

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514460

基于梯度感知融合的异形构件表面 缺陷高精度三维重建*

张丹丹¹, 何剑波¹, 张世达¹, 任姣姣^{1,2}, 顾 健¹

(1. 长春理工大学飞行器结构检测与评估学科与技术中心 长春 130022; 2. 长春理工大学中山研究院 中山 528437)

摘 要:针对异形结构件曲率多变、光照不均匀及缺乏规则基准,导致表面缺陷区域三维形态难以精确重建,且双目视觉方法存在匹配精度低、速率慢的问题,故提出一种基于梯度感知融合(GAF)的 GAF-Census 快速立体匹配算法,以实现缺陷区域的高精度三维重建与尺寸量化。首先,在代价计算阶段引入 SIFT 特征匹配引导的视差范围约束机制,缩小搜索空间以提升效率;同时采用基于关键点中值滤波的自适应 Census 变换,通过动态阈值替换受污染的中心像素,增强算法抗噪性。其次,构建了梯度感知代价融合机制:在边缘区域强化梯度约束以精确定位缺陷轮廓,在弱纹理区域增加 Census 权重提升匹配稳定性,从而显著改善关键区域的匹配精度。最后,针对异形构件缺陷量化难题,提出基于五次多项式全局拟合与数值积分的方法,实现缺陷尺寸的自动化高精度测量。实验结果表明,所提 GAF-Census 算法在标准及自制样本上的误匹配率最低至 5.25%,运行效率较传统 AD-Census 算法最高提升 96.7%;缺陷宽度与长度测量的平均相对误差分别低至 0.483% 与 0.271%,系统可识别最小缺陷宽度达 0.354 mm。在复杂光照与几何突变环境下,算法仍保持较高的重建完整度与测量稳定性,展现出良好的工程适用性,为异形构件表面缺陷的自动化高精度量化监测提供了可靠的技术手段。

关键词: 异形构件; 双目视觉; 立体匹配; 缺陷检测; 三维重建

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520. 60

Gradient aware fusion based high precision three dimensional reconstruction method for surface defects of special shaped components

Zhang Dandan¹, He Jianbo¹, Zhang Shida¹, Ren Jiaojiao^{1,2}, Gu Jian¹

(1. Fundamental Science and Technology Center of Aerospace Vehicle Structures Inspection and Evaluation, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China)

Abstract: The three dimensional reconstruction of surface defects on complex-shaped components is challenging due to the varying curvature, non-uniform illumination, the absence of regular reference features as well as the low accuracy and slow speed of binocular vision matching. This study proposes a fast stereo matching algorithm named GAF-Census based on Gradient-Aware Fusion (GAF) to achieve the high-precision three dimensional reconstruction of dimensional quantification defective areas. First, an SIFT feature-guided disparity range constraint mechanism is introduced to narrow the search space and improve efficiency at the cost computation stage. Meanwhile, an adaptive Census transform based on key point median filtering is adopted, which replaces the contaminated center pixels and enhance the noise immunity with a dynamic threshold. Additionally a gradient-aware cost fusion mechanism is constructed by strengthening the gradient constraints in the edge regions to accurately locate defect contours, while the Census weight is increased in weak-texture regions to improve matching stability, thereby significantly enhancing the matching accuracy in key areas. Finally, in order to address the difficulty of defect quantification for complex-shaped components, a global fitting method based on a quintic polynomial combined with numerical integration is proposed, enabling the automated and high-precision measurement of defect dimensions. Experimental results show that the proposed GAF-Census algorithm achieves a mismatch rate as low as 5.25% for both standard and custom samples, and the computational efficiency is also improved by 96.7% compared to the conventional AD-Census algorithm.

收稿日期: 2025-09-04 Received Date: 2025-09-04

* 基金项目: 国家级预研项目(2025AV389624)资助

Furthermore the system can detect defects with a minimum width of 0.354 mm, and the average relative errors of defect width and length measurements are only 0.483% and 0.271%, respectively. Last but not least, the algorithm maintains the high reconstruction completeness and measurement stability under the complex lighting and geometric variation conditions, which demonstrates the strong practical applicability and provides a reliable technical solution for the automated high-precision monitoring of surface defects in the complex-shaped components.

Keywords: special shaped components; binocular vision; stereo matching; defect detection; three dimensional reconstruction

0 引言

在工业质量检测领域,异形结构件的表面缺陷检测对产品性能与安全性至关重要,在汽车零部件、机械设备外壳等领域都有着重要的应用价值^[1-5]。异形结构表面形态较平面结构更为多变复杂,存在光照分布不均,反射差异明显等问题^[6-9]。目前针对此异形构件表面缺陷,主要通过人工检查,处理效率较低^[10]。双目视觉检测作为一种非接触、高精度的测量方法^[11-12],是实现异形结构缺陷量化识别的潜在途径。尽管双目视觉在三维测量方面具有优势,但现有研究多集中于规则平面或刚性目标。Huang 等^[13]提出的局部线角轮廓分割方法,提升了复杂平面零件尺寸测量精度,但其基于二维线角特征分析,难以直接应用于三维曲面缺陷。Chen 等^[14]提出了基于交叉比不变性与极线几何融合的立体匹配算法,实现了矩形工件尺寸的高精度测量。Song 等^[15]的多角度三维测量方法依赖棋盘格平面拟合与规则顶点匹配,适用于小型规则工件的全局尺寸测量。Zhang 等^[16]结合全卷积网络与双目视觉,成功重建了平面混凝土裂纹的三维形态。以上方法局限它们高度依赖规则角点、可拟合的参考平面或刚性平面假设,难以直接适用于形态自由多变、缺乏规则特征的异形结构体缺陷区域。部分研究尝试了更先进的匹配算法或系统方案,在面对异形结构的复杂曲率和透视畸变时,王金栋等^[17]开发了机器人搭载双目系统用于平面工件法兰盘检测,但明确指出当目标具有复杂曲率时,其匹配算法与位姿模型可能失效。刘光举等^[18]改进了 AD-Census 算法用于平面连铸坯缺陷定位,虽提高了精度但耗时较长,且其算法在复杂曲面上的鲁棒性尚未验证。Zhang 等^[19-20]的研究通过人工选取目标物体角点来完成三维尺寸测量。此类方法不仅测量误差较大,异形结构体往往缺乏规则角点特征供人工准确选取。为解决手动选点带来的精度问题,顾浩文等^[21]提出基于模板匹配自适应 GrabCut 的半全局块匹配(semi-global block matching, SGBM)改进算法用于纸箱匹配,但在边缘区域匹配效果不佳。潘卫华等^[22]进一步融合边缘特征以改善边缘匹配模糊问题。在面对具有高度不规则的复杂边缘轮廓和连续的渐变曲率表面,仍难以准确还原缺陷的细微形貌。畅雅雯等^[23]在进行立体匹配时引入颜色空间

分量有效减小了光照噪声干扰,但该算法在纹理重复或纹理匮乏区域匹配精度较差。而许多异形结构件表面可能同时存在大面积的弱纹理区域和局部重复纹理区域^[24-26]。

综上所述,现有研究主要集中于平面对象的检测,对于曲率多变、结构复杂的异形构件研究相对不足。这类结构缺乏规则几何基准且深度连续变化,导致在纹理重复或边缘区域易出现匹配困难,缺陷区域的三维重建失败,进而缺陷尺寸难以精准检测。针对此问题,以连续变化异形构件为对象,提出了一种面向异形结构件表面缺陷的快速检测与三维重建算法。该算法引入梯度感知的多元特征代价融合机制,实现了缺陷轮廓内部的高分辨率三维重建。同时,提出基于连续参数化曲线的缺陷量化方法,适应异形结构件的任意拓扑。实验表明:该算法显著降低了重建误匹配率,提升缺陷形貌还原真实性;其量化方法实现了高精度、自动化的缺陷尺寸测量。相比现有平面结构方法,该方案有效解决了异形结构特有的匹配与量化难题,显著提高了缺陷识别精度与检测效率。

1 异形构件表面缺陷检测方案

1.1 原理和方法

双目立体视觉获得三维空间信息的原理是利用两个相机对目标进行拍摄,由于相机位置不同,两幅图像中的同一特征点会出现像素视差^[27]。通过视差和三角测量原理即可计算被测目标的空间坐标^[28]。该系统工作流程如图 1 所示。主要包括系统构建与标定、图像预处理、三维重建和缺陷量化 4 个部分。首先,对样件进行采集和相机标定获取相机内外参数;接着,通过图像预处理增强缺陷与背景的对对比度,通过极线矫正将立体匹配约束在一维空间下进行;然后,采用所提匹配算法对异形结构件表面缺陷进行立体匹配,生成缺陷视差图;最后,重建缺陷点云计算缺陷宽度,并基于多项式拟合结合数值积分的方法获得缺陷长度。

1.2 实验平台的搭建

实验平台如图 2 所示,采用大恒 MER-500-14 GM 黑白工业相机和两个 Kowa LM25HC 镜头组成焦距为 25 mm,相机具有高分辨率 2 592 pixels×2 048 pixels 和高帧率 22.17 fps,中心分辨率 120 lp/mm,边缘分辨率 80 lp/mm。

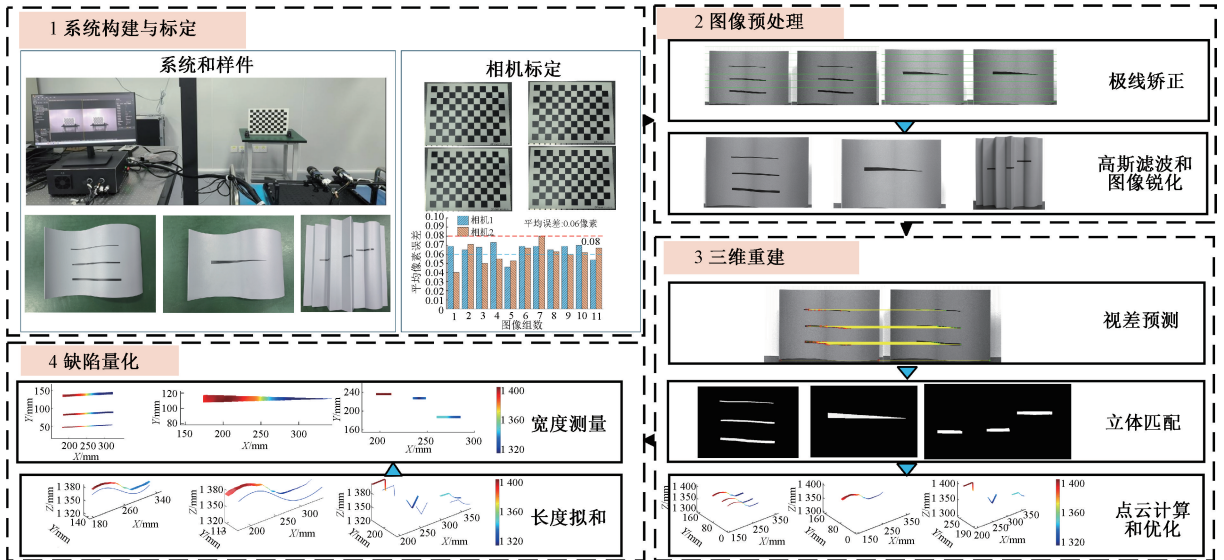


图 1 基于双目视觉的缺陷检测检测系统流程

Fig. 1 Defect detection process based on the binocular vision



图 2 实验平台搭建

Fig. 2 Experimental platform setup

该系统能对细微缺陷进行精准的拍摄。与平面物体相比,异形结构件的缺陷可能分布在多个面或曲面,拍摄时易出现遮挡问题。实验中通过调节基线长度和相机夹角,实现对物体的多角度拍摄。实验通过试拍和数据分析,确定具体参数为:基线长度为 121 mm。相机夹角为 60°。通过多组数实验数据对比,基线长度跟相机夹角在此附近所得到的视差范围在合理区间,且有足够多的重叠区域。通过上述设计,实验能够有效避免遮挡问题,并保证图像采集的质量和效率。

试验对象如图 3 所示,涵盖两种异形结构上的缺陷:样本 1 与样本 2 位于曲面异形结构,样本 3 位于多折面异形结构。

样本 1 设置 3 种直线型缺陷,宽度分别为 2、4、6 mm,长度均为 150 mm,该尺寸范围覆盖了汽车零部件表面划痕等典型缺陷的宽度区间,用于验证算法对工业常见尺寸缺陷的识别性能。样本 2 为一条宽度线性渐变

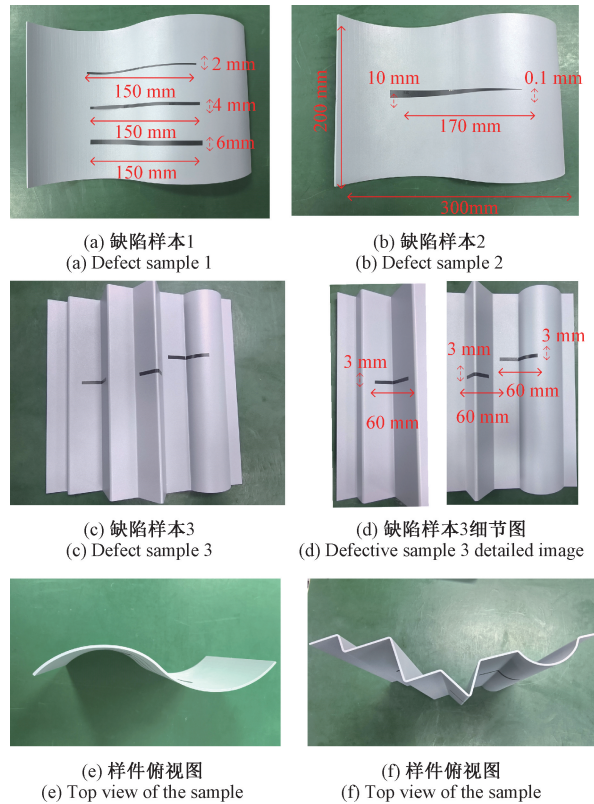


图 3 实验样件

Fig. 3 Experimental sample

缺陷,宽度范围为 0.1~10 mm,长度 170 mm,该设计模拟了腐蚀坑、不均匀磨损带与疲劳裂纹等实际缺陷的形态特征,以评估系统对缺陷宽度的极限识别能力。样本 3 在多折面结构的不同区域(平面-曲面过渡区、凸面与凹

面)分别设置宽度3 mm、长度60 mm的缺陷,用于检验算法在复杂几何条件下的适应性与缺陷检测稳定性。

2 算法流程

2.1 基于方向优先的两阶段筛选策略

鉴于目标工件表面连续且视差变化平滑无阶跃,匹配搜索无需遍历完整的视差范围。为优化缺陷区域的匹配效率,提出一种基于初始视差引导的搜索范围约束策略:首先利用尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法^[29]匹配关键点获取初始视差值 d ,如图4所示,并基 Δd 于此设定动态搜索范围为 $[d - \Delta d, d + \Delta d]$ 。

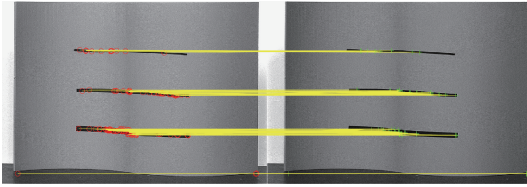


图4 SIFT匹配

Fig. 4 Matching diagram of SIFT

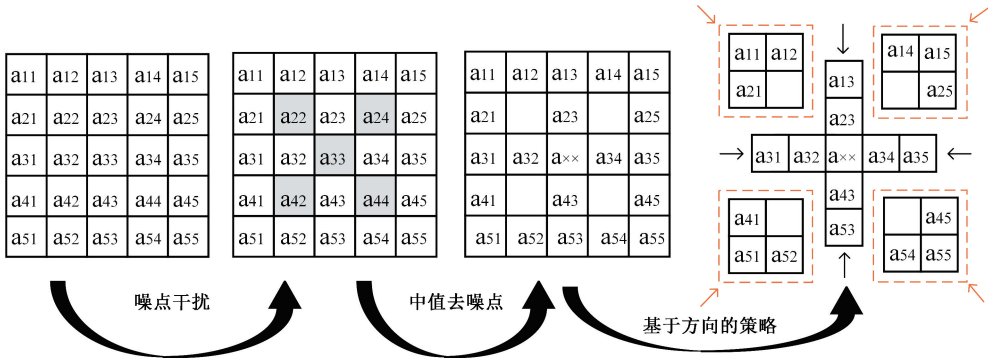


图5 立体匹配策略示意图

Fig. 5 Schematic diagram of three dimensional matching strategy

点执行 Census 变换生成描述符,得到变换码。该方法通过主动舍弃滤波窗口内可能受噪声污染的4位比较信息,在提升计算效率的同时增强了对噪声的鲁棒性,同时有效保留了真实边缘特征。

$$p_c = \begin{cases} \text{median}(S), & (|a_{ij} - a_{33}|) > T_n \\ a_{33}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_c 表示为改进参考值; $|a_{ij} - a_{33}|$ 表示选取的关键点与中心点的差值; $\text{median}(S)$ 表示选取关键点之间灰度值的中值; T_n 为设定阈值; a_{33} 为窗口中心像素灰度值。

针对传统 Census 变换计算重复性高的问题,提出一种基于方向优先的两阶段筛选策略。具体实现分为两个步骤。

1) 在匹配窗口内计算中心像素与8个水平、垂直方向邻域像素的灰度值进行比较如图5所示。

为确定 Δd 的值,通过统计 SIFT 算法匹配视差点的标准差 σ ,取 $\Delta d = 3\sigma$ 能覆盖99%以上的视差分布,该策略将立体匹配的搜索空间由 O_1 变为 O_2 。

$$O_1 = W \times H \times D \times S^2 \quad (1)$$

$$O_2 = W \times H \times ((d + \Delta d) - (d - \Delta d)) \times S^2 \quad (2)$$

式中: O_1 表示原始匹配搜索空间; O_2 表示通过视差引导后的搜索空间; W 表示图像宽度; H 表示图像高度; S^2 表示代价窗口范围; D 表示整个视差范围; $(d + \Delta d) - (d - \Delta d)$ 表示视差引导后的视差范围;

由于 $(d + \Delta d) - (d - \Delta d) < D$,该策略能有效搜索减小空间,降低计算复杂度。

针对传统 Census 变换过度依赖中心像素灰度值导致噪声敏感和匹配误差的问题^[30],提出一种基于关键点中值滤波的改进算法。如图5所示,算法采用匹配窗口与滤波窗口的双层结构,在 5×5 窗口作为代价计算区域,选取中心 3×3 子窗口作为滤波窗口计算滤波窗内5个关键点的灰度中值,并设定自适应动态阈值。

当该中值与中心像素灰度值的绝对偏差超过阈值时,使用中值替代中心像素值,否则使用原始值;在经过滤波窗口判定后选择除滤波窗口以外的其他20个像素

$$Census_{\text{stager}} = \bigoplus_{i \in \{-2, -1, 1, 2\}} (\phi(p_c, p_{x,y+i}) \parallel \phi(p_c, p_{x+i,y})) \quad (4)$$

式中: $Census_{\text{stager}}$ 代表在支持窗口内的 Census 二进制链码; \bigoplus 表示按位连接;当 $a > b$ 时, $\phi(a, b) = 1$,否则为0; $p_{x,y}$ 表示窗口内坐标 (x, y) 处的灰度值。

基于式(4),可求得左右视图的 Hamming 距离,设初筛阈值 T_1 ,当满足条件 $H(Census_{\text{left}}, Census_{\text{right}}) \leq T_1$,则说明两个窗口的局部结构足够相似,否则直接排除候选匹配点。

2) 对通过初筛的像素点,继续与剩余12个对角线方向邻域像素进行比较,选择除滤波窗口以外的像素,生成完整的20位的 Census 描述符,即:

$$Census_{final} = Census_{stager} \oplus \left(\bigoplus_{(i,j) \in D} \phi(p_c, p_{x+i,y}) < k \right) \quad (5)$$

式中: $Census_{final}$ 表示最终变换的代价值。

该策略的核心在于通过低代价的初筛避免高代价的完整计算,算法仅需进行 8 次比较就能快速排除大量不匹配的像素点,这在理论上将 Census 变化的平均计算量降低了约 60%,从而显著提升效率。

2.2 融合边缘特征的自适应代价计算

为实现缺陷区域中重复纹理、边缘区域的精确匹配,提出了一种多元特征融合的立体匹配方法。该方法将改进 Census 变换特征与梯度自适应权重机制相结合,构建梯度感知的代价融合机制。通过 Scharr 算子计算亚像素级梯度幅值和方向,建立指数型衰减权重函数;在非边缘区域增大 Census 权重至 α 以增强弱纹理稳定性,在边缘区域降低 Census 权重至 $1 - \alpha$ 并增强梯度代价贡献。同时引入梯度方向一致性约束,仅当左右图梯度方向偏差小于阈值 5° 时,保留梯度代价项,显著抑制金属表面高光干扰。该策略在显著提升边缘匹配精度的同时,确保了弱纹理区域的匹配鲁棒性。

$$\omega = \begin{cases} \alpha \cdot e^{-\frac{|\nabla I|}{\sigma}}, & \arctan\left(\frac{|\nabla_x I|}{|\nabla_y I|}\right) < 5^\circ \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω 表示图像梯度和方向相关的加权系数; α 用于缩放或调整加权系数的大小; $|\nabla I|$ 表示梯度幅值的绝对值 $|\nabla I| = \sqrt{|\nabla_x I|^2 + |\nabla_y I|^2}$; $\arctan(|\nabla_x I|/|\nabla_y I|)$ 是计算图像梯度方向的反正切函数,表示图像的梯度方向。

对计算得到的 Census 代价值和梯度代价值进行归一化处理,通过自适应权重调节在非边缘区域侧重纹理匹配,边缘区强化梯度约束,计算像素点 P 的匹配代价,最终对改进的 Census 变换与梯度变换进行加权融合,具体表达式为:

$$C(x, y, d) = \omega \cdot C_{census} + (1 - \omega) \cdot C_{gradient} \quad (7)$$

为验证所提算法的实际效果,采用 C++ 语言在 VS2022 软件平台上对算法进行编程实现,算法运行于 Windows11 操作系统,硬件配置为中央处理器 i7-13700H、显卡 RTX-4060。立体匹配实验采用 Middlebury 评估平台提供的数据集验证算法性能。通过将 BM (block matching) 算法、Census 算法、AD-Census 算法与改进算法生成的视差图进行对比分析,如图 6 所示。

通过真实视差与计算视差之间的差值来表示匹配是否正确表达式为:

$$\Delta d = d_t(p) - d_r(p) \quad (8)$$

式中: $d_t(p)$ 表示实验中所得到的真实视差值; $d_r(p)$ 表示计算得到的视差值; Δd 表示他们之间的视差差值。

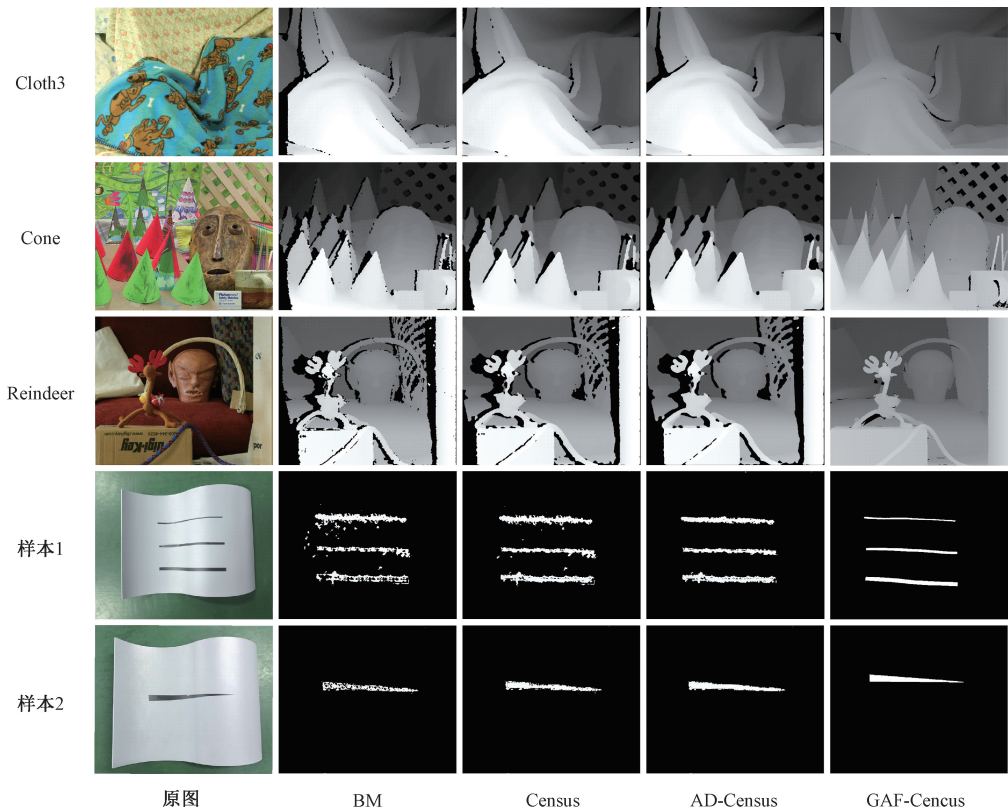


图 6 不同匹配方法得到的视差图

Fig. 6 Disparity map obtained by different matching methods

当 $\Delta d > 1$ 时,则判定 $d_i(p)$ 为错误视差值。在指定区域内,通过将误差值总数除以有效点总数计算误差率,该指标用于评估算法的准确性和性能表现。通过参数测试和对比分析,当匹配效果最好实验参数为 $\{T_1, \sigma, \alpha\} = \{3, 20, 0.8\}$ 。为评估算法匹配效果,采用错误匹配率进行量化分析。

如表 1 所示,所提算法在 5 幅测试图像上生成的视差图,错误匹配率均显著低于对比方法,验证了改进 Census 变换与梯度自适应权重机制相结合对提升

视差图精度的有效性。在运算效率方面,通过引入 SIFT 视差范围约束,将全局搜索转为局部优化,显著减少待匹配视差数量;采用方向优先的两阶段筛选策略,快速排除无效匹配点,避免冗余计算;同时构建自适应代价融合机制,依据纹理特征动态分配计算资源,仅在边缘区域激活梯度约束。实验表明,该算法运行时间较传统 Census 与 AD-Census 方法缩短约 78%~96%,在保障高精度的同时,满足工业实时处理需求。

表 1 不同算法获得的视差图评价指标对比表

Table 1 Comparison table of disparity map diagram's evaluation indexes obtained by different algorithms

测量目标	BM		Census		AD-Census		GAF-Census	
	误匹配率/%	运行时间/s	误匹配率/%	运行时间/s	误匹配率/%	运行时间/s	误匹配率/%	运行时间/s
Cloth3	25.24	4.67	10.25	23.73	9.35	28.32	6.48	10.23
Cone	27.67	4.76	15.16	24.35	12.78	27.45	7.25	9.39
Reindeer	28.54	5.23	13.25	21.24	11.73	29.54	7.42	10.25
样本 1	36.57	10.58	30.25	60.34	20.73	68.72	5.25	2.24
样本 2	40.27	8.25	32.57	58.45	18.64	62.76	6.27	2.38

2.3 缺陷点云拟合

传统裂纹长度测量通常基于离散点云的欧氏距离累加算法。对平面规择缺陷可直接选取角点或基于模板匹配计算,但面对复杂表面上的缺陷时,需依赖人工分段拟合与累加。该方法可能导致测量存在主观误差与系统偏差。为解决上述问题,提出一种通过五次多项式全局拟合建立连续参数化曲线,结合数值积分实现弧长自动精确计算的方法。建立连续参数化曲线模型,即:

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \\ z(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 + c_5t^5 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 表示曲线上每一点的坐标;系数 $a_0, a_1, \dots, a_5, b_0, b_1, \dots, b_5$ 和 c_0, c_1, \dots, c_5 是通过最小二乘法拟合得到的多项式系数。

$P_i = (x_i, y_i, z_i)$ 是第 i 个点的坐标; $\|P_i - P_{i+1}\|$ 表示第 i 和第 $i+1$ 两个点之间的欧式距离。设曲线上的离散点为 P_1, P_2, \dots, P_N , 其中每个点 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 是平滑曲线上的坐标。平滑曲线的总长度 L 可以表示为:

$$L = \sum_{i=1}^N \|P_i - P_{i+1}\| \quad (10)$$

该方法在实现高精度曲线拟合的同时,消除了人工分段计算的需求及主观误差干扰,显著提升了缺陷长度量测的准确性。

3 实验结果及数据分析

3.1 测量精度分析

在进行立体匹配之前需要先对图像进行校正,采用 Bouguet 方法^[31]进行图像校正,使两幅图像的对应极线位于同一扫描线上,将搜索范围从二维减少到一维,能有效增加匹配精确度。对校正后的图像实施立体匹配与去噪处理,生成缺陷的视差图,如图 7 所示。通过融合梯度代价的视差图呈现清晰且结构完整的缺陷轮廓。



(a) 样本1视差图
(a) Parallax diagram of sample 1

(b) 样本2视差图
(b) Parallax diagram of sample 2

图 7 缺陷区域视差图

Fig. 7 Disparity map of defect area

在通过三角测量公式计算空间点坐标时,需要确定两台相机的位姿关系,得到标定数据。采用张正友标定法^[28]对相机进行标定,标定结果最大重投影误差 $\delta_{\text{pixel}} = 0.08$ pixels。通过三角测量模型传递并影响最终的三维坐标计算。真实物理误差可表示为:

$$\delta_{\text{real}} = \frac{\delta_{\text{pixel}} \times Z}{f} \quad (11)$$

式中: δ_{pixel} 表示重投影误差; δ_{real} 表示物理真实误差; Z 表示物距; f 表示相机焦距。

将标定结果及系统参数 (Z, f) 代入式(11) 可估算出真

实物理误差 $\delta_{\text{real}} = 0.034 \text{ mm}$; 鉴于误差量级远小于系统对缺陷特征的量化要求, 认为标定引入的误差对最终三维重建结果精度影响可忽略。基于三角测量原理及系统标定参数, 对缺陷区域视差图像素点进行三维重建, 生成高精度三维点云如图 8 所示, 实现对缺陷几何特征的精确量化。

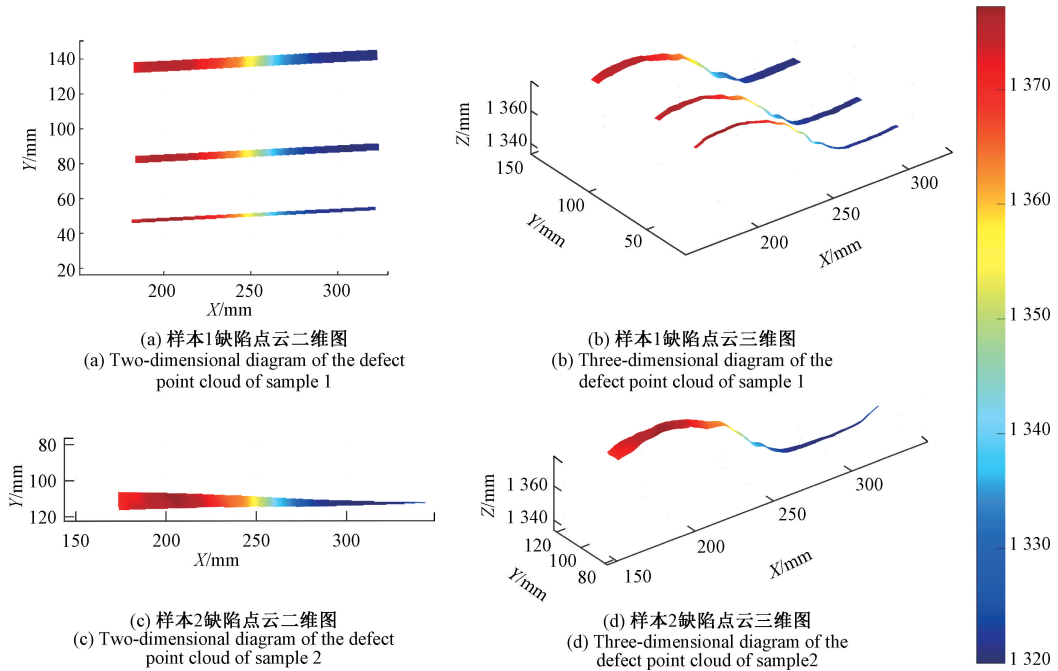


图 8 缺陷区域三维点云图

Fig. 8 Three dimensional point cloud diagram of defect area

对于样本 1 中 3 种宽度不同的缺陷, 在长度方向均匀选取 10 个位置测量, 在各位置双侧边缘分别定位特征点并重建其欧氏距离作为缺陷宽度值。如表 2、图 9 所示, 当缺陷宽度为 2 mm 时, 所提方法的相对误差率 < 3.1%, 而传统方法达到 5.95%; 当宽度增至 4 mm 时, 所提方法的误差误差降至 1.075%, 传统方法的 2.195%; 在 6 mm 宽度条件下, 所提方法进一步将相对误差率 0.483%, 相较传统方法的 1.08%。从测量稳定性来看, 所提方法在各宽度下的标准差均显著低于传统方法, 说明其测量结果具有更好的一致性; 结合相对误差率的对比, 充分表明所提方法在测量精度与稳定性方面均显著优于传统双目算法。由图 9(d) 可知随缺陷宽度增加, 系统相对误差率呈显著递减趋势。

在对缺陷长度计算时对样本 1、2 重复进行 5 次实验, 使用多项式拟合的方法分别对所重建缺陷点云进行拟合, 拟和结果如图 10 所示。

通过手动选点的方法与拟合所得测量结果如表 3 所示; 根据图 11 可知, 由于缺陷宽度的不同, 样本 1 缺陷拟合出来的最大长度误差率分别为 0.673%、0.515% 和 0.324%; 手动选点测量的长度误差分别为 2.061%、

表 2 样本 1 不同缺陷的宽度测量数据及误差
Table 2 Measured width and error of different defects for sample 1

测量次数	所提算法测量/mm			传统算法测量/mm		
	2	4	6	2	4	6
1	1.948	3.957	6.024	2.128	4.079	6.072
2	1.937	4.032	5.972	1.865	3.906	6.053
3	2.053	3.952	5.962	1.901	4.074	5.940
4	2.073	3.966	5.976	2.127	4.042	6.062
5	1.943	4.051	6.024	2.114	3.886	5.948
6	1.935	4.043	6.021	2.105	3.915	5.929
7	2.052	3.947	5.967	2.099	3.901	6.099
8	1.936	3.957	5.976	1.857	4.067	5.928
9	1.946	4.062	5.956	2.109	3.913	6.080
10	2.069	4.031	6.029	1.879	4.106	5.937
平均误差率/%	3.100	1.075	0.483	5.950	2.195	1.080
标准差/mm	0.061	0.045	0.029	0.119	0.087	0.070

1.733% 和 1.293%; 误差结果显示通过多项式拟合得

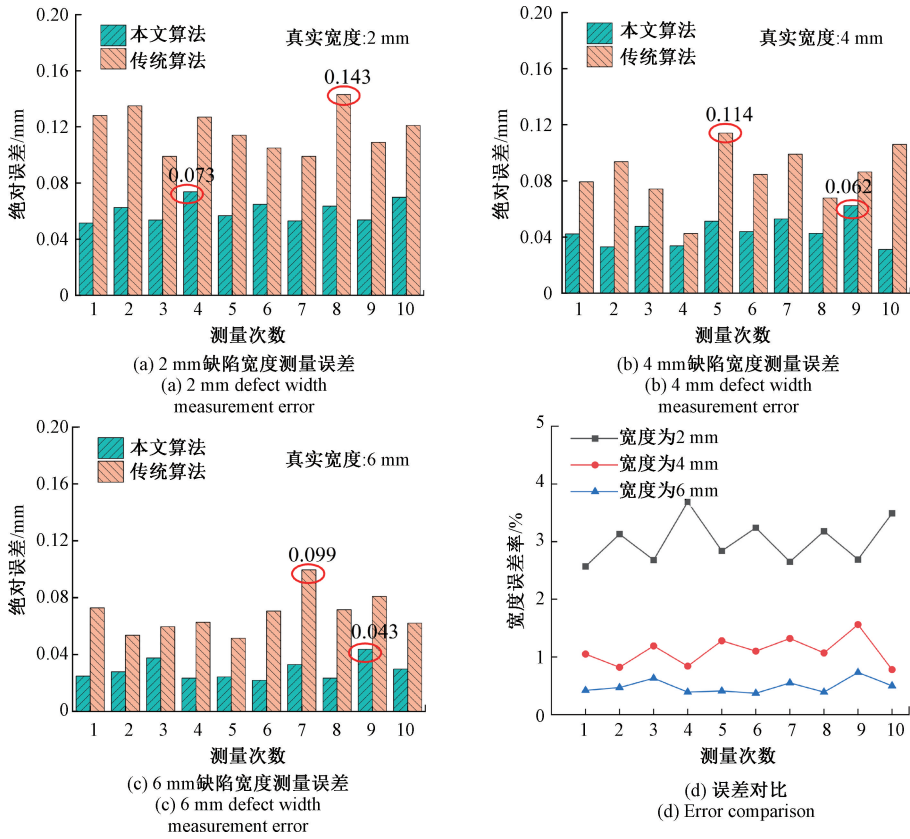


图9 样本1缺陷宽度比较结果

Fig. 9 Comparison results of defect width for sample 1

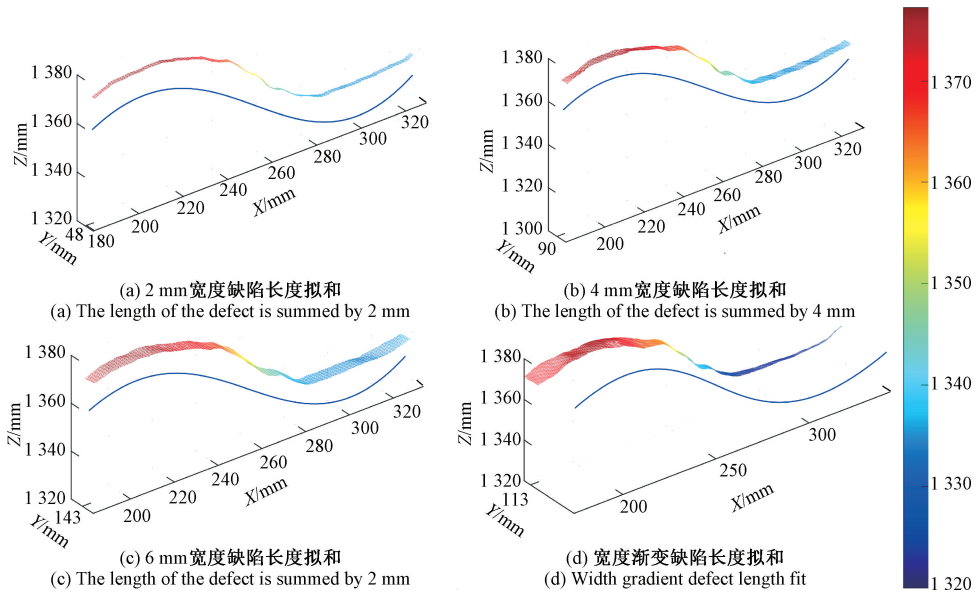


图10 缺陷点云及拟合曲线示意图

Fig. 10 Diagram of defect point cloud and quasi-sum curve

到的长度误差远小于手动测量的误差。从测量一致性来看,自动拟合方法在各缺陷长度下的标准差均显著低于

手动选点方法,表明自动拟合不仅误差更低,且重复测量结果更为稳定。实验结果表明使用多项式拟合的方法

表 3 缺陷长度测量数据及误差
Table 3 Defect length measurement data and errors (mm)

测量次数	缺陷 1(150 mm)		缺陷 2(150 mm)		缺陷 3(150 mm)		缺陷 4(170 mm)	
	自动拟合 测量长度	手动选点 测量长度	自动拟合 测量长度	手动选点 测量长度	自动拟合 测量长度	手动选点 测量长度	自动拟合 测量长度	手动选点 测量长度
1	151.124	147.117	149.354	147.452	150.542	150.542	170.152	172.368
2	149.024	146.654	150.856	152.792	149.435	151.942	169.374	168.143
3	149.121	152.976	150.779	147.943	149.553	147.632	170.446	171.751
4	151.097	153.758	150.835	153.046	150.335	151.847	170.385	173.735
5	150.854	147.202	149.258	152.289	149.605	147.453	169.305	172.202
平均误差率	0.637%	2.061%	0.515%	1.733%	0.324%	1.293%	0.271%	1.400%
标准差	0.992	3.172	0.775	2.571	0.465	1.978	0.499	2.489

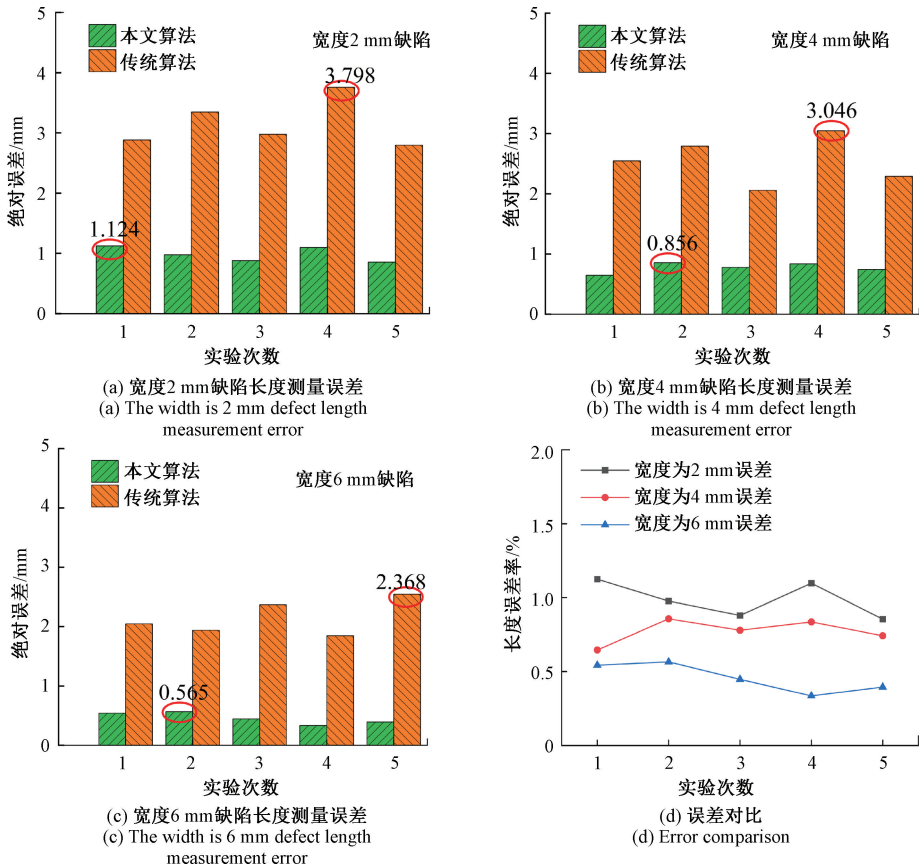


图 11 样本 1 缺陷长度比较结果

Fig. 11 Comparison results of defect length in sample 1

在测量距离实验中能够保持较高的正确率跟稳定性。当样本宽度由 2 mm 增加到 6 mm 时,长度测量误差从 0.637% 下降到 0.324%、标准差从 0.992 mm 降到 0.465 mm,主要原因在于在相机分辨率不变的情况下,随着缺陷宽度的增加,单个像素对于整体的影响变小,从而导致测量精度升高。

3.2 最小缺陷检测极限分析

针对样本 2 中宽度渐变缺陷,在相同条件下重复进行了 5 次实验以获取视差图。受光照波动的影响,生成的视差图存在微小差异,导致测得的长度值也随之变化。如表 3 所示,5 次测量的长度平均相对误差为 0.271%。为分析系统的最小可识别宽度,选取其中最

接近实际长度的一次实验结果如图 12 所示进行研究。分析表明,从长度与宽度的关系呈现非线性变化的起始点开始,边缘区域出现显著的视差匹配误差,具体表现为视差图边界向外扩张。对视差图进行三维重建后,在视差匹配精度可靠的线性区域内进行宽度测量,测得缺陷宽度为 0.354 mm,其对应长度为 165.632 mm。重建结果模型如图 12 所示,确定本系统可识别缺陷的最小宽度为 0.354 mm。

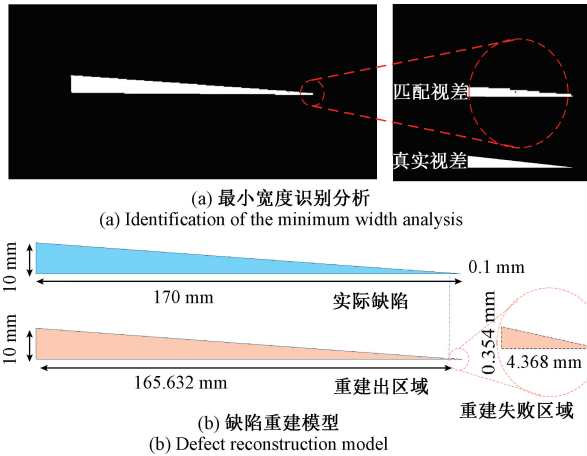


图 12 缺陷区域三维重建模型

Fig. 12 Defect area reconstruction model

3.3 复杂环境实验测试

为全面评估所提 GAF-Census 算法在复杂工况下的适用性与鲁棒性,设计包含凸面、凹面及平面-曲面过渡区等复杂几何特征的样本 3,模拟工业现场中常见的几何结构突变场景。进一步地,为考察算法在不同光照环境下的表现,在均匀光照、过曝、欠曝及侧向强光四种典型条件下分别开展实验,系统检验算法在剧烈几何变化、反射差异及光照波动等多重干扰下的缺陷检测能力与稳定性。光照对比情况如图 13 所示,该设计有效模拟了工业现场中复杂的光照分布。

由于样件几何形态复杂,单一拍摄角度难以在一次成像中完整捕捉所有缺陷,导致部分区域无法实现有效匹配。为此,采用分组拍摄策略,先对部分缺陷进行立体匹配与三维重建,再调整角度拍摄其余缺陷并重复上述流程。为系统评估 GAF-Census 算法在不同光照条件下的三维重建能力,对多组不同光照环境下的缺陷样本分别进行视差计算与三维重建。如图 14 所示,重建结果清晰反映了算法在复杂光照场景下的三维复原效果。

为定量评估算法在复杂环境下的性能,对样本 3 在不同光照条件下进行测试。其中,宽度与长度测量误差基于 3.1 节所述的测量方法计算;重建完整度通过有效重建点云数量与理论点云总数的比值获得;运行时间为立体匹配过程耗时,实验结果如表 4 所示。

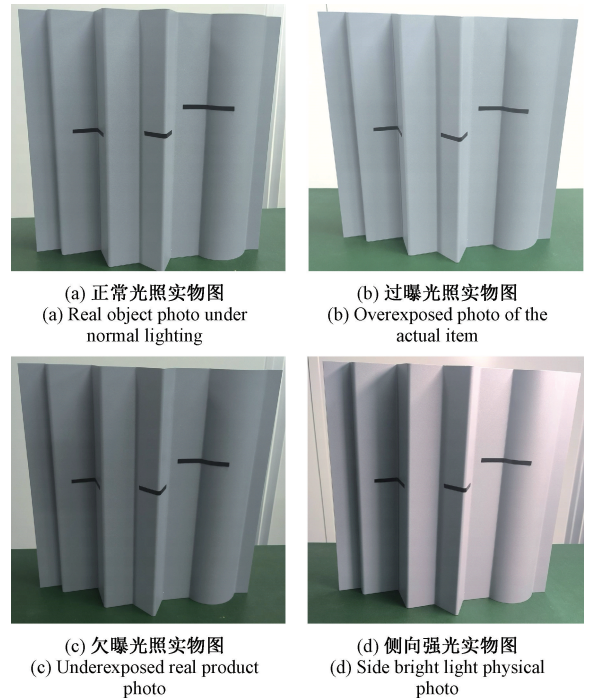


图 13 不同光照环境下的样件

Fig. 13 Samples under different lighting conditions

表 4 复杂环境下算法鲁棒性测试结果

Table 4 Robustness testing results of various algorithm in complex environments

光照条件	算法	宽度测量 误差 / %	长度测量 误差 / %	重建完整 度 / %	运行时 间 / s
正常光照	GAF-Census	1.857	0.835	95.64	5.23
	AD-Census	4.265	4.282	83.25	83.45
过曝	GAF-Census	1.937	0.993	92.53	5.35
	AD-Census	5.235	5.210	80.35	85.12
欠曝	GAF-Census	2.367	0.894	92.79	5.64
	AD-Census	6.984	6.367	75.94	84.47
侧向强光	GAF-Census	2.091	1.029	93.35	5.79
	AD-Census	6.762	7.983	78.92	85.88

从缺陷重建结果来看,提出的 GAF-Census 算法在各类干扰条件下均展现出优异的综合性能。在尺寸测量精度方面,算法在过曝、欠曝及侧向强光等极端条件下,宽度与长度测量误差分别控制在 2.367% 和 1.029% 以内,显著优于对比算法,这验证了梯度感知代价融合机制对缺陷尺寸量化的稳定性。在重建完整性方面,算法在光照干扰下仍能保持 92.53% 以上的点云完整度,体现了改进 Census 变换与自适应权重机制在保留缺陷特征方面的有效性。在计算效率方面,算法运行时间在干扰环境下增幅不超过 10.71%,且总体耗时保持在 5.79 s 以内,

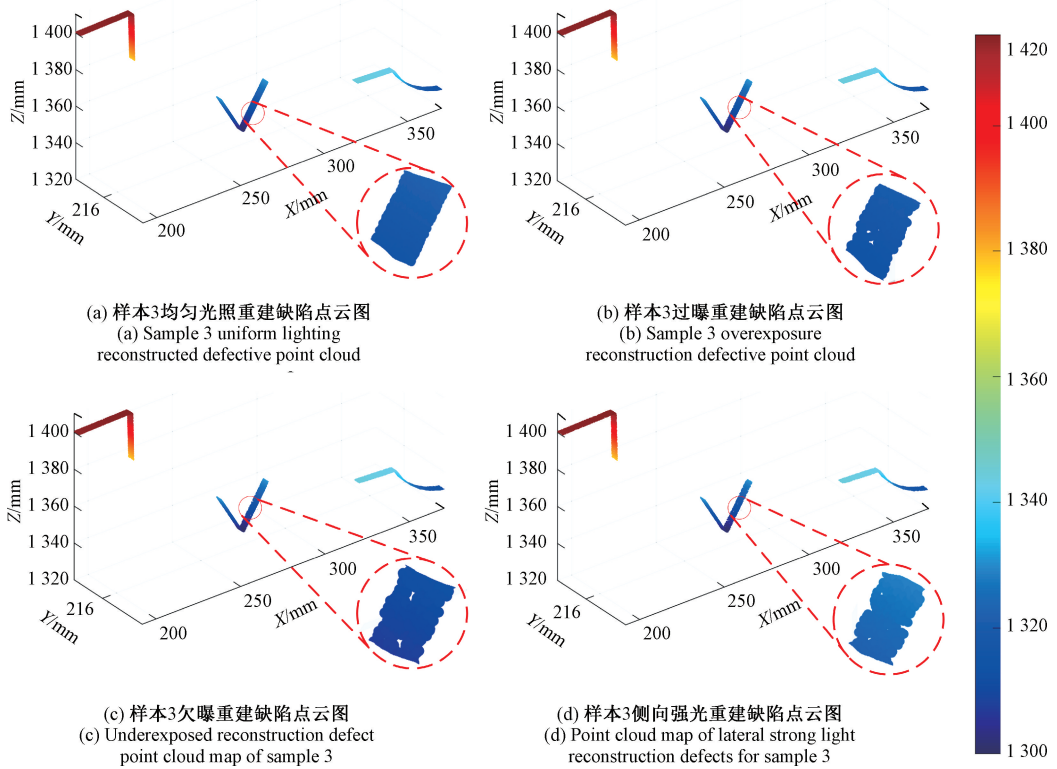


图 14 复杂环境不同光照条件下缺陷三维重建结果

Fig. 14 Three dimensional reconstruction results of defects under different lighting conditions in complex environments

证明了方向优先筛选策略与视差范围约束的计算优势。这些结果表明, GAF-Census 算法在精度、完整性和效率 3 个维度均具有良好的鲁棒性, 能够满足工业现场对缺陷检测系统的综合要求。

4 结 论

针对异形结构件表面缺陷检测困难的问题, 提出了一种基于梯度感知融合的 GAF-Census 立体匹配算法, 实现了缺陷像素级精度的三维重建与尺寸自动测量。在匹配阶段, 通过引入 SIFT 特征引导的视差范围自适应约束, 显著压缩搜索空间; 结合基于关键点中值滤波的改进 Census 变换与方向优先的两阶段筛选策略, 在增强噪声鲁棒性的同时有效降低了计算复杂度。进一步地, 构建了梯度感知的代价融合机制, 在边缘区域强化梯度约束以提升轮廓定位精度, 在弱纹理区域增强 Census 权重以保障匹配稳定性。在缺陷尺寸量化方面, 提出基于多项式全局拟合与数值积分的方法, 实现了复杂曲面上缺陷长度的自动化高精度测量。实验结果表明, 所提方法在多种异形构件样本上均能实现缺陷形貌的高质量三维重建, 在复杂几何结构与多变光照环境下, 系统仍能保持较高的重建完整度与测量稳定性, 展现出良好的工程适用

性。尽管当前方法在极端弱纹理或强反射条件下仍存在一定局限, 后续研究将重点探索深度学习与立体视觉的融合机制, 以进一步提升系统在复杂工业场景下的鲁棒性与细节重建能力。

参考文献

- [1] 朱甜甜, 周正干, 周文彬, 等. 曲面构件阵列超声频域逆时偏移成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 156-165.
ZHU T T, ZHOU ZH G, ZHOU W B, et al. Research on the curved-surface components array ultrasonic frequency-domain reverse time migration imaging method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 156-165.
- [2] YANG ZH Y, HE Y, ZHANG Z Y, et al. Research on detection and classification of automotive body surface defects based on image processing and machine learning[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 36(1): 1-16.
- [3] HE Y K, WU B T, MAO J H, et al. An effective MID-based visual defect detection method for specular car body surface[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 72: 154-162.
- [4] CAO J S, WU H Y, WANG W Y, et al. A visual

- inspection and classification method for camshaft surface defects based on defect similarity measurement[J]. IEEE Access, 2024, 12: 74633-74648.
- [5] 于瀚文, 吴一全. 基于机器视觉的锂电池缺陷检测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 1-23.
YU H W, WU Y Q. Research progress on defect detection of lithium battery based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 1-23.
- [6] 钟小品, 朱俊玮, 列智豪, 等. 基于合成缺陷的偏光片外观对抗异常检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(14): 298-307.
ZHONG X P, ZHU J W, LIE ZH H, et al. Anomaly detection method of polarizer appearance based on synthetic defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(14): 298-307.
- [7] RODRIGUEZ J A M. Microsurface defect recognition via microlaser line projection and affine moment invariants[J]. Coatings, 2025, 15(4): 385.
- [8] LIANG P F, KOTOUSOV A, NG C T. Propagation, scattering and defect detection in a circular edge with quasi-edge waves [J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10672.
- [9] 毛奥, 孙建锋, 卢智勇, 等. 隐形结构光三维成像动态背景光干扰抑制技术[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 105-116.
MAO AO, SUN J F, LU ZH Y, et al. Dynamic background light interference suppression technology based on invisible structured light three-dimensional imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 105-116.
- [10] 王正家, 景嘉宝, 王思宇. 基于双目视觉的车辆外廓尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 150-156.
WANG ZH J, JING J B, WANG S Y. Measurement method of vehicle outline size based on binocular vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 150-156.
- [11] 李冰, 王宏伟, 韩宇辰, 等. 基于双目视觉的拖车钩检测与定位方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(3): 1-8.
LI B, WANG H W, HAN Y CH, et al. Research on tow hook detection and location method based on binocular vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3): 1-8.
- [12] 郭迎, 赵祥模, 梁睿琳, 等. 双目视觉下的自动驾驶车辆多类型障碍物感知[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1406-1411.
GUO Y, ZHAO X M, LIANG R L, et al. Perception of multiple types of obstacles in autonomous vehicles under binocular vision [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(8): 1406-1411.
- [13] HUANG SH F, QIN H F, ZHOU ZH F. Vision measurement for flat parts based on local line-angle contour segmentation [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(8): 085012.
- [14] CHEN L, ZHONG G W, HAN Z, et al. Binocular visual dimension measurement method for rectangular workpiece with a precise stereoscopic matching algorithm [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 34(3): 035010.
- [15] SONG K, YI H AN, ZHANG L P, et al. Multi-angle 3D measurement of small workpieces using EDMS algorithm[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(10): 105006.
- [16] ZHANG ZH CH, SHEN ZH J, LIU J T, et al. A binocular vision-based crack detection and measurement method incorporating semantic segmentation[J]. Sensors, 2023, 24(1): 3-25.
- [17] 王金栋, 谢成胜, 张行健, 等. 机器人搭载双目视觉系统下的工件尺寸检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 180-192.
WANG J D, XIE CH SH, ZHANG X J, et al. Research on workpiece size detection method with binocular vision system carried by robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 180-192.
- [18] 刘光举, 刘琼, 杜荣谦. 基于双目立体视觉的连铸坯缺陷定位研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(20): 24-31.
LIU G J, LIU Q, DU R Q. Research on defect location of continuous casting billet based on binocular stereo vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(20): 24-31.
- [19] ZHANG J W, HAN F L, HAN D F, et al. Object measurement in real underwater environments using improved stereo matching with semantic segmentation[J]. Measurement, 2023, 218: 113147.
- [20] ZHANG Y W, GU J, RAO T, et al. A shape reconstruction and measurement method for spherical hedges using binocular vision [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 849821.
- [21] 顾浩文, 邹光明, 王众玄, 等. 基于双目视觉的纸箱尺寸测量立体匹配方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 98-105.
GU H W, ZOU G M, WANG ZH X, et al. Research on three-dimensional matching method of carton size

- recognition based on binocular vision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(2): 98-105.
- [22] 潘卫华, 门媛媛, 苏攀. 融合边缘特征的自适应滤波立体匹配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(8): 426-433.
- PAN W H, MEN Y Y, SU P. Adaptive filtering stereo matching algorithm for fusion of edge features[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 426-433.
- [23] 畅雅雯, 赵冬青, 单彦虎. 多特征融合和自适应聚合的立体匹配算法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(23): 219-225.
- CHANG Y W, ZHAO D Q, SHAN Y H. Research on stereo matching algorithm based on multi-feature fusion and adaptive aggregation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(23): 219-225.
- [24] HAFEEZ J, LEE J, KWON S, et al. Evaluating feature extraction methods with synthetic noise patterns for image-based modelling of texture-less objects [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3886.
- [25] HE Y, SONG K CH, MENG Q G, et al. An end-to-end steel surface defect detection approach via fusing multiple hierarchical features[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 69(4): 1493-1504.
- [26] SUBRAMANYAM V, KUMAR J, SINGH S N, et al. Low-textural image registration: Comparative analysis of feature descriptors [C]. *International Conference on Computer Vision and Image Processing*, 2022: 458-473.
- [27] 李仁杰, 阳波, 肖宏峰, 等. 长短焦双目三维成像算法研究与精度分析[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(9): 42-46.
- LI R J, YANG B, XIAO H F, et al. Research and precision analysis on binocular 3D imaging algorithm with long and short focal length [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(9): 42-46.
- [28] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [29] CHIU L C, CHANG T S, CHEN J Y, et al. Fast SIFT design for real-time visual feature extraction[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(8): 3158-3167.
- [30] 宋巍, 魏新宇, 张明华, 等. 基于改进代价计算和视差候选策略的立体匹配[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(2): 271-284.
- SONG W, WEI X Y, ZHANG M H, et al. Stereo matching based on improved cost calculation and disparity candidate strategy [J]. *Laser & Optoelectronics*

Progress, 2021, 58(2): 271-284.

- [31] RAMEAU F, PARK J, BAILO O, et al. MC-Calib: A generic and robust calibration toolbox for multi-camera systems[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2022, 217: 103353.

作者简介



张丹丹 (通信作者), 2012年于长春理工大学获得学士学位, 2015年于长春理工大学获得硕士学位, 2020年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学光电工程学院副研究员, 主要研究方向为复合材料太赫兹无损检测与评估技术、先进复合材料无损检测。

E-mail: zhangdandan_rita@126.com

Zhang Dandan (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Changchun University of Science and Technology in 2012, 2015 and 2020, respectively. She is currently an associate researcher in the School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include terahertz nondestructive testing and evaluation technology for composite materials, as well as nondestructive testing of advanced composite materials.



何剑波, 2023年于湖南工程学院获得学士学位, 现为长春理工大学光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与机器视觉。

E-mail: 481200791@qq.com

He Jianbo received his B. Sc. degree from Hunan Institute of Engineering in 2023. Now he is a master's graduate student in the School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology. His main research interests include digital image processing and machine vision.



任姣姣, 2011年于长春理工大学获得学士学位, 2017年于长春理工大学硕博连读获得博士学位, 现为长春理工大学光电工程学院研究员, 主要研究方向为太赫兹无损检测及评估、健康监测及风险评估。

E-mail: zimengrenjiao@163.com

Ren Jiaojiao received her B. Sc. degree and Ph. D. degree through a combined master-doctoral program, all from Changchun University of Science and Technology in 2011 and 2017, respectively. She is currently a researcher in the School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include terahertz nondestructive testing and evaluation, health monitoring, and risk assessment.