

文章编号 1004-924X(2026)10-1580-12

截距自适应搜索相位立体匹配的三维尺寸识别

马婧华*, 邓福伟, 邱俊淞, 邹政, 宋涛
(重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054)

摘要:针对基于双目结构光三维重建过程中相位立体匹配效率较低问题,提出一种基于截距自适应搜索策略的快速相位立体匹配方法。首先,依据极平面与左右相机成像平面之间的交线对极线进行描述,并介绍了极线约束原理;然后,根据右极线横截距和纵截距值的大小对右极线在右相机成像面的分布情况分四个象限进行讨论,缩小沿极线相位立体匹配范围;最后,利用单行绝对相位单调递增的性质,采用二分法匹配左右同名点,再对匹配结果进行双线性插值实现亚像素立体匹配。实验结果表明:本文所提方法对标准球重建点云的球面直径绝对误差为 0.011 mm,平面度绝对误差为 0.013 mm,在匹配耗时上,相较于 AD 算法缩短了 17.074%,相较 AD-Census 算法和 SGM 算法缩短了 91% 以上;此外,选择金属齿轮、陶瓷摆件和石英玻璃工件分别代表曲面、平面和不连续表面测量场景进行三维重建实验,并对不连续场景工件进行尺寸测量实验。上述实验证明了本方法能够快速有效地重建多场景物体,且具有较高的精度和效率。

关键词:双目结构光;三维重建;立体匹配;极线约束;相位匹配

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263410.1580 **CSTR:**32169.14.OPE.20263410.1580

Three-dimensional dimensionality identification via phase-stereo matching with an adaptive intercept search strategy

MA Jinghua*, DENG Fuwei, QIU Junsong, ZOU Zheng, SONG Tao

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: majinghua@cqut.edu.cn

Abstract: To address the low efficiency of phase-based stereo matching in binocular structured light 3D reconstruction. This paper proposed a fast phase stereo matching method based on an intercept adaptive search strategy. First, epipolar lines were described by the intersection lines between the epipolar plane and the imaging planes of the left and right cameras. Also, the principle of the epipolar constraint was introduced. Then, the horizontal intercept and vertical intercept of the right epipolar line were calculated. Based on these intercept values, the position of the right epipolar line on the right camera image plane was determined. Accordingly, the distribution of the right epipolar line was classified into four quadrants. Based on this classification, the search range for phase stereo matching along the epipolar line was effectively reduced. Furthermore, the monotonic increase of the absolute phase within a single row was exploited. Based on this property, a binary search strategy was employed to identify corresponding points be-

收稿日期:2026-03-02;修订日期:2026-04-01.

基金项目:技术创新与应用发展专项项目(No. CSTB2024TIAD-KPX0101);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(No. CSTB2023NSCQ-LZX0068)

tween the left and right images. Bilinear interpolation was then applied to achieve sub-pixel stereo matching. Experimental results demonstrate that the proposed method provides both high accuracy and high efficiency. For the reconstructed point cloud of a standard sphere, the absolute error of the sphere diameter is 0.011 mm, and the absolute flatness error is 0.013 mm. In terms of matching time, the proposed method reduces the computation time by 17.074% compared with the AD algorithm, and by more than 91% compared with the AD-Census and SGM algorithms. In addition, three-dimensional reconstruction experiments are conducted on a metal gear, a ceramic ornament, and a quartz glass workpiece. These objects represent curved, planar, and discontinuous surface measurement scenarios, respectively. A dimensional measurement experiment is also performed on the discontinuous-surface workpiece. The experimental results confirm that the proposed method can rapidly and effectively reconstruct objects in various measurement scenarios. Meanwhile, it maintains high reconstruction accuracy and computational efficiency.

Key words: binocular structured light; 3D reconstruction; stereo matching; epipolar constraint; phase matching

1 引言

双目立体视觉技术是利用两个相机同时拍摄物体来模拟双眼视觉,再通过立体匹配算法计算视差以重建物体三维模型的技术^[1]。双目立体视觉技术可分为被动视觉技术和主动视觉技术。被动视觉技术一般为基于特征匹配和基于区域匹配,多依靠被测物体自身的特征信息,在边界区域和弱纹理区域容易出现误匹配甚至难以匹配的现象^[2-3]。而主动视觉技术^[4-6],通过结构光投影仪向物体表面发射带编码图案的条纹,解码获得相位信息的图像,利用极线约束等方法对相位进行匹配,可实现高精度的三维重建。

为了获得高精度匹配结果的同时提高匹配效率,多集中对左右相机图像极线校正后,再通过不同的匹配算法进行相位匹配。王姮等^[7]通过仿射变换矩阵构建水下成像模型,实现水下-陆上图像变换,然后对图像极线校正,再采用平方差和(Sum of Squared Differences, SSD)算法搜索匹配点。陈旭佳等^[8]通过三步相移多频外差法求解绝对相位,极线校正后取左右绝对相位图中单个相位绝对差值(Absolute Difference, AD)最小的点作为匹配点完成待测物重建,最后经过多视角点云配准实现类球形水果外形测量。邢侓慧等^[9]通过互补格雷码结合四步相移法求解绝对相位,极线校正后采用绝对差值求和(Sum of Absolute Differences, SAD)算法进行相位匹配,并对非线性相位误差补偿。此外,还有部分学者

极线校正之后采用半全局立体匹配(Semi-Global Matching, SGM)方法、AD-Census匹配方法等进行相位立体匹配^[10-11]。但是极线校正提高相位匹配效率的同时会限制测量的深度范围,针对逐像素计算极线并沿极线搜索匹配计算耗时较高的问题,唐笑虎^[12]等提出一种极线近似的相位立体匹配方法,对每行像素中部分区域的对应极线进行近似,牺牲精度以提高匹配效率。也有部分学者投影横、纵光栅获取双向相位信息,最终重建得到校正后点云^[13-14],但双向条纹投影需额外投影结构光图像,导致其在相位获取环节耗时较长。综上所述,现有极线校正和极线近似方法难以在匹配精度、匹配效率之间实现有效平衡,而双向条纹投影在高精度下匹配效率明显降低。

为此,本文针对双目结构光三维重建中相位立体匹配效率较低的问题,提出一种基于截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法。本方法根据右极线在右相机成像面上横截距和纵截距的分布特性进行分区讨论,通过截距分布自适应设定阈值,缩小沿极线的搜索范围;再利用单行绝对相位值单调递增的特性,采用二分法高效匹配左右图像同名点,并基于匹配结果进行双线性插值实现亚像素级高精度和高效率的相位立体匹配。

2 双目结构光三维重建原理

双目结构光三维重建系统由左、右两台工业

相机和一台投影仪组成,首先,通过对左、右相机进行相机标定获取系统内、外参数;然后,投影仪投影条纹编码图案到待测物体表面,由左、右相机同步拍摄调制后的变形条纹图案;接着,计算包裹相位,根据不同编码方式对包裹相位展开得到绝对相位,对绝对相位图进行相位立体匹配得到视差图,最后由相机标定参数和三角法实现物体三维重建。

时间相位展开方法中,基于格雷码的相位展开方法在抗噪性能上明显优于基于多频相移的相位展开方法,且在条纹频率越高时,此优势会越来越明显。传统格雷码相位展开方法在实际使用中受噪声影响,其解码阶次边沿和包裹相位边沿没严格对齐,从而产生阶次跳变误差,在使用了互补格雷码方法后,此类误差可以被避免掉。在相移法中,相移法的步数 N 表示在一个周期内对光强进行 N 次采样, N 越大表示投射的图像越多,相位采样点越多,从而相位计算的精确度越高。综合考虑重建精度与效率,本文采用互补格雷码结合十二步相移法求解绝对相位。

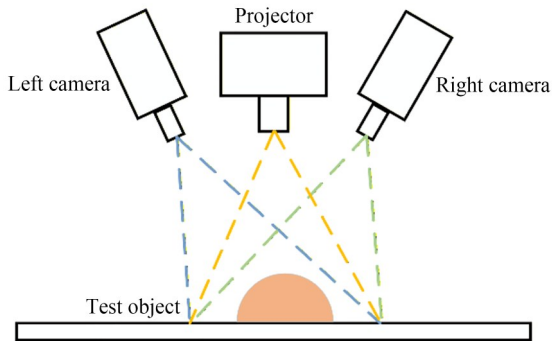


图1 双目结构光三维测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the binocular structured-light 3D measurement system

2.1 互补格雷码辅助相移法相位展开原理

N 步相移法通过投射 N 幅特定编码的正弦结构光图像来求解包裹相位^[15],计算机生成的正弦结构光图像的灰度分布式为:

$$I_i(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos\left(\varphi(x, y) - \frac{2\pi i}{N}\right), \quad (1)$$

其中: $I_i(x, y)$ 为相机采集的第 i 幅正弦条纹图,

(x, y) 为条纹图像中像素坐标系下每个像素的坐标; $A(x, y)$ 是相机采集时的背景光强度; $B(x, y)$ 是调制光强度; $\varphi(x, y)$ 是包裹相位; N 为相移步数。根据最小二乘法计算相移法的包裹相位为:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin\left(\frac{2i\pi}{N}\right)}{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos\left(\frac{2i\pi}{N}\right)}\right). \quad (2)$$

相移法计算出的包裹相位 $\varphi(x, y) \in [-\pi, \pi]$, 为了去除包裹相位的二义性,本文采用互补格雷码将包裹相位展开成绝对相位。

互补格雷码为二进制码,需要将采集到的互补格雷码图像二值化后再解码,互补格雷码在传统 M 幅格雷码的基础上,额外投影一幅移动了半个周期的互补格雷码,总共 $M+1$ 幅,前 M 幅格雷码条纹阶次为 k_1 ,全部 $M+1$ 幅格雷码条纹阶次为 k_2 , k_1 和 k_2 互相错开半个周期可以有效避免格雷码解码阶次与相移法计算得到的包裹相位在边沿解码产生的错误。可以按照公式(3)和公式(4)表示的方法得到阶次 k_1 ,再按照公式(5)和公式(6)表示的方法得到阶次 k_2 ,其中 INT 表示向前取整运算:

$$V_1(x, y) = \sum_{i=1}^M GC_i(x, y) \times 2^{(M-i)}, \quad (3)$$

$$k_1(x, y) = LUT(V_1(x, y)), \quad (4)$$

$$V_2(x, y) = \sum_{i=1}^{M+1} GC_i(x, y) \times 2^{(M+1-i)}, \quad (5)$$

$$k_2(x, y) = INT[(LUT(V_2(x, y)) + 1)/2]. \quad (6)$$

最后按照公式(7)将包裹相位展开成绝对相位 $\Phi(x, y)$:

$$\Phi(x, y) =$$

$$\begin{cases} \varphi(x, y) + 2\pi k_2(x, y), & \varphi(x, y) \leq -\pi/2 \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_1(x, y), & -\pi/2 < \varphi(x, y) < \pi/2. \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_2(x, y) - 2\pi, & \varphi(x, y) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 极线约束

对求得的左右绝对相位图像,需通过极线约束进行全局亚像素相位匹配,获得高精度三维重建结果。图2为极线约束示意图, O_L 与 O_R 为左右相机的光心,点 P 为世界坐标系下一点, p_L 为左图像 I_L 内一点, p_R 为右图像 I_R 内一点,则

$PO_L O_R$ 形成一个平面,称为极平面,该平面与左右相机成像面的交线称为极线,即图中左极线 l_L 和右极线 l_R 。三维重建中世界点 P 坐标未知,其在左相机下的投影点 p_L 已知,则其在右相机下的投影点 p_R 必然在右极线 l_R 上,这就是极线约束,可以缩小立体匹配时的搜索范围,提高匹配效率。

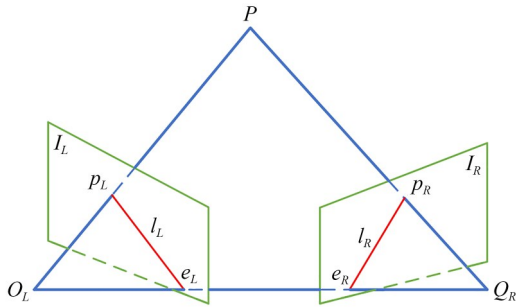


图 2 极线约束示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the epipolar constraint

极线约束可使用基础矩阵与图像齐次坐标进行描述:

$$p_R^T F p_L = 0, \quad (8)$$

其中: p_L, p_R 指对应像素点的齐次坐标, F 指基础矩阵,基础矩阵可通过相机标定获得。

$$F = K_R^{-T} \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} R K_L^{-1}, \quad (9)$$

其中: K_L 和 K_R 为左右相机内参, R 和 t 为外参旋转矩阵和平移向量。因此,若已知左图像中的某一点坐标 p_L ,其在右图像对应的极线方程 l_R 为:

$$l_R = F p_L. \quad (10)$$

也可将右极线 l_R 用直线的一般式表示为:

$$ax + by + c = 0. \quad (11)$$

3 截距自适应搜索策略的相位匹配

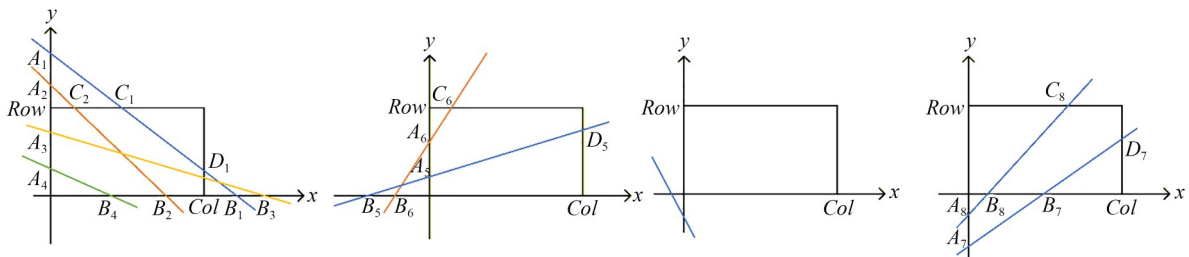
3.1 截距自适应搜索策略

传统基于极线约束的相位立体匹配方法,在左右图像同名点匹配时,需要搜索整个右图,并且极线通常是倾斜的,直接沿着极线寻找左右图像同名点,实质上是在二维空间中进行的,计算量很大,导致相位立体匹配效率较低。为此,本文提出一种基于截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法,提出的截距自适应搜索策略,首先对左相机图像中待匹配特征点 p_L ,求解其在右相机像素坐标系下的极线 l_R ;然后,根据极线 l_R 的横、纵截距特性,定量分析该极线 l_R 与右相机图像的位置关系,实现右图像同名点 p_R 搜索范围的有效缩减。如公式(11),右极线 l_R 可表示为直线的一般式,假设 l_R 在 y 轴的纵截距为 A ,在 x 轴的横截距为 B ,计算得到:

$$A = -\frac{c}{b}, \quad (12)$$

$$B = -\frac{c}{a}. \quad (13)$$

像素坐标系下,纵截距 A 与横截距 B 值的大小决定了右极线 l_R 所处象限,在四个象限中分别讨论右极线 l_R 与右成像平面的相交情况,可缩小右图像同名点 p_R 在 x 轴的搜索范围,下面根据右极线 l_R 落在不同的象限分情况进行讨论,分布情况如图 3 所示。



(a) 右极线在第一象限分布情况 (b) 右极线在第二象限分布情况 (c) 右极线在第三象限分布情况 (d) 右极线在第四象限分布情况
 (a) Distribution of right polar lines in the first quadrant (b) Distribution of right polar lines in the second quadrant (c) Distribution of right polar lines in the third quadrant (d) Distribution of right polar lines in the fourth quadrant

图 3 右极线在不同象限分布图

Fig. 3 Distribution of right epipolar lines in different quadrants

第一种情况 $\{A > 0 \& B > 0\}$, l_R 在第一象限, 四种分布, 其中 C_1 点坐标为 $((-c_1 - b_1 * Row) / a_1, Row)$, C_2 点坐标为 $((-c_2 - b_2 * Row) / a_2, Row)$, D_2 点坐标为 $(Col, (-a_1 * Col - c_1) / b_1)$, 记 x 在第一象限搜索范围的集合为 S_1 , 如公式(14)所示:

$$S_1 = \begin{cases} [(-c_1 - b_1 * Row) / a_1, Col], & \{(A_1, B_1) | Row < A_1, Col < B_1, 0 < (-a_1 * Col - c_1) / b_1 < Row\} \\ [(-c_2 - b_2 * Row) / a_2, B_2], & \{(A_2, B_2) | Row < A_2, 0 < B_2 \leq Col\} \\ [0, Col], & \{(A_3, B_3) | 0 < A_3 \leq Row, Col < B_3\} \\ [0, B_4], & \{(A_4, B_4) | 0 < A_4 \leq Row, 0 < B_4 \leq Col\} \end{cases} \quad (14)$$

第二种情况 $\{A < 0 \& B > 0\}$, l_R 在第二象限, 两种分布, D_5 点坐标为 $(Col, (-a_5 * Col - c_5) / b_5)$, C_6 点坐标为 $((-c_6 - b_6 * Row) / a_6, Row)$, 记 x 在第二象限搜索范围的集合为 S_2 , 如公式(15)所示:

$$S_2 = \begin{cases} [0, Col], & 0 < (-a_5 * Col - c_5) / b_5 < Row \\ [0, (-c_6 - b_6 * Row) / a_6], & 0 < (-c_6 - b_6 * Row) / a_6 < Col \end{cases} \quad (15)$$

第三种情况 $\{A < 0 \& B < 0\}$, l_R 在第三象限, 记 x 在第三象限搜索范围的集合为 S_3 。极线与右成像平面不存在交点, 这种情况可能存在于左右相机非公共视场区域, 左图待匹配点在右图中不存在同名点, 因此对于该情况, 其在第三象限 x 的搜索范围集合 S_3 为空集, 本文在相位立体匹配时直接

$$S_4 = \begin{cases} [B_7, Col], & 0 < (-a_7 * Col - c_7) / b_7 < Row \\ [B_8, (-c_8 - b_8 * Row) / a_8], & 0 < (-c_8 - b_8 * Row) / a_8 < Col \end{cases} \quad (16)$$

3.2 二分相位匹配方法

确定 x 搜索范围之后, 本文以相位为匹配基元采用二分法匹配左右同名点, 对于左图待匹配点, 将二分法搜索出的中间点作为其在右图的同名点。二分法匹配流程图如图 4 所示, 左图待匹配点相位值 Rad_L , 在像素坐标系下, 右图同名点横坐标的初始搜索区间为截距自适应搜索策略讨论出的区间。

首先判断左边界与右边界的绝对差值是否大于 1, 若否, 则不满足二分, 返回中间点横坐标并计算纵坐标, 完成匹配, 结束搜索; 若是, 计算中间点坐标 (x_{mid}, y_{mid}) , 并提取中间点相位值 Rad_{mid} , 若中间点坐标出现非整数, 则向下取整。接着, 若 $Rad_{mid} > 0$, 将中间点相位值 Rad_{mid} 与左图待匹配点相位值 Rad_L 做比较, 若 $Rad_{mid} > Rad_L$ 则将右边界更新为中间点横坐标, 若 $Rad_{mid} \leq Rad_L$ 则将左边界更新为中间点横坐标。若 $Rad_{mid} < 0$, 该点为噪点, 则需要在初始区间内重新搜索绝对相位大于 0 的点当作新的中间点。基于图像单行绝对相位递增性质, 先在初始区间内向右逐点搜索, 并逐个判断是否有绝对相位大

跳过该情况, 以避免无效计算, 节省匹配耗时。

第四种情况 $\{A < 0 \& B > 0\}$, l_R 在第四象限, 两种分布, D_7 点坐标为 $(Col, (-a_7 * Col - c_7) / b_7)$, C_8 点坐标为 $((-c_8 - b_8 * Row) / a_8, Row)$, 记 x 在第四象限搜索范围的集合为 S_4 , 如公式(16)所示:

$$\begin{cases} 0 < (-a_7 * Col - c_7) / b_7 < Row \\ 0 < (-c_8 - b_8 * Row) / a_8 < Col \end{cases} \quad (16)$$

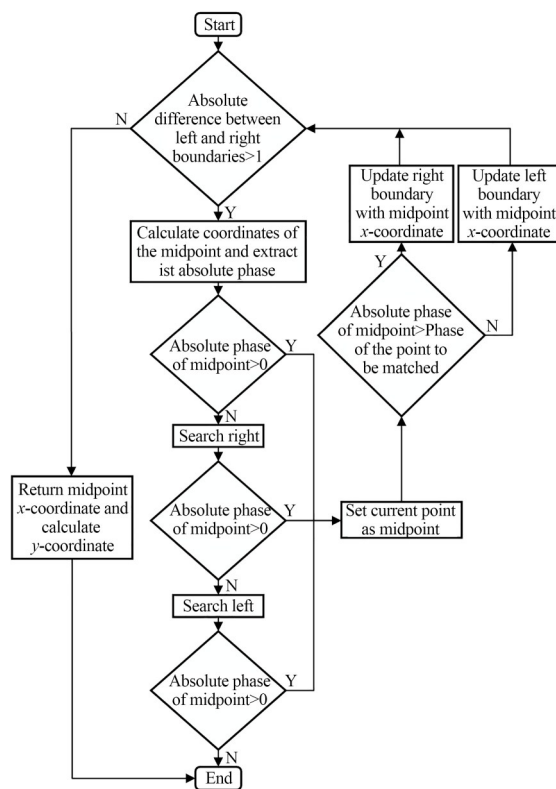


图 4 二分法相位匹配流程图
Fig. 4 Flowchart of binary phase matching

于0的点,若向右搜索存在绝对相位大于0的点,则将该点作为中间点并按照 $Rad_{mid} > 0$ 情况继续操作;若向右搜索不存在绝对相位大于0的点,则在初始区间内向左逐点搜索,并逐个判断是否有绝对相位大于0的点,若向左搜索存在绝对相位大于0的点,则将该点作为中间点并按照 $Rad_{mid} > 0$ 情况继续操作,若向左搜索不存在绝对相位大于0的点,则全是噪点,结束搜索;重复上述步骤,直到不满足二分后返回中间点横坐标并计算纵坐标,完成匹配,结束搜索。

3.3 亚像素插值算法

使用二分法立体匹配得到像素级三维重建结果,为进一步提高精度,本文采用双线性插值计算亚像素级结果^[16]。双线性插值,又称为双线性内插,是有两个变量的插值函数的线性插值扩展,其核心思想是在坐标系的 x 和 y 两个方向分别进行一次线性插值。假设有未知函数 f 在点 $E(X, Y)$ 的值,已知函数 f 在 $Q_{11}=(X_1, Y_1)$, $Q_{12}=(X_1, Y_2)$, $Q_{21}=(X_2, Y_1)$ 以及 $Q_{22}=(X_2, Y_2)$ 4个点的值。如图5所示,首先在 x 方向进行线性插值得到 Z_1 和 Z_2 ,然后在 y 方向进行线性插值得到 $E(X, Y)$,从而得到所要的结果 $f(X, Y)$ 。

$$f(Z_1) \approx \frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} f(Q_{11}) + \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} f(Q_{21}), \tag{17}$$

$$f(Z_2) \approx \frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} f(Q_{12}) + \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} f(Q_{22}). \tag{18}$$

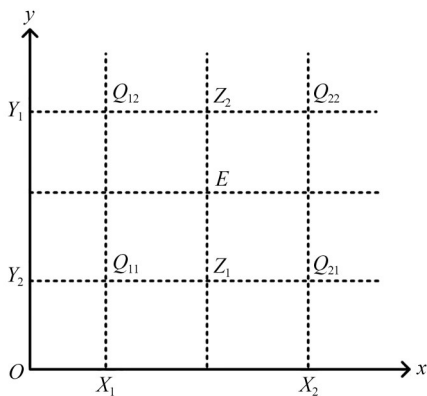


图5 双线性插值原理图

Fig. 5 Schematic diagram of bilinear interpolation

$$f(E) \approx \frac{Y_2 - Y}{Y_2 - Y_1} f(Z_1) + \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} f(Z_2). \tag{19}$$

本文提出的基于截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法,首先对双目相机标定,获得相机内参、外参、基础矩阵等参数;然后,投影仪将生成的投影条纹投射到待测物体表面,双目相机同步拍摄图像;对于左,右相机各自采集的条纹图像,计算十二步相移条纹的包裹相位,将互补格雷码二值化后计算条纹阶次随后计算得到左绝对相位和右绝对相位;最后,通过截距自适应搜索策略缩小搜索范围,结合二分法相位立体匹配,并通过双线性插值实现亚像素高精度三维重建。具体流程如图6所示。

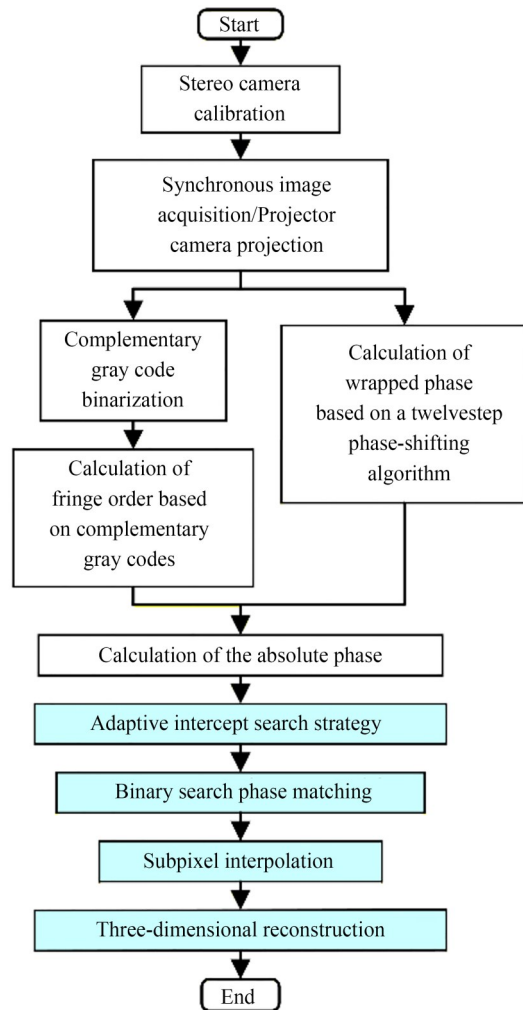


图6 基于截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法流程图

Fig. 6 Flowchart of the fast phase matching method based on an intercept-adaptive search strategy

4 测量实验与结果

4.1 双目结构光硬件系统

为验证上述算法的可行性,搭建了一套双目结构光投影测量系统,该系统如图 7 所示,该系统由两个工业相机(MER2-502-79U3M)以及一个投影仪(DLP4710-SDI4706)组成,相机分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$,投影仪分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$,投影仪控制相机同步拍摄结构光条纹图案,对采集到的结构光条纹图案输入计算机进行处理,计算机 CPU 为 i7-13700KF。

4.2 标准件三维重建实验

为了验证本文提出的基于截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法的效率和精度,本文选择球体直径为 25.465 mm 的标准球和平面度为 $5\ \mu\text{m}$ 的标准块进行三维重建实验,使用四种方法对标准件进行三维重建,包括本文方法、AD 方法、AD-Census 方法以及 SGM 方法,四种方法重建效果如图 8 所示,四种方法重建之后的标准件深度颜色趋于一致,都能很好地重建出待测物。



图 7 双目结构光三维测量系统装置图

Fig. 7 Schematic diagram of the binocular structured-light 3D measurement system setup

将重建出的点云数据封装,封装效果如图 9 所示。从图中可以看出,相比于 AD 匹配方法,本文方法重建出的点云数据噪点明显减少,标准球表面凸起更少并且标准块表面更加平整;AD-Census 匹配方法与 SGM 匹配方法重建后的标准块表面噪声明显增加,其中 SGM 匹配方法噪声更严重,标准球表面也呈现明显的起伏。

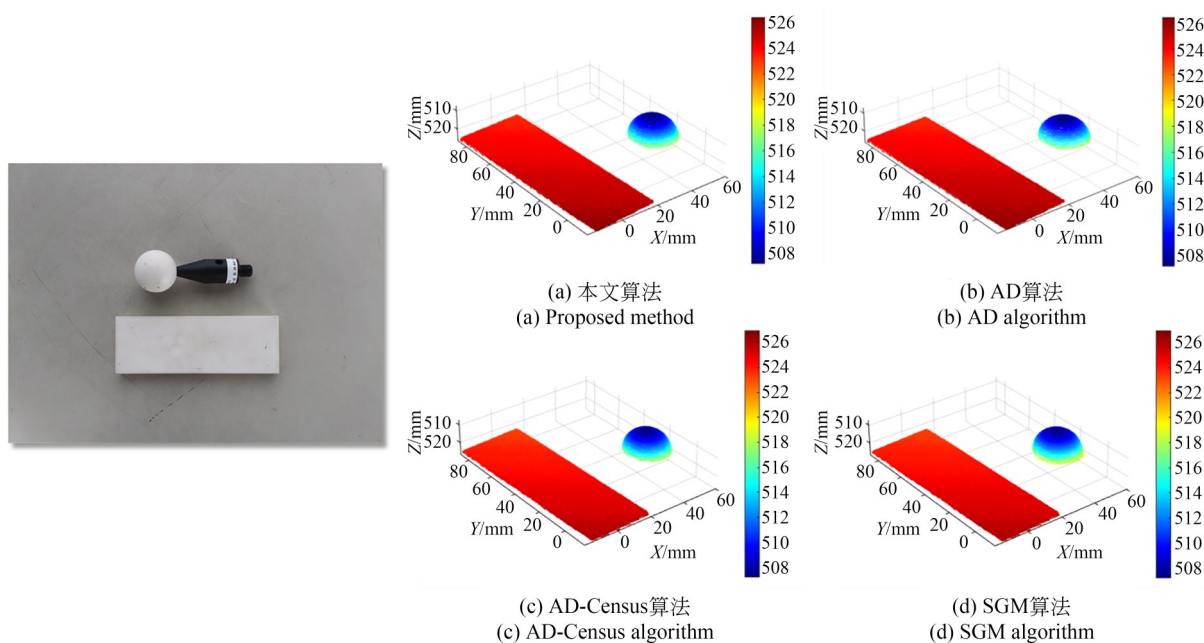


图 8 标准件三维重建结果

Fig. 8 3D reconstruction results of the standard object

随后,本文列出三维重建耗时并测量标准球点云球面直径和标准块点云平面度的绝对误差(AE)进行精度评价,测量结果如表 1 所示。

本文三维重建耗时仅为 15.653 s,相较 AD 算法缩短了 17.074%,相较 AD-Census 算法和 SGM 算法分别缩短了 91.113% 和 93.792%;在

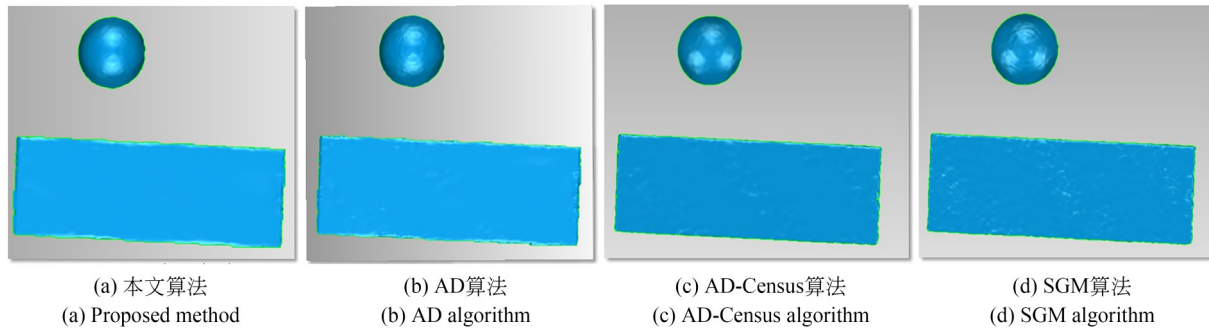


图9 点云封装效果图

Fig. 9 Visualization of point cloud packaging

表1 三维重建耗时及精度对比

Tab. 1 Comparison of processing time and accuracy in 3D reconstruction

Method	Running time/s	Diameter/mm	AE of diameter/mm	Flatness/mm	AE of flatness/mm
Propose method	15.653	25.454	0.011	0.018	0.013
AD	18.876	25.442	0.023	0.032	0.027
AD-census	176.134	25.489	0.024	0.036	0.031
SGM	252.142	25.496	0.031	0.051	0.046

标准球球面直径测量中,本文算法测量绝对误差为0.011 mm,相较AD算法和AD-Census算法分别减少了52.173%和54.167%,相较SGM算法减少了64.516%;在标准块平面度测量中,本文测量绝对误差为0.013 mm,相较AD算法和AD-Census算法分别减少了51.851%和58.065%,相较SGM算法减少了71.739%,实验表明本文方法在提高三维重建效率的同时,有效减小了重建误差,实现了测量精度和匹配效率的双提升。

4.3 多场景三维重建实验

为进一步验证本文方法在不同场景三维重建的有效性,选取金属齿轮、陶瓷摆件、石英玻璃工件进行三维重建实验,分别代表曲面测量场景、平面测量场景和不连续测量场景,重建石英玻璃工件之前在表面喷涂显影剂防止高透,重建效果如图10所示。

金属齿轮重建点云存在部分缺失,原因是左右相机在采集图像过程中,齿轮各个齿之间遮挡造成部分区域重建失败;陶瓷摆件没有存在遮挡的情况,表面连续变化,重建点云效果较好;石英玻璃工件在中心重建效果较好,在边缘部分由于不连续变化,点云噪点增加但依旧完成三维重建,上述实验验证了本文方法在不同场景中三维重建的有效性。

为进一步验证本文方法对不连续测量场景的有效性,本文对如图11所示的两个工件进行三维测量实验,将AD、AD-Census、SGM和本文算法测量值与三坐标机(Coordinate Measuring Machine, CMM)测量值进行比较分析。工件1是一个盘类零件,表面包含多个圆孔,圆孔彼此分离,圆与平面之间深度突然变化;工件2表面包含多级台阶,不同圆形特征与矩形特征在不同的平面,互相之间存在明显的高度差,上述两种工件都属于典型的不连续测量场景。

工件1不同特征的测量结果如表2所示,从表2中可知,4个圆的直径均约为20 mm,AD算法、AD-Census算法、SGM算法测量绝对误差算术平均值(Mean Absolute Error, MAE)分别为0.024 mm,0.025 mm和0.030 mm,而本文算法仅为0.012 mm,四次测量绝对误差在0.011~0.013 mm之间,测量结果误差波动小,表明本文算法具有良好的鲁棒性;随着测量圆形特征尺寸的增加(如图6和图7),AD算法、AD-Census算法、SGM算法和本文算法的测量绝对误差均有所上升,在对直径约为200 mm的圆7测量中,前三种算法测量绝对误差分别为2.761 mm,2.813 mm和3.895 mm,而本文算法测量绝对误差仅为1.382 mm,表明本文方法在大尺寸的测量中仍

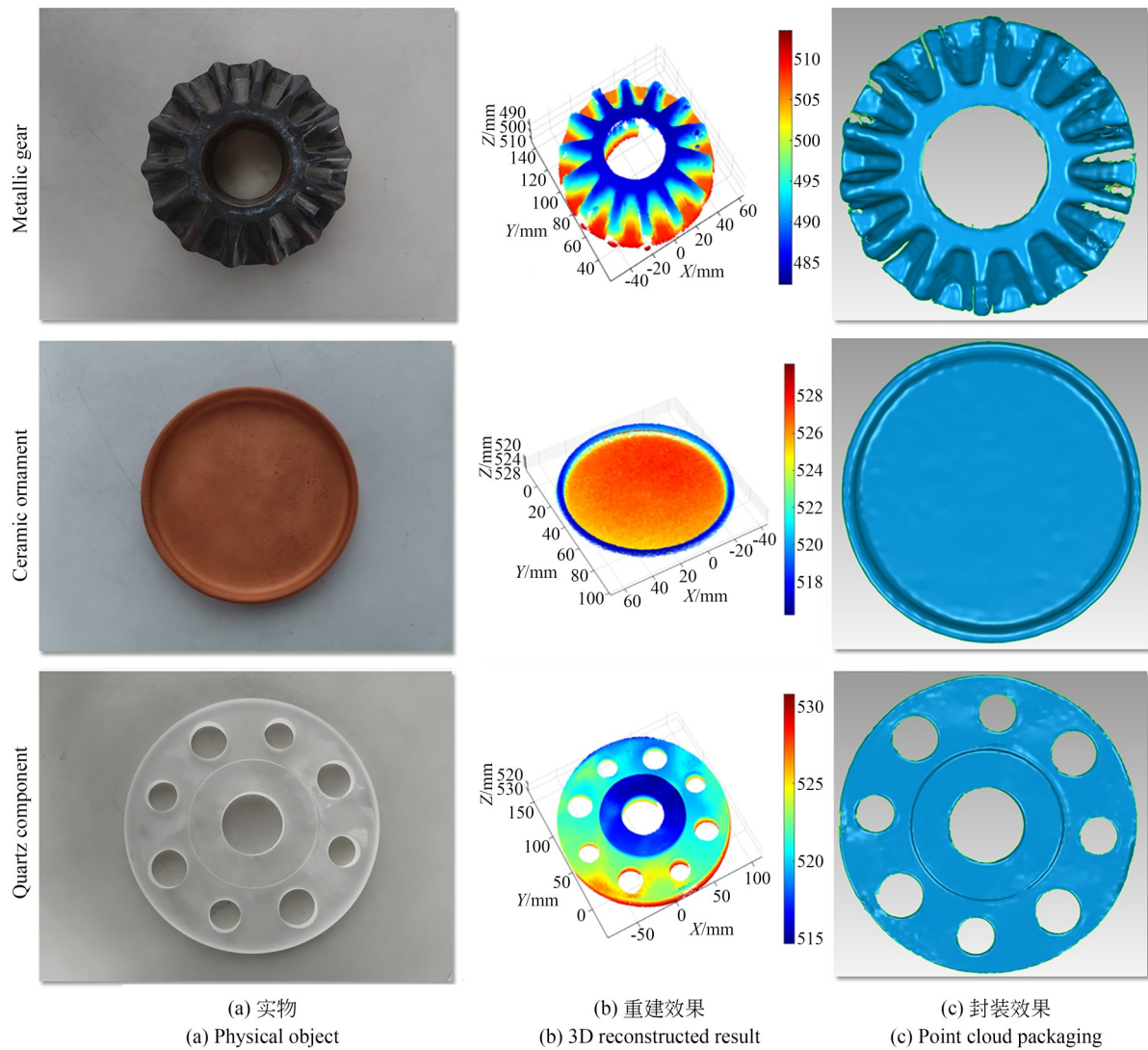


图 10 多场景三维重建结果图

Fig. 10 Visualization of multi-scenario 3D reconstruction results

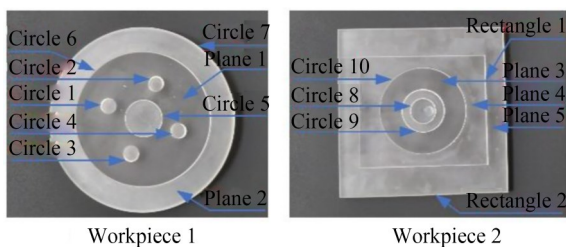


图 11 不连续测量场景工件

Fig. 11 Workpiece in a discontinuous measurement scenario

能保持较好的测量精度。在平面特征的测量上, AD 算法、AD-Census 算法、SGM 算法平面度测量绝对误差算术平均值分别为 0.028 mm, 0.031 mm 和 0.044 mm, 本文算法平面度测量绝对误差

算术平均值仅为 0.013 mm, 明显低于其他算法。

工件 2 不同特征的测量结果如表 3 所示, 从表 3 中可知, 在圆形特征测量中, 本文算法测量绝对误差明显优于其他三种算法, 对于直径较大的圆 10, SGM 算法绝对误差为 0.506 mm, 而本文算法绝对误差为 0.179 mm, 精度明显提升。在矩形特征测量中, 矩形 1 长度测量结果, AD 算法、AD-Census 算法、SGM 算法测量绝对误差分别为 1.343 mm, 1.349 mm 和 1.897 mm, 本文算法测量绝对误差为 0.673 mm; 矩形 1 宽度测量结果, 三种算法测量绝对误差分别为 0.665 mm, 0.674 mm 和 0.913 mm, 本文算法测量绝对误差

表 2 工件 1 测量结果

Tab. 2 Measurement results of workpiece 1

(mm)

Feature	CMM	AD measure- ment value	AE of AD	AD-Census measurement value	AE of AD- census	SGM mea- surement val- ue	AE of SGM	Propose meth- od measure- ment value	AE of propose method
Circle1	20.116	20.091	0.025	20.141	0.025	20.154	0.031	20.128	0.012
Circle2	20.114	20.093	0.021	20.137	0.023	20.150	0.029	20.125	0.011
Circle3	20.117	20.090	0.027	20.144	0.027	20.159	0.032	20.130	0.013
Circle4	20.115	20.092	0.023	20.139	0.024	20.151	0.028	20.126	0.011
Circle5	50.028	49.945	0.083	50.113	0.085	50.147	0.119	49.985	0.043
Circle6	179.919	181.636	1.717	181.655	1.736	182.233	2.314	179.098	0.821
Circle7	249.988	252.749	2.761	252.801	2.813	253.883	3.895	251.370	1.382
Plane1	0.009	0.036	0.027	0.039	0.030	0.061	0.046	0.022	0.013
Plane2	0.007	0.035	0.028	0.038	0.031	0.056	0.042	0.019	0.012
MAE			0.524		0.533		0.726		0.258

表 3 工件 2 测量结果

Tab. 3 Measurement Results of Workpiece 2

(mm)

Feature	CMM	AD measure- ment value	AE of AD	AD-Census measurement value	AE of AD- Census	SGM mea- surement value	AE of SGM	Propose meth- od measure- ment value	AE of propose method
Circle8	30.164	30.205	0.041	30.206	0.042	30.219	0.055	30.183	0.019
Circle9	49.998	50.071	0.073	50.074	0.076	50.116	0.118	49.956	0.042
Circle10	100.090	99.733	0.357	100.455	0.365	100.596	0.506	100.269	0.179
Rectangle1	L:149.801	151.144	1.343	151.150	1.349	151.698	1.897	149.128	0.673
	W:129.812	129.147	0.665	130.486	0.674	130.725	0.913	129.486	0.326
Rectangle2	L:199.999	198.148	1.851	201.872	1.873	202.626	2.627	200.931	0.932
	W:200.059	198.213	1.846	201.916	1.857	202.685	2.626	199.106	0.953
Plane3	0.005	0.031	0.026	0.033	0.028	0.051	0.046	0.018	0.013
Plane4	0.007	0.034	0.027	0.036	0.029	0.056	0.049	0.021	0.014
Plane5	0.011	0.032	0.021	0.036	0.025	0.059	0.048	0.024	0.013
MAE			0.625		0.632		0.889		0.317

为 0.326 mm; 矩形 2 测量结果中, AD 算法、AD-Census 算法和 SGM 算法测量绝对误差均值都超过 1.8 mm, 本文算法测量绝对误差均值为 0.942 mm。在平面特征测量中, AD 算法测量绝对误差均值约为 0.032 mm, 本文算法测量绝对误差均值约为 0.013 mm, 相比于 AD 算法减少 58.513%。

综合表 2 和表 3 的测量结果可以看出, 本文方法在不连续测量场景下能够实现对待测物体的有效重建。对于尺寸较小圆特征和平面特征, 本文方法测量误差保持在较小范围; 对于尺

寸较大特征, 测量误差有所增大, 但整体趋势稳定, 表明本文方法具有较好的精度和良好的鲁棒性。

5 结 论

本文为提高双目结构光三维重建过程中相位立体匹配效率, 提出了一种截距自适应搜索策略的快速相位匹配方法, 并基于双目立体视觉和相移投影测量原理, 搭建了一套基于双目结构光的三维测量系统。首先, 对双目相机标定得到内

参和外参,并以此计算极线;然后,根据极线约束原理,本文提出截距自适应搜索策略,可缩小相位立体匹配的搜索范围,提高三维重建效率;最后,利用单行绝对相位单调递增的性质,采用二分法进行相位匹配,并对匹配结果双线性插值为亚像素,提高三维重建精度。对直径为 25.465 mm 的标准球和平面度为 5 μm 的标准块进行了三维重建实验,本文所提方法重建耗时相较 AD 算法缩短了 17.074%,相较 AD-Census 算法和 SGM 算法分别缩短了 91.113% 和 93.792%;在球面直径绝对误差上,本文误差为 0.011 mm,相较 AD 算法和 AD-Census 算法分别减少了 52.173% 和 54.167%,相较 SGM 算法减少了 64.516%;在标准块平面度绝对误差上,本文误差为 0.013 mm,相较 AD 算法和 AD-Census 算法分别减少了 51.851% 和 58.065%,相较 SGM 算

法减少了 71.739%。为进一步验证本文方法不同场景三维重建的有效性,选取金属齿轮、陶瓷摆件、石英玻璃工件进行三维重建实验,分别代表曲面测量场景、平面测量场景和不连续测量场景。为进一步验证本文对不连续测量场景的有效性,本文还对多级台阶工件和多孔工件进行测量实验。上述实验结果表明,本文算法在三维重建效果、匹配速度和重建精度上均具有明显优势,具有较高的效率和适用性。

作者贡献声明:

马婧华:方法论的提出及论文构思与审核;
邓福伟:论文撰写与测量结果分析;
邱俊淞:执行算法以及测试已有程序;
邹政:实验平台支持与论文审核;
宋涛:测量方法的指导。

参考文献:

- [1] 车德福,尚祥祥,王奇,等. 基于 AD-Census 的双目立体匹配改进算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(11): 1621-1628.
CHE D F, SHANG X X, WANG D, *et al.* Improved binocular stereo matching algorithm based on AD-census [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2024, 45(11): 1621-1628. (in Chinese)
- [2] BU P H, WANG H, DOU Y H, *et al.* Weighted omnidirectional semi-global stereo matching [J]. *Signal Processing*, 2024, 220: 109439.
- [3] YU S W, LIU X A, TAN Q Q, *et al.* Sensors, systems and algorithms of 3D reconstruction for smart agriculture and precision farming: a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 224: 109229.
- [4] TORNERO-MARTÍNEZ N, ANGUIANO-MORALES M, TRUJILLO-SCHIAFFINO G, *et al.* Image stitching for fringe projection profilometry [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(6): 290.
- [5] 吴周杰,张启灿. 基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811001.
WU Z J, ZHANG Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811001. (in Chinese)
- [6] LIU P, XU F, CHU J R, *et al.* Multichannel fusion structured light 3D imaging based on metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(13): 2402297.
- [7] 王姮,徐鹏,林海涛,等. 基于极线约束的水下目标激光重建方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 2215009.
WANG H, XU P, LIN H T, *et al.* Underwater target laser reconstruction method based on epipolar constraint [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(22): 2215009. (in Chinese)
- [8] 陈旭佳,彭羽萌,俞盛旗,等. 基于双目结构光三维重建的类球形水果外形指标测量[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 187-194.
CHEN X J, PENG Y M, YU S Q, *et al.* Measuring the appearance indicators of spherical fruits using binocular structured light 3D reconstruction [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(20): 187-194. (in Chinese)
- [9] 邢倍慧,魏妍婧,胡灿星,等. 基于结构光双目视觉的腐蚀钢材表面三维重建[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(2): 355-363.
XING J H, WEI Y J, HU C Y, *et al.* Three-dimensional reconstruction of corroded steel surface based on structured light binocular vision [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*

- tion), 2025, 55(2): 355-363. (in Chinese)
- [10] ZHANG S M, WU M X, WU Y X, *et al.* Fixed window aggregation AD-census algorithm for phase-based stereo matching [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(32): 8950-8958.
- [11] 杨成禹, 黄晨雷, 张世达, 等. 基于单帧连续编码条纹的半全局立体匹配测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2026, 55(1): 20250450.
YANG C Y, HUANG C L, ZHANG S D, *et al.* Semi-global matching measurement method based on single-frame continuous coded fringes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2026, 55 (1) : 20250450. (in Chinese)
- [12] 唐笑虎, 胡丹, 刘凯. 一种极线近似的双目结构光相位立体匹配方法[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(11): 111004.
TANG X H, HU D, LIU K. A phase stereo matching method based on integrated epipolar line using binocular structured light [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34 (11) : 111004. (in Chinese)
- [13] 张巍, 陈玉翀, 姚鹏程, 等. 基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量[J]. *光学学报*, 2024, 44(9): 0912001.
- ZHANG W, CHEN Y C, YAO P C, *et al.* Three-dimensional measurement of complex textured objects based on bidirectional fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 0912001. (in Chinese)
- [14] 朱一鑫, 陈文华, 林清华, 等. 基于光斑投影和双向相位共轭方向的双目立体匹配[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(20): 2012001.
ZHU Y X, CHEN W H, LIN Q H, *et al.* Binocular stereo matching based on spot projection and bidirectional phase conjugate direction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62 (20) : 2012001. (in Chinese)
- [15] ZHANG Q C, SU X Y, XIANG L Q, *et al.* 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.
- [16] 卜祥涛, 宋亚芳, 王晓宇, 等. 面向多模式图像的改进暗通道先验去雾增强[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(13): 2124-2135.
BU X T, SONG Y F, WANG X Y, *et al.* Improved dark channel prior dehazing enhancement for multi-modal images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(13): 2124-2135. (in Chinese)

作者简介:



马婧华(1989—),女,四川成都人,副教授,2015年于重庆大学获得博士学位,现为重庆理工大学机械工程学院专职教师,主要从事机器视觉检测及机械装备智能运维方面的研究。E-mail: majinghua@cqut.edu.cn

通讯作者:



邓福伟(2001—),男,重庆武隆人,硕士研究生,2023年于重庆理工大学获得学士学位,主要从事机器视觉、图像处理技术方面的研究。E-mail: dfw1362023@163.com