键词: 双目结构光; 三维重建; 多频外差; 绝对相位; 立体匹配

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2025)05-0121-08

Research on Target 3D Reconstruction Technology Based on Binocular Structured Light

Yang Qiwan, Zhang Hui, Liu Jiangtao, Wang Qinruo

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming to address low reconstruction accuracy caused by improper selection of matching source in the stereo matching process of left and right images in binocular structured light 3D reconstruction, a matching method based on absolute phase is proposed to reduce the mismatch rate and improve the reconstruction accuracy. Firstly, based on the absolute phase solved by phase shift method and multi-frequency heterodyne method, the polar line constraint is used to create a search matching area by global search and local search for the pixels of the left and right images. Then, cubic spline interpolation is performed on the search area to achieve sub-pixel stereo matching. Finally, the triangulation principle is used to complete the conversion of the two-dimensional coordinates of the matching points to three-dimensional coordinates, and the three-dimensional reconstruction of the target surface is realized. The experimental results show that the method proposed reduces the matching time by 87.77% compared to SAD(Sum of Absolute Differences) and SSD(Sum of Squared Differences) matching algorithms, and improves the reconstruction accuracy by 77.75% and 90%, respectively, demonstrating its strong generality and practicality. Particularly, the point cloud reconstructed in 3D has no water ripple phenomenon, and the surface is smoother and closer to the actual object.

Key words: binocular structured light; three-dimensional reconstruction; multi-frequency heterodyne; absolute phase; stereo matching

双目结构光三维重建是通过二维投影恢复三维形态特征的计算机技术^[1], 通过将特定编码图案投射到被测物体表面上, 捕捉物体表面的几何形状信息,

对左右图像进行立体匹配, 计算物体的深度信息, 最终获得物体的三维模型^[2]。该技术能够真实反映目标表面形态, 被广泛应用于人机交互、工业测量、逆向

收稿日期: 2024-09-09 录用日期: 2024-12-16 网络首发日期: 2025-06-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0701180001)

作者简介: 杨其望(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为双目视觉, E-mail: yangqiwan0222@163.com

通信作者: 张慧(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为时滞系统优化控制、电机控制系统、柔性系统控制、深度学习、图像处理, E-mail: zh2008@gdut.edu.cn

工程、文物保护等领域^[3]。

在双目结构光三维重建中,首先需要对光栅投影的相位进行解包裹,即相位展开^[4]。相位展开算法主要分为空域和时域两大类^[5]。空域相位展开依赖空间相邻像素的相位值恢复绝对相位,但要求物体表面无大沟壑和断层,实用性有限;时域相位展开则对每个像素点的相位值独立计算,能有效避免误差累积^[6]。常用的时域方法包括格雷码和多频外差法。格雷码法虽准确但操作复杂且易出现周期错位;多频外差法则需投影条纹数较少,且无周期错位现象^[7]。相位展开后的第二步是对左右图像进行立体匹配,匹配方法的选择对重建精度至关重要。

近年来众多学者开展了对结构光三维重建技术的研究。雷经发等^[8]针对绝对相位中存在跳跃性误差的问题,提出一种改进的双频外差法,该算法将绝对相位的小数部分与相位主值做差,通过差值与阈值比较来校正相位周期,但存在投影条纹过粗以及测量范围狭窄等问题。谷倩倩等^[9]提出了一种基于双频外差和相移法的结构光成像包裹相位解调算法。双频外差法虽然减少了投影条纹的数量,但在一些具有高频细节的表面上可能会出现重建误差。郭进等^[10]提出了一种基于多频外差相移结构光的三维测量方法,通过设计多频率的结构光图案以及外差处理技术,克服传统单一频率结构光测量的局限性,并减少了相移误差的影响。但该方法需要投影6种不同频率光栅图案,需要采集的图像太多。吴福培等^[11]提出了基于条纹结构光特征提取的三维重建方法,通过调制光强固定数值,利用相机与结构光标定结果实现印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)表面元器件形貌三维重建,但该方法对于PCB表面元器件反射率变化大的情况,易导致条纹图案质量下降,降低三维重建精度。张蕾等^[12]在双目结构光立体匹配过程中通过改进传统特征匹配算法,实现阶梯块的三维重建,但该方法对目标物体特征情况存在较多依赖,且传统特征检测算法存在许多不确定性,不具普适性。Yang等^[13]提出了一种基于双目结构光和偏振成像的新方法,但该方法需要提前对被测目标的尺寸进行测量。综上所述,双频外差技术虽在减少相位跳跃性误差上表现出色,但受限于投影条纹粗糙且测量范围狭窄;而特征匹配方法尽管增强了复杂表面的重建能力,却依赖目标特征,且易在反射率变化大的表面上出现重建误差。

针对上述问题,本文利用相移法与三频外差法求解得到的绝对相位,提出一种基于绝对相位的匹

配方法。基于极线约束准则,对左右图像采用全局搜索与局部搜索相结合的匹配方法,找到匹配队列,并将匹配队列中的点进行三次样条插值,实现亚像素立体匹配,从而提高三维重建精度。

1 双目结构光三维重建实现过程

双目结构光三维重建流程如图1所示,在搭好的硬件平台基础上,将标定板的一角垫高并反复变换摆放位置,同步触发左右相机采集不同角度的标定板照片,共计15组以上;采用张正友标定法^[14],在matlab工具箱中选用Stereo Camera Calibrator工具完成对双目相机的标定。

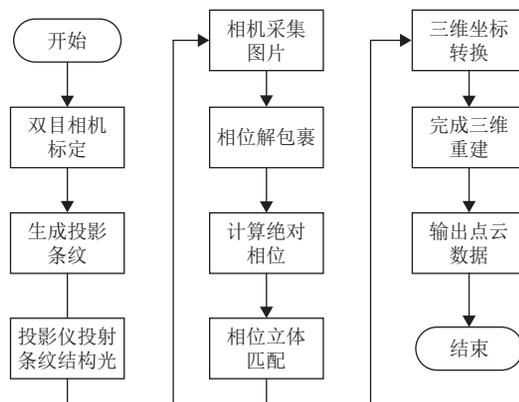


图1 双目结构光三维重建流程

Fig.1 3D reconstruction process of binocular structured light

结合双目标定结果,获取左右相机之间的旋转矩阵和平移向量,即可得两相机的相对位置关系。经立体矫正将左右成像平面调整至同一平面且行对准;由相移法和多频外差求解相位主值,因其具有唯一性,加上极线约束准则,保证相位匹配准确性;再利用三角测量原理,将二维坐标转换为三维坐标,实现匹配点的三维重建。

1.1 相位解包裹技术

1.1.1 相移法基本原理

在基于结构光三维重建系统中,编码图案设计是影响重建效果的关键因素之一。投射编码图案最重要的意义在于为每个像素点设置一个对应的编码值,从而建立相机、投影仪与目标物体对应点的三角关系,最终求解出物体的三维坐标。

在结构光技术中,经常投影 N 步相移条纹^[15]来主动标记区域, N 步相移条纹生成公式如式(1)所示。

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_n] \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

式中, $I_n(x,y)$ 为第 n 步相移条纹图像的强度值; $A(x,y)$ 为背景光强; $B(x,y)$ 为被测物体表面的反射率; $\delta_n = (2\pi n)/N$ 为相移值; $\varphi(x,y)$ 为包裹相位; N 为相移步数。

由于 $A(x,y)$ 、 $B(x,y)$ 和 $\varphi(x,y)$ 分别为3个未知数, 为了计算 $\varphi(x,y)$, 则至少需要联立3个方程, 所以相移法至少需要3幅光栅条纹图案, 即 $N \geq 3$ 。由式(1)可推导出 N 步相移的 $\varphi(x,y)$ 的通式如式(2)所示。

$$\varphi(x,y) = \arctan \frac{-\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y) \sin \delta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y) \cos \delta_n} \quad (2)$$

通过式(2)解出来的相位为包裹相位, 其值域在 $[-\pi, \pi]$ 且呈周期性变化^[16]。该相位值在单个周期内是唯一的, 但单个周期条纹无法编码全部视场, 见图2。假设投影仪分辨率为 1280×720 , 编码 x 方向, 即使选择最大条纹周期数255, 使得一个灰度编码一个条纹, 也无法做到单周期条纹编码整个视场, 需要多周期来编码整幅图像, 也就无法消除相位歧义性。

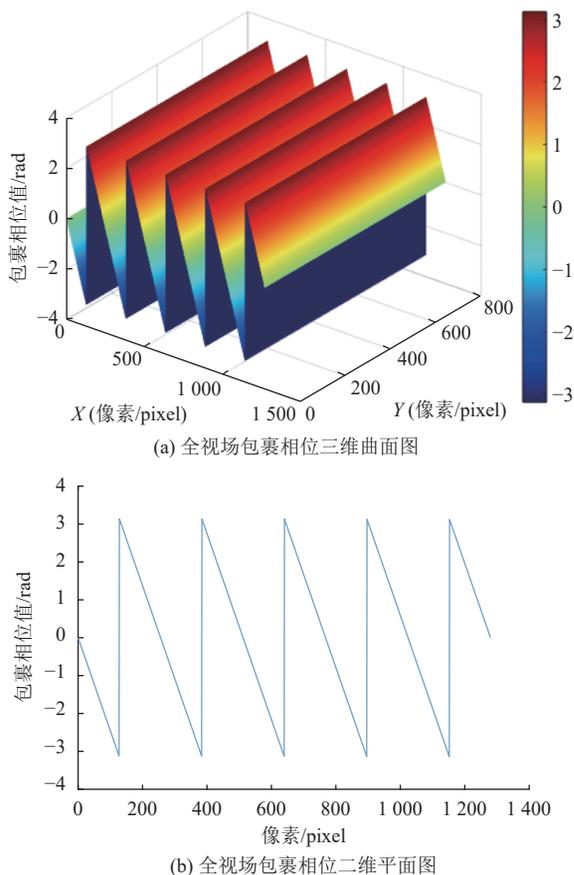


图2 单周期无法消除相位歧义性(全视场)
Fig.2 Single cycle cannot eliminate phase ambiguity (full field of view)

因此需要通过相位解包裹方法将相位展开, 从而得到全局唯一周期的绝对相位, 本文采用基于时间相位的多频外差算法来求解绝对相位。

1.1.2 相位展开算法

使用多频外差法将多个不同频率的条纹图像进行叠加, 对叠加在一起的包裹相位进行求解, 从而得到各个频率的绝对相位。不同频率的相位主值叠加原理如式(3)所示。

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (3)$$

式中, λ_1, λ_2 为两种不同的频率; λ_{12} 为包裹相位展开后绝对相位对应的频率^[17]。对不同频率的相位主值进行展开, 其计算过程如图3所示。

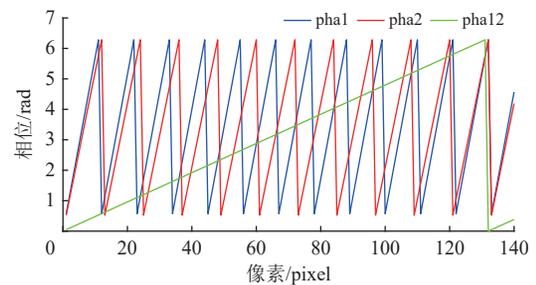


图3 叠加后的相位主值计算
Fig.3 Calculation of the phase principal value after superposition

图3中红色锯齿线和蓝色锯齿线分别表示不同频率的相位主值, 绿色锯齿线则表示相位叠加后生成新频率的相位主值。选择频率过少会导致相位主值节距过大, 降低重建精度; 而更高的频率则会减小节距, 导致采图数量增加, 从而降低重建速度。综合考虑重建精度和帧率, 本文采用3种不同周期的正弦光栅和12步相移。

在不同频率的条纹光栅中, 用 p_i 表示相位主值节距, 其值为 $p_i = 1/\lambda_i$; 用 N_{ij} 表示叠加后生成新频率 λ_{ij} 对应级数 n_{ij} 的整数部分, 小数部分用 Δn_{ij} 表示。对于绝对相位值 Φ_i 可通过式(4)进行求解。

$$\Phi_i = 2\pi \times \text{floor} \left\{ \frac{p_i \left[(N_{ij} + \alpha) + \frac{\varphi_i - \varphi_j}{2\pi} \right]}{p_i - p_j} \right\} + \varphi_i \quad (4)$$

式中, floor表示某一数值存在小数时向下取整; α 的值取决于两相位主值的大小, 若 $\varphi_i \geq \varphi_j$, 则 $\alpha = 0$, 否则 $\alpha = 1$ 。

1.2 双目立体校正

在进行绝对相位匹配以及三角法生成点云时, 要求相机光轴相互平行, 使得左右图像中的对应点

在同一条极线上,从而提高搜索效率,因此需要对相机进行立体校正。

本文使用Bouguet校正方法^[18]进行双目相机的极线校正,其中旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 均为双目相机标定得到的相机外参,具体步骤如下。

(1) 将旋转矩阵 \mathbf{R} 分解为左相机合成旋转矩阵 \mathbf{R}_1 和右相机合成旋转矩阵 \mathbf{R}_2 ,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2^{-1} = \mathbf{R} \\ \mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 将左右相机成像平面各旋转一半,之后两相机的光轴相互平行,成像平面共面。

(3) 通过平移矩阵 \mathbf{t} 构造变换矩阵 \mathbf{R}_{rect} ,使基线与成像平面平行。

(4) 将合成旋转矩阵和变换矩阵 \mathbf{R}_{rect} 整合后可获得新的双目相机旋转矩阵,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{R}'_1 = \mathbf{R}_{\text{rect}} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}'_2 = \mathbf{R}_{\text{rect}} \mathbf{R}_2 \end{cases} \quad (6)$$

通过上述步骤即可完成对左右相机的极线校正,使相机光轴相互平行且成像平面共面,校正前后对比如图4所示。

图4中, P_L 和 P_R 分别为点 P 在左右相机成像平面上的投影点, l_L 和 l_R 为极线。通过极线校正,图4(a)中

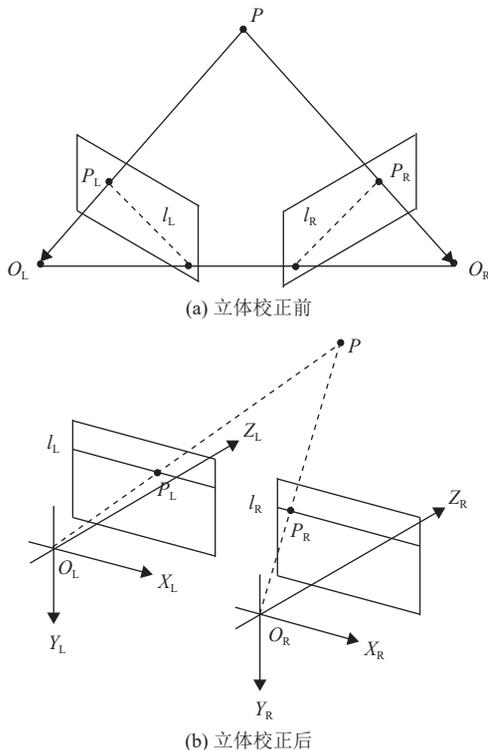


图4 立体校正前后对比

Fig.4 Comparison before and after stereo correction

的极线 l_L 、 l_R 被校正为水平,且投影点 P_L 和 P_R 位于同一行,从而使得匹配点在图像中的搜索范围从二维缩小为一维,提高匹配效率。

1.3 绝对相位匹配

在双目结构光三维重建中,解相位后的绝对相位值具有唯一性约束,能以浮点型精确计算匹配代价。绝对相位值在水平方向递增,无重复信息,从而避免了因重复或弱纹理引起的匹配困难问题。

1.3.1 SSD匹配算法

误差平方和(Sum of Squared Differences, SSD)匹配算法是一种基于块的匹配算法,该算法核心思想是通过计算参考图像和目标图像中的每一块区域的差异,找到差异最小的点,作为匹配点。算法实现流程如下。

(1) 匹配窗口选择:以相机左视图的一个中心像素为锚点定义一个窗口,并在相机右视图中搜索对应的候选窗口,比较这些窗口之间的差异。

(2) SSD计算:SSD计算的是两个窗口间的像素差值的平方和。假设左图窗口 I_L 和右图窗口 I_R ,窗口中心坐标为 (x,y) ,则SSD表达式为

$$\text{SSD}(d) = \sum_{i,j \in W} [I_L(x+i,y+j) - I_R(x+i+d,y+j)]^2 \quad (7)$$

式中, d 为视差,即平移距离。

(3) 选择最小SSD值:为了找到最佳匹配,SSD算法会在给定的视差范围内,找到使得SSD(d)最小的视差值 d^* 。该值对应的视差即为两个窗口匹配的最佳视差 $d^* = \min(\text{SSD}(d))$ 。

1.3.2 SAD匹配算法

绝对误差和(Sum of Absolute Differences, SAD)匹配算法跟SSD匹配算法类似,只不过在寻找匹配点进行相似性判断时,利用像素点灰度差值绝对值和,即SAD:

$$\text{SAD} = \sum_{i,j \in W} |I_L(x+i,y+j) - I_R(x'+i,y'+j)| \quad (8)$$

式中,点 (x,y) 表示左图像中的当前像素坐标; (x',y') 表示右图像中与左图像 (x,y) 像素匹配的候选像素坐标。

1.3.3 本文所提匹配算法

本算法通过在左图建立有效搜索框,设置非零像素平均值作为阈值,筛选右图中符合阈值的像素加入匹配队列,并通过最小方差选出最佳匹配框,再利用三次样条插值计算亚像素坐标。相比SSD算法和SAD算法,本文算法通过全局搜索和方差筛选提

升了匹配速度,并在精度上利用插值方法实现亚像素级匹配。算法实现流程如下:

(1) 如图5(a)所示,在左图中使用全局搜索方法,建立一个 $n \times n$ 的有效搜索框,使得框内的像素值全都大于0;

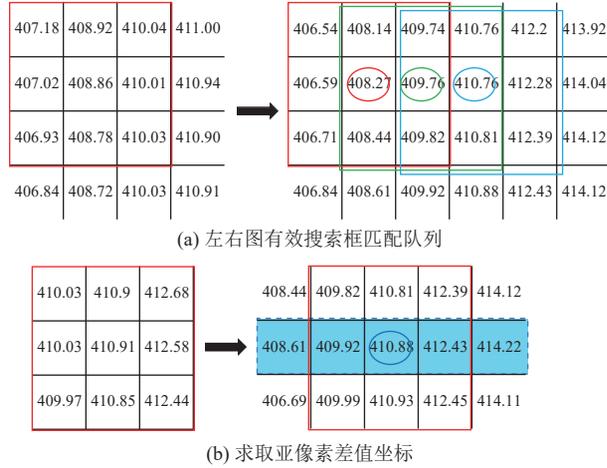


图5 绝对相位匹配流程

Fig.5 Absolute phase matching process

(2) 计算左图框内像素的平均值并将其设定为阈值,在右图中找到阈值内的像素值,并判断是否有效,若有效则加入匹配队列;

(3) 计算该行匹配队列中每个搜索框的方差,找到方差最小值并判断是否为有效方差;

(4) 找到右图的最佳匹配搜索框,并选取搜索框中心前后两个像素进行三次样条插值,求取左搜索框中心像素值在右图该行的亚像素坐标。匹配流程示意图如图5所示。

全局搜索能确保匹配范围完整覆盖,而局部搜索结合方差筛选则能在精度与效率之间实现平衡。

1.3.4 亚像素插值算法

插值算法主要基于三次样条插值,结合局部搜索来实现亚像素精度的定位。三次样条插值是一种基于局部插值的平滑插值方法。它通过在每两个数据点间构造三次多项式,保证插值函数在各个分段之间的一阶导数和二阶导数连续性,从而形成光滑的曲线。

假设样本数据为 $\{(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)\}$,三次样条插值会在每一相邻点对之间构建一个三次多项式,形式为

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (9)$$

式中, a_i, b_i, c_i, d_i 为待定系数,需满足以下条件:

(1) 插值函数在每个数据点处取值,即

$$S_i(x_i) = y_i;$$

(2) 每一段的插值函数在端点之间连续,即

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1});$$

(3) 插值函数的一阶、二阶导数在段的端点处连续。

通过上述条件,可以求解出各段的系数,从而完成样本点之间的插值。对于插值后的坐标需对其进行范围检查,若不在有效数据范围内,则改用线性插值算法。

线性插值基于其计算速度的快速性,适合用在无法保证数据完整性的场景下。基于标准差的最佳匹配点是本算法的核心步骤之一,其理论基础是最小方差原理。该方法假设:当两个区域(如模板区域BOX_L和候选区域BOX_R_temp)的灰度值或相位分布越相似时,它们的标准差越小,因此标准差最小的位置可视为最佳匹配点的位置。

综上所述,亚像素插值算法兼具了样条插值的高精度和标准差最小匹配的可靠性,因此在亚像素级匹配上能够有效提升图像重建的精确性。同时在平滑性与高精度上具有优势,使得匹配点云更加接近实物表面,提高三维重建的精度。

1.4 三角测量

立体校正后,假设空间中一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$,其在左右相机成像平面上的投影点分别为 $P_1(u_L, v_L)$ 、 $P_2(u_R, v_R)$,那么在左右相机光轴相互平行的情况下,两点在相机坐标系中的 Y, Z 值应该相同。在相机坐标系中,假设上述两点坐标为 (X_L, Y_L, Z_L) 和 (X_R, Y_R, Z_R) ,且以左相机坐标系为基准,将其与世界坐标系重合,则 $X_w = X_L, Y_w = Y_L, Z_w = Z_L = Z_R$ 。由于已完成极线校正,所以 $v_L = v_R$,由此可得:

$$\begin{cases} u_L - u_0 = f_x \frac{X_L}{Z_L} \\ v_L - v_0 = f_y \frac{X_R}{Z_R} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_R - u_0 = f_x \frac{X_L - B}{Z_L} \\ v_R - v_0 = f_y \frac{X_R}{Z_R} \end{cases} \quad (11)$$

联立式(10)和式(11)可得:

$$\begin{cases} X_w = X_L = \frac{B(u_L - u_0)}{u_L - u_R} = \frac{B(u_L - u_0)}{d} \\ Y_w = Y_L = \frac{Bf_x(v_L - v_0)}{f_y(u_L - u_R)} = \frac{Bf_x(v_L - v_0)}{f_y d} \\ Z_w = Z_L = \frac{Bf_x}{u_L - u_R} = \frac{Bf_x}{d} \end{cases} \quad (12)$$

式中： f_x 和 f_y 分别为相机在 u 、 v 轴上的有效焦距， (u_0, v_0) 为主点坐标， B 为相机的基线长度。

2 实验结果及讨论

实验搭建的结构光三维重建平台是由结构光投影仪(分辨率为1 280×720)，2台分辨率为130万像素的PointGrey工业相机搭配可调焦镜头组成，如图6所示。



图6 双目结构光硬件系统

Fig.6 Hardware system of binocular structured light

使用matlab里面的Stereo Camera Calibrator工具箱对双目相机进行标定，得到左右相机的内参矩阵、

畸变系数以及两相机之间的旋转矩阵和平移向量，结果如表1和表2所示。

表1 左右相机内参系数

Table 1 Left and right camera internal parameter coefficients

| 相机 | 内参矩阵 | 径向畸变系数 | 切向畸变系数 |
|----|---|----------|-----------------------|
| 左 | $\begin{bmatrix} 2\,564.443 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 2\,565.690 & 0.000 \\ 626.100 & 511.460 & 1.000 \end{bmatrix}$ | -0.069 1 | -0.062 9 |
| 右 | $\begin{bmatrix} 2\,557.253 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 2\,557.350 & 0.000 \\ 639.110 & 501.290 & 1.000 \end{bmatrix}$ | -0.062 9 | -2×10 ⁻⁵ |
| | | 0.274 1 | 0.227 9 |
| | | 0.000 0 | 0.000 0 |
| | | 0.227 9 | -6.3×10 ⁻⁵ |
| | | 0.000 0 | 0.000 0 |

表2 左右相机外参系数

Table 2 Left and right camera external parameter coefficients

| 旋转矩阵 | 平移向量 |
|---|-----------|
| $\begin{bmatrix} 0.982\,8 & -0.002\,2 & -0.184\,6 \\ 0.002\,0 & 0.999\,9 & -0.001\,3 \\ 0.184\,6 & 0.000\,9 & 0.982\,8 \end{bmatrix}$ | -68.950 1 |
| | 0.248 2 |
| | 8.070 3 |

由于采用多频外差法来计算相位值，本文根据图像宽度为1 280个像素，选用3组周期分别为28、26和24的光栅条纹进行投影，解包裹相位采用12步相移法，以鼠标作为重建对象，如图7所示。

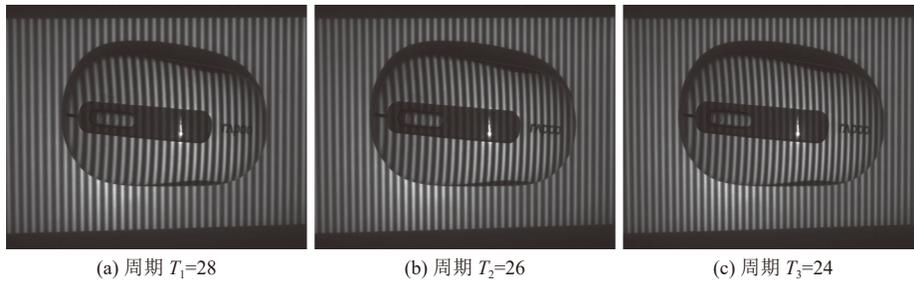


图7 不同周期光栅采集图像

Fig.7 Images collected using different periods of gratings

在第1.1节相位展开算法原理分析的基础上，使用多频外差技术对相机采集到的图片进行相位展开，结果如图8所示。

从图8可看出，基于三频外差法得到的绝对相位图显示出整体相位分布均匀，未出现明显的相位跳变或不连续现象。图中的灰度渐变清晰地反映了相位随空间位置的变化趋势，且相位值范围覆盖了整个场景，表现出合理的相位变化范围。整体过渡平滑，进一步说明了三频外差法在相位计算上的稳定性和准确性。

解相位后，对左右相机进行极线校正，同时利用

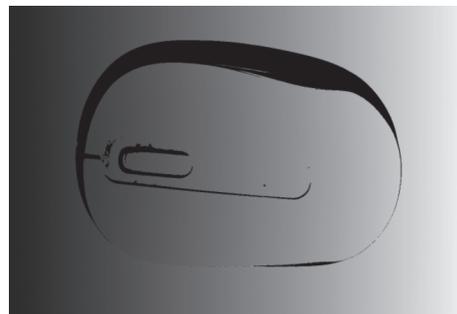


图8 多频外差解绝对相位

Fig.8 Multi-frequency heterodyne solution of absolute phase

1.3节所述相位匹配方法以及匹配点的三角测距原理,最终实现目标物体的三维重建。不同匹配算法实现的三维重建结果如图9所示。

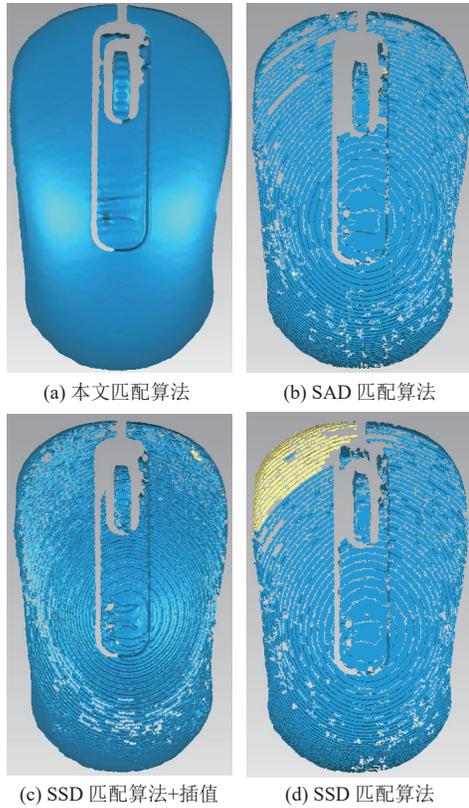


图 9 不同匹配算法三维重建结果

Fig.9 3D reconstruction results of different matching algorithms

从图9和表3可见,本文方法在输出点云质量、匹配点数和匹配耗时上均优于其他算法。本文方法匹配耗时仅38.613 s,较SAD算法和SSD算法缩短了约87.77%,较SSD+插值算法缩短了约81.88%,显著提升了效率。同时,由于亚像素匹配的视差更精细,减少了像素匹配中的视差误差,避免了点云裂缝的出现,使得重建质量更高。

表 3 匹配算法性能对比

Table 3 Performance comparison of matching algorithms

| 匹配算法 | 匹配点数 | 匹配时长/s |
|----------|---------|---------|
| 本文匹配算法 | 483 764 | 38.613 |
| SAD匹配算法 | 484 068 | 224.068 |
| SSD匹配算法 | 516 780 | 226.333 |
| SSD+插值算法 | 483 765 | 213.133 |

为了进一步验证三维重建的精度,本文对直径为40 mm的标准球面进行了三维重建实验,在Geomagic Wrap软件中对点云进行处理,球面拟合结果如图10所示。

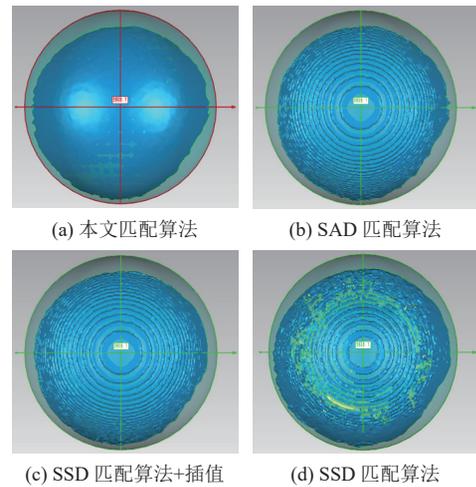


图 10 球面拟合结果

Fig.10 Spherical fitting results

最后,通过球面拟合出来的误差结果如表4所示。

表 4 球面拟合数据统计

Table 4 Statistics of spherical fitting data mm

| 匹配算法 | 标准偏差 | 形状偏差 | 拟合球直径 |
|---------|---------|---------|----------|
| 本文匹配算法 | 0.021 4 | 0.082 5 | 40.064 6 |
| SAD算法 | 0.096 2 | 0.489 5 | 40.182 7 |
| SSD匹配算法 | 0.214 3 | 0.888 9 | 39.463 2 |
| SSD+插值 | 0.507 4 | 0.098 8 | 40.155 0 |

由表4可知,本文所提方法在重建精度上明显优于其他算法。本文算法下的标准偏差为0.021 4 mm,相较于SAD算法减少了77.75%,较SSD算法减少了90%,较SSD+插值算法减少了95.78%;在形状偏差方面,本文算法与SAD和SSD算法相比,分别减少了约83.14%和90.72%;在拟合球直径与标准球直径的差异上,本文算法较SAD算法减少了64.64%,较SSD匹配算法减少了86.05%,较SSD+插值算法减少了58.32%。

3 结论

本文提出了一种基于绝对相位的匹配方法,并基于双目视觉和光栅投影测量原理,搭建了一套双目结构光三维重建平台。通过对复杂结构表面(如鼠标)和标准球面的实物测量,成功获取了高效的三维点云和模型图。在实验对比中,本文算法在匹配耗时方面较SAD匹配算法和SSD匹配算法缩短了约87.77%,显著提升了效率;在重建精度上,较SAD匹配算法提升了77.75%,较SSD匹配算法提升了90%。实验结果表明,本文算法在输出点云质量、匹配速度

和重建精度上均具有显著优势,验证了其在形貌复杂及常见物体三维重建中的高精度,具有较强的通用性和实用性。

参考文献:

- [1] 熊利郎, 潜冬, 李海珠. 基于实时性的三维重建综述[J]. 中国传媒大学学报, 2013, 20(6): 38-43.
XIONG L L, QIAN D, LI H Z. Overview of three-dimensional reconstruction based on real-time[J]. Journal of Communication University of China, 2013, 20(6): 38-43.
- [2] LIU J, TIAN P, LI H, *et al.* An improved synthesis phase unwrapping method based on three-frequency heterodyne[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9388.
- [3] 王韶格, 刘宾, 苏新彦. 基于结构光场的目标三维重建技术研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 180-185.
WANG S G, LIU B, SU X Y. Research on 3D reconstruction of target based on structured light field[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2023, 43(4): 180-185.
- [4] 王敏敏. 三维形貌相位提取算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [5] 于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍, 等. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2007(12): 2152-2157.
YU X Y, WU H B, YIN L P, *et al.* 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrumentation*, 2007(12): 2152-2157.
- [6] 吴勇辉. 结构光三维测量中相位相关技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] 李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 91-103.
LI Y, ZHANG G H, MA L H, *et al.* Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 91-103.
- [8] 雷经发, 陈志强, 张淼, 等. 双频投影条纹相位展开方法的改进[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1337-1345.
LEI J F, CHEN Z Q, ZHANG M, *et al.* Improvement of phase unwrapping method for dual-frequency projection fringe[J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1337-1345.
- [9] 谷倩倩, 吕珊珊, 姜明顺, 等. 基于双频外差和相移法的结构光成像包裹相位解调算法[J]. 仪表技术与传感器, 2020(3): 105-109.
GU Q Q, LYU S S, JIANG M S, *et al.* Wrapped phase demodulation algorithm of structured light imaging based on dual-frequency heterodyne and phase shift method[J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2020(3): 105-109.
- [10] 郭进, 陈小宁. 基于多频外差相移结构光的三维测量系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(4): 24-26.
GU J, CHEN X N. The 3D optical measurement system based on multifrequency heterodyne principle[J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2016(4): 24-26.
- [11] 吴福培, 彭俊龙, 叶玮琳, 等. 一种基于条纹相位特征的印刷电路板三维重建方法[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 152-161.
WU P F, PENG J L, YE W L, *et al.* A printed circuit board three-dimensional reconstruction method based on fringe phase characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(14): 152-161.
- [12] 张蕾, 石岩, 卢文雍, 等. 基于SURF-OKG特征匹配的三维重建技术[J]. 光学精密工程, 2024, 32(6): 915-929.
ZHANG L, SHI Y, LU W Y, *et al.* 3D reconstruction technique based on SURF-OKG feature matching[J]. *Optical Precision Engineering*, 2024, 32(6): 915-929.
- [13] YANG Y, YAN S, CHEN W, *et al.* Binocular 3D reconstruction in robotic machining process of black rubber composite combining the polarization information[C] //2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). [S.l.]: IEEE, 2022: 1216-1221.
- [14] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] 郭创为, 王阳, 邹文哲, 等. 基于多频外差原理的相位校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(5): 296-303.
GUO C W, WANG Y, ZOU W Z, *et al.* Research on phase correction method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 296-303.
- [16] 张昂, 孙亚琴, 高楠, 等. 三灰度编码相位展开方法条纹投影轮廓术[J]. 光学精密工程, 2022, 30(5): 518-526.
ZHANG A, SUN Y Q, GAO N, *et al.* Fringe projection profilometry by ternary-gray encoded phase unwrapping method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(5): 518-526.
- [17] 赵晓东, 李彤, 李翔, 等. 基于双目结构光的轨道车辆关键零部件三维重建算法研究[J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(2): 6-11.
ZHAO X D, LI T, LI X, *et al.* Research on the 3D reconstruction algorithm of key orbital vehicle components based on binocular structural light[J]. *Smart Rail Transit*, 2022, 59(2): 6-11.
- [18] LIU L, XI D D, CHENG L, *et al.* Enhanced gray-code method for three-dimensional shape measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 213-220.

(责任编辑: 王威娜 英文审核: 费伦科)