

激光直接成像机靶标识别算法的设计 及抗扰性能测试

王瑞洲^{1*} 张宇龙¹ 王 华² 张宪民³

1. 广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广州, 510006
2. 广东科视光学技术股份有限公司广东省数字光刻工程技术研究中心, 东莞, 523000
3. 华南理工大学广东省精密装备与制造技术重点实验室, 广州, 510641

摘要:在激光直接成像领域, 扰动导致靶标识别性能劣化, 降低寻靶对位精度及效率。设计了激光直接成像(LDI)机视觉寻靶装置, 提出了随机一点与随机三点自适应切换的取点求圆策略, 采用随机抽样一致方法完成再拟合, 并设计了靶标识别算法。分析了扰动源的生成机理, 设计了光照条件与离面位移可控的量化激励装置。加工了包含典型靶标异常特征的基板, 搭建了 LDI 机扰动源的可控量化生成与测试系统。测试结果表明, LDI 机靶标识别算法的抗扰性能较强。

关键词:激光直接成像; 靶标识别算法; 抗扰性能; 离面位移

中图分类号: TH744; TP23

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Anti-disturbance Performance Tests of Target Recognition Algorithm for LDI Machines

WANG Ruizhou^{1*} ZHANG Yulong¹ WANG Hua² ZHANG Xianmin³

1. State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006
2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Digital Lithography, Guangdong KST Optical Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523000
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacture Technology, South China University of Technology, Guangzhou, 510641

Abstract: In LDI fields, disturbances caused the degradation of target recognition performance, and reduced the accuracy and efficiency of target alignment. A visual targeting device for LDI machines was designed. An adaptive point-selecting circle-searching strategy of random one point and random three points was proposed. The re-fitting was completed using the random sample consensus (RANSAC) method, and a target recognition algorithm was designed. The formation mechanism of disturbances was analyzed. A controllable and quantitative generation device for illumination conditions and out-of-focused-plane displacements was designed. The substrates containing typical targets with anomaly characteristics were fabricated. A quantitative generation and test system for the disturbances of LDI machines was completed. Test results demonstrate that the proposed target recognition algorithm for LDI machines possesses strong robustness against disturbances.

Key words: laser direct imaging(LDI); target recognition algorithm; anti-disturbance performance; out-of-focused-plane displacement

0 引言

激光直接成像(laser direct imaging, LDI)是一种无掩模光刻技术^[1], 它使用可编程激光束曝光印制电路板(printed circuit board, PCB)表面的光敏材料来实现图像转移。传统的 LDI 机采

用逐点曝光的方式, 制作周期长且难以获得高质量、高分辨率的图像。通过数字微镜器件调制光的空分布^[2], 生成可编程动态掩模, 实现面阵曝光, 能大幅缩短光刻所需时长、提高生产效率。相比于有掩模光刻技术, LDI 机依据需求快速改变掩模形状, 解决了掩模版制作周期长、成本高的问题, 具备灵活、高效、成本低等优势。靶标识别对位工序是 LDI 机光刻的前置工序^[3], 即通过视觉算法捕获靶标图像, 快速识别靶心坐标并将其转

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(U24A20108); 广东省自然科学基金(2025A1515011189); 江西省赣鄱英才计划(jxkjcytd2024001); 广州市基础与应用基础研究项目(202201010398)

化为基板位置与形变信息。对曝光图像数据进行线性涨缩与仿射变换,修正曝光图像与基板间的映射关系^[4]。

光照不佳是影响靶标识别精度的扰动。光照均匀性、光源波长与照明强度影响图像清晰度和对比度^[5-6]。光照条件设置合理可提高图像质量和靶标识别精度。光照不均、光源选型不当或光强过暗导致图像前景与背景的对比较低,降低靶标识别精度^[7-8]。目前主要从扰动发生前后两阶段研究光照不佳造成的影响。扰动发生前,设置良好的光照条件,直接遏止扰动的产生。SHAO等^[9]使用数字微镜器件调制照明光源来抑制强光干扰,提高视觉成像的可见度和准确度。WANG等^[10]采用结合分光镜的同轴照明方案,消除物体表面不平整造成的阴影,提高成像清晰度。扰动发生后,通过图像增强减小光照不佳的影响。石吉豪等^[11]设计的图像增强算法可提高光照不均环境下的图像质量。姚宇捷等^[12]采用深度学习算法强化目标检测算法的抗光照能力。LDI机基板类型多,对光照条件的需求多样化,因此靶标识别更易受到光照不佳的干扰。

离面位移(被测对象偏离“理想聚焦平面”的位移)也是影响靶标识别精度的扰动。视觉测量中,离面位移不但导致图像产生离焦模糊,损失细节信息,影响测量结果^[13-15],还会改变像平面的成像大小,引起额外虚应变,降低测量精度^[16-17]。WANG等^[18]建立了离面位移与微视觉运动追踪精度劣化间的线性映射。WU等^[19]在基于显微视觉的逆变器位移测量研究中提到,离面位移会引起离焦模糊并导致测量误差。LDI机的靶标识别工序中,对位台高频加/减速时的振动、气压吸附带来的抖动、大面积基板的翘曲变形广泛存在,易产生离面位移^[20]。小振幅或低频段的离面位移产生的误差小,在常规场景中可忽略其影响^[21]。LDI机对靶标识别精度的要求较高,因此离面位移的干扰不能忽视。

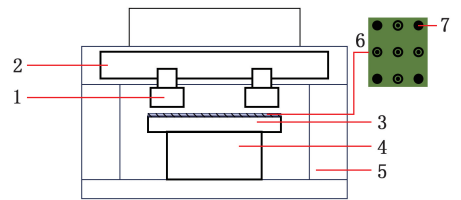
图像破损、残缺、变形、污染等靶标异常仍是影响靶标识别精度的扰动。单独一种类型的异常现象对靶标识别精度的影响可能较小。实际的靶标异常一般是若干种异常的叠加,对靶标识别精度造成严重影响,甚至导致识别失败,进而使视觉对位无法完成,造成LDI机停机、降低产能。

针对扰动源影响LDI机靶标识别性能的问题,笔者设计了稳健性强的靶标识别算法,搭建扰动激励与测试系统,量化评估扰动对靶标识别性能的影响,测试所设计靶标识别算法的抗扰性能。

1 LDI机靶标识别算法的设计

1.1 LDI机寻靶装置的设计

工业生产常用基板的最大尺寸为 $620\text{ mm}\times 720\text{ mm}$,厚度为 $0.15\sim 4.00\text{ mm}$,靶标直径 3 mm 。如图1所示,对位台A和B固定在大理石基座上,寻靶装置安装在对位台A的输出端。吸盘固定在对位台B的输出端,通过气动真空吸附的方式固定基板。针对大面积基板的靶标识别需求,将对位台A的X轴行程设为 1280 mm ,将对位台B的Y轴行程设为 1470 mm 、Z轴行程设为 17 mm 。对位台均由光栅尺闭环反馈,并通过运动控制卡伺服控制,定位精度为 $\pm 10\text{ }\mu\text{ m}$ 。



1.寻靶装置 2.对位台A 3.吸盘 4.对位台B 5.基座
6.基板 7.靶标

图1 LDI机寻靶装置的结构

Fig.1 Structure of targeting device for LDI machine

寻靶装置由工业相机、远心镜头和LED光源组成。远心镜头放大倍数恒定,对物距不敏感,畸变比定焦镜头小^[22-23]。光源设于镜头下方,光源控制器量化调制光照强度与光的颜色。为适配多种类型与底色的基板,光源可发出不同波长的光线。寻靶装置与对位台协同运动,实现靶标的视觉识别及对位。

1.2 LDI机靶标识别算法的设计

LDI机基板的靶标有圆形、圆环、梅花孔、矩阵、十字、拐角等。圆形与圆环具备旋转不变性、结构简单、易被识别、便于生产等优势,使用频率最高,故本文将圆形和圆环靶标作为对象,设计识别算法。

首先,通过图像滤波降低噪声,减小算法后续处理难度,并通过下采样降低分辨率、提高算法速度^[24]。其次,通过阈值分割和Canny边缘检测^[25]分别获取原始图像的边缘检测结果 I_1 。和下采样后图像的边缘检测结果 I_2 ,并使用Freeman链码优化轮廓、减小伪边缘影响。之后,提出随机一点与随机三点自适应切换的取点求圆策略,设计改进的随机霍夫变换(revised randomized Hough transform, RRHT)算法对 I_1 进行识别,通过采用随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)对 I_2 进行再拟合,获取靶标参数。靶标识别算法的执行流程如图2所示。

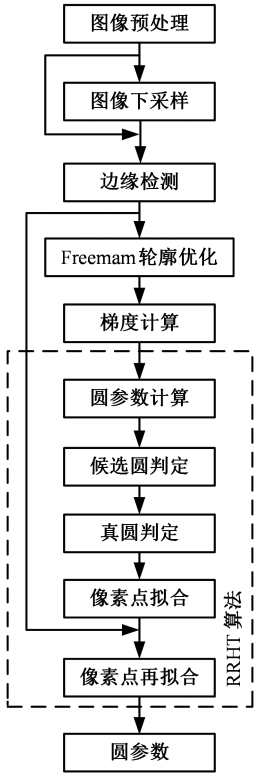


图 2 靶标识别算法的执行流程

Fig.2 Execution flow of the target recognition algorithm

1.2.1 Freeman 链码优化边缘轮廓

Freeman 链码以数字 0~7 对邻接像素点所在方位进行编码来描述一维边界轮廓。结合边缘图 Freeman 链码与圆轮廓特性筛选像素点,以保留圆轮廓近似部分。轮廓的归一化评价标准^[26]为

$$\psi_i = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{k=0}^{N_i-2} p_{ik} q_{ik} \quad (1)$$

$$p_{ik} = \begin{cases} 0 & |e_{ik}| > 1 \\ 1 & |e_{ik}| \leq 1 \end{cases}$$

$$q_{ik} = \begin{cases} |e_{ik}|^2 & |e_{ik}| > 1 \\ 0 & |e_{ik}| \leq 1 \end{cases}$$

式中: N_i 为第 i 条轮廓的像素点数量; e_{ik} 为第 i 条轮廓中第 k 个像素点的差分码。

设置像素数量最小值 N_{\min} 、最大值 N_{\max} 、阈值 C_ψ , 定义圆轮廓判定标准 $Q(C_i, N_{\min}, N_{\max}, C_\psi)$, 其中, C_i 为图像第 i 条轮廓。 $N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max}$ 和轮廓的归一化评价标准 $\psi_i < C_\psi$ 同时满足时, 保留 C_i 供进一步计算。

通过 Freeman 链码对边缘轮廓进行优化, 消除噪声和伪边缘的干扰, 增强算法在噪声较多或图案复杂场景下的鲁棒性, 提高后续圆轮廓识别算法的性能。

1.2.2 RRHT 算法增强识别效率及稳健性

RRHT 算法包括 5 个阶段: 圆参数计算、候选圆判定、真圆判定、像素点拟合、像素点再拟合。前 4 个阶段均在下采样后图像的边缘检测结果 I

中进行, 像素点再拟合阶段在原始图像的边缘检测结果 I_0 中进行。下采样操作降低图像分辨率, 减少图像噪声。在下采样边缘图中处理图像可节约大量时间, 但下采样边缘图丢失图像的部分信息、引入误差。因此, 本文基于下采样边缘图的计算结果, 在原边缘图中划分环形区域, 通过对环形区域的再拟合来保证检测精度。

传统的随机霍夫变换通过随机选取的 3 个像素点计算候选圆参数。这种取样方法存在盲目性, 会引入大量的无效计算。将随机取三点改为随机取一点有助于提高采样概率和算法效率。假设一张图包含 n 个像素数量均为 m_1 的圆边缘, 非圆边缘的像素数量总共为 m_2 , 则 3 个像素点属于同一个圆(半径确定, 位置不确定)的概率为

$$P_1 = \frac{nC_{m_1}^3}{C_{nm_1+m_2}^3} \approx \frac{nm_1^3}{(nm_1+m_2)^3} \quad (2)$$

取样点数为 1 时落在圆内的概率为

$$P_2 = \frac{nC_{m_1}^1}{C_{nm_1+m_2}^1} \approx \frac{nm_1}{nm_1+m_2} \quad (3)$$

显然, 随机取一点落在圆内的概率要大于随机取三点落在同一圆内的概率。本文在此基础上提出的 RRHT 算法包含 5 个阶段:

1) 圆参数计算。基于 Sobel 算子计算下采样边缘图梯度方向, 记为 $G(x, y)$ 。剔除下采样边缘图中梯度方向(根据图像的局部像素变化计算, 采用度数表示)为 $-180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 的像素点, 随机选取点 $A(x_1, y_1)$ 。依据点 A 处的梯度方向 $G(x_1, y_1)$, 取像素点 $B(x_2, y_2)$ 与 $C(x_3, y_3)$, 取点方法如图 3 所示^[27]。

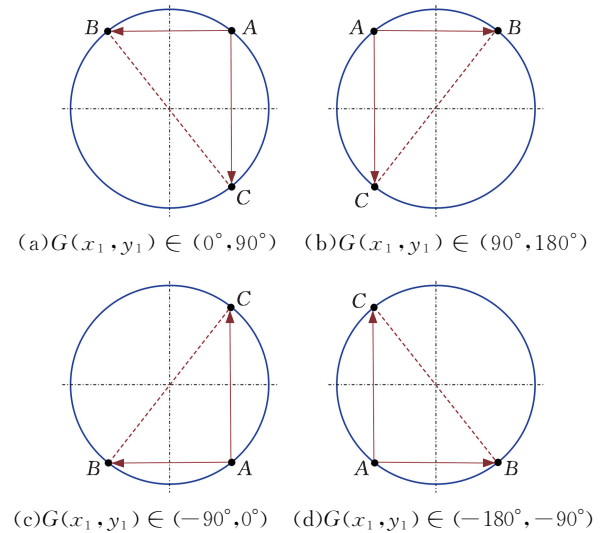


图 3 像素点 B 与 C 的选取方法

Fig.3 Selection method of the pixel point B and C

若 $G(x_1, y_1) \in (0^\circ, 90^\circ)$, 则根据图 3a 随机选取像素点 $B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$, 其中, $x_2 <$

$x_1, y_2 = y_1, x_3 = x_1, y_3 > y_1$ 。若 $G(x_1, y_1) \in (90^\circ, 180^\circ)$, 则根据图 3b 随机选取像素点 $B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$, 其中, $x_2 > x_1, y_2 = y_1, x_3 = x_1, y_3 > y_1$ 。若 $G(x_1, y_1) \in (-90^\circ, 0^\circ)$, 则根据图 3c 随机选取像素点 $B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$, 其中, $x_2 < x_1, y_2 = y_1, x_3 = x_1, y_3 < y_1$ 。若 $G(x_1, y_1) \in (-180^\circ, -90^\circ)$, 则根据图 3d 随机选取像素点 $B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$, 其中, $x_2 > x_1, y_2 = y_1, x_3 = x_1, y_3 < y_1$ 。

通过上述方法, A, B, C 三点构成直角三角形, 斜边 BC 的长度为直径, 中点为圆心。圆参数的计算公式为

$$(x, y) = ((x_2 + x_3)/2, (y_2 + y_3)/2) \quad (4)$$

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_3 - y_1)^2} / 2 \quad (5)$$

式中: $(x, y), r$ 分别为 A, B, C 三点的外接圆圆心坐标和半径。

为减少无效计算, 依据已知靶标信息设置靶标的最小半径 r_{\min} 与最大半径 r_{\max} , 仅当 $r_{\min} < r < r_{\max}$ 时, 通过式(4)计算圆心坐标, 进入候选圆判定阶段。对于半圆或劣弧, 随机取一点拟合圆参数的策略将失效, 通过点 A 仅能获取点 B 或点 C , 无法计算圆参数, 但随机取三点计算外接圆的策略不会失效, 因此, 设计基于比例因子 λ_c 的自适应切换取点策略。 $\lambda_c \geq 0.5$ 时, 采用随机取单点的改进策略计算圆参数; $\lambda_c < 0.5$ 时, 采用随机取三点的传统策略计算圆参数。

2) 候选圆判定。设置阈值 L_1 。圆半径 r 满足 $r_{\min} < r < r_{\max}$ 时, 计算下采样边缘图中每个像素点到圆心的距离 d_1 。统计满足条件 $r - L_1 < d_1 < r + L_1$ 的像素点数量 q_1 。若 $q_1 > 2\pi r \lambda_c$, 将圆参数 (x, y, r) 对应的圆视为候选圆 $O(x, y, r)$ 。

3) 真圆判定^[28]。设置阈值 L_2 , 基于候选圆 $O(x, y, r)$ 定义随机采样区域和证据收集区域。随机采样区域是半径 $r - L_2, r + L_2$ 的圆组成的同心圆环, 证据收集区域是半径 $r - 2L_2, r + 2L_2$ 的圆组成的同心圆环。两区域的圆心均为 (x, y) 。真圆判定的 4 个步骤如下:

① 定义最大循环次数 t , 令当前循环次数 $i = 0$;

② 从随机采样区域中抽取 3 个点(任意两点的距离大于 ϵ) 计算外接圆参数 (x', y', r') ;

③ 统计证据收集区域中落在外接圆参数对应的圆 $O'(x', y', r')$ 上的像素点个数 q_2 , 若 $q_2 > 2\pi r \lambda_c$, 则判断候选圆 $O(x, y, r)$ 为真圆; 否则为假圆, 令 $i \leftarrow i + 1$;

④ 若 $i < t$, 则跳转至 ②, 继续真圆判定; 否则, 候选圆无法成真圆, 返回第一阶段。

4) 像素点拟合。设置阈值 L_3 , 计算下采样边缘图中每个像素点到真圆 $O(x, y, r)$ 的距离

$$d''_i = | \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - R_0 | \quad (6)$$

式中: (x_i, y_i) 为下采样后图像的边缘检测结果 I 中的像素点坐标位置。

$r - L_3 < d''_i < r + L_3$ 时, 从边缘图中记录对应像素点的坐标位置至集合 P 。采用最小二乘法对集合 P 中元素进行圆拟合, 获取更精确圆参数 (x_0, y_0, r_0) 。 (x_0, y_0, r_0) 是下采样边缘图中的计算结果, 需将其转换回原边缘图的坐标系:

$$(X_0, Y_0, R_0) = 2^{n_{\text{pyr}}-1} (x_0, y_0, r_0) + (a, b, c) \quad (7)$$

式中: (X_0, Y_0, R_0) 为原边缘图坐标系中的圆参数; n_{pyr} 为下采样次数; (a, b, c) 为补偿值。

5) 像素点再拟合。设置阈值 L_4 , 计算边缘图中每个像素点到 (X_0, Y_0, R_0) 对应圆的距离

$$d'''_i = | \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} - R_0 | \quad (8)$$

式中: (X_i, Y_i) 为原始图像的边缘检测结果 I_0 中的像素点坐标。

统计满足 $R - L_4 < d'''_i < R + L_4$ 的像素点数量 q_3 。若 $q_3 > 2\pi R_0 \lambda_c$, 则将满足条件的像素点的坐标位置记录至集合 P' , 通过最小二乘法对集合 P' 中的元素再次进行圆拟合, 得出圆参数 (X, Y, R) ; 否则, 返回圆参数计算阶段。

返回的圆参数 (X_0, Y_0, R_0) 与实际圆参数 (X_a, Y_a, R_a) 存在偏差, 因此, 阈值 L_4 应较大, 以确保实际圆参数 (X_a, Y_a, R_a) 对应的圆边缘能尽量落在转移区域中, 实现边缘的完整转移, 如图 4 所示, 图中红色表示转移区域, 紫色表示实际圆。

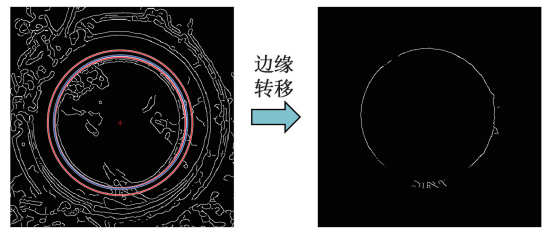


图 4 圆边缘的完整转移

Fig.4 Complete transfer of the circular edge

最小二乘法对离群值敏感。阈值 L_4 较大时, 实际圆边缘附近的离散像素点噪声或伪边缘一同被转移, 影响圆拟合^[29]。为保证拟合准确性, 在像素点再拟合阶段采用 RANSAC 算法拟合圆。

RANSAC 算法通过随机采样数据点估计圆形几何参数, 依据阈值判定数据点是否符合圆形几何约束条件。通过迭代, 去除离群值干扰, 得到稳健的拟合结果。拟合步骤如下:

1) 初始化参数。令 $i = 0, q_{\max} = 0$, 设置迭代次数 t' 和阈值 k 。

2) 圆形拟合。随机选取 3 点, 计算圆参数

(x', y', r') , 计算图中每个像素点到圆心 (x', y') 的距离 d_4 。统计满足条件 $r' - k < d_4 < r' + k$ 的像素数量 q_4 , 令 $t \leftarrow t + 1$;

3) 圆参数更新。若 $q_4 > q_{\max}$, 则更新参数 (X, Y, R) , 并令 $(X, Y, R) = (x', y', r')$, $q_{\max} = q_4$ 。

4) 重复迭代。若 $i < t'$, 则返回步骤 2); 否则结束迭代, 输出 (X, Y, R) 。

1.2.3 RRHT 算法的具体流程

RRHT 算法的具体流程, 如图 5 所示, 图中, i_0 为当前的连续采样失败次数, i_{\max} 为可容忍的最大连续采样失败次数, n_c 为检测的圆数量。

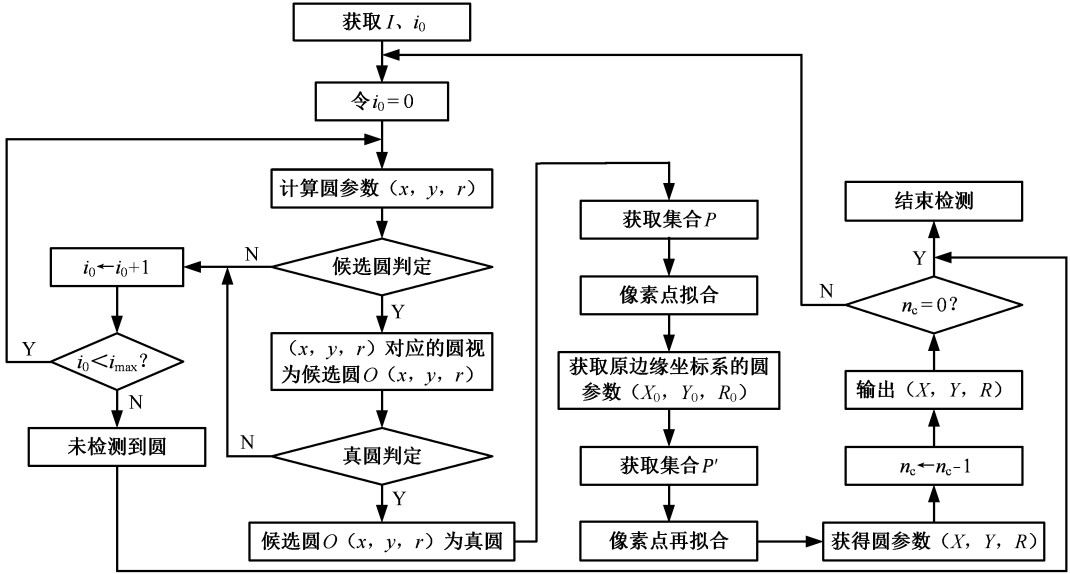


图 5 RRHT 算法的流程

Fig.5 Flowchart of the RRHT algorithm

1.3 LDI 机靶标识别算法的性能评价指标

将与无扰动激励下的算法识别结果平均绝对偏差

$$D_{ev} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |l_i - l_{oi}| \quad (9)$$

式中: l_i, l_{oi} 分别为有扰动与无扰动的算法识别结果。作为评价靶标识别算法精度的指标。将单个靶心坐标的平均耗时 t_{ac} 作为评价靶标识别算法速度的指标, 将多次测量的单个靶标 X 轴坐标、Y 轴坐标和半径 R 的标准偏差

$$\left. \begin{aligned} d_x &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ d_y &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \\ d_R &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: x_i, y_i, R_i 分别为第 i 次测试靶心的 X 轴坐标、Y 轴坐标和半径 R ; $\bar{x}, \bar{y}, \bar{R}$ 分别为 X 轴坐标、Y 轴坐标和半径 R 的平均值; n 为测试次数。

作为评价靶标识别算法稳定性的指标。

2 光照扰动对 LDI 机靶标识别的影响

2.1 光照扰动的分析

LDI 机的 LED 光源属于朗伯体光源, 其光强分布遵循朗伯定律^[30-31]。被测对象表面为朗伯

反射表面时, 成像面辐照度为

$$E = \frac{\rho E_0 e^{-\mu r} \cos \theta}{4A^2 r^2} \frac{L - f'}{f'} \tau(\omega) h(\omega) C(\omega) \cos^4 \omega \quad (11)$$

式中: ρ 为物体表面反射率; E_0 为光源光强; μ 为大气衰减系数; r 为光源至被测对象间距; θ 为入射角; A 为 F 制镜头光圈系数, $A = f'/D$; f' 为焦距; D 为物镜口径; L 为物距; ω 为视场角; $\tau(\omega)$ 为透光率; $h(\omega)$ 为渐晕系数; $C(\omega)$ 为杂光系数。

由式(11)可知, 像平面的照度与光强、物体表面的反射率、入射角的余弦值正相关, 与光源至物体距离负相关。选取强度、入射角与距离作为控制变量, 对光照进行可控量化设计, 如图 6 所示。

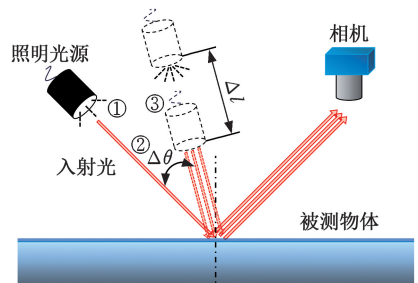


图 6 光照的可控量化控制

Fig.6 Controlled quantitatively control of lighting conditions

光源波长与透射率呈正相关。基板有绿色、蓝色、黑色等不同底色。为适配基板的颜色与材

质,获取清晰的靶标图像,需根据基板的光谱反射特性及材质透射特性选择合适的波长 λ (593 nm、627 nm、949 nm)与辐照度 E (100 lx、2500 lx、36 000 lx与40 000 lx)。

2.2 离面位移的影响分析

依据视觉成像的原理,分析离面位移导致靶标识别算法劣化的机理。如图7所示,被测对象在焦平面 p 时,入射光经镜头汇聚于像平面 p' ,图片清晰。被测对象移动到面 p_1 时,入射光汇于 p'_1 ,在像平面上形成弥散圆,图像模糊。被测对象向镜头移动时,图像因弥散圆模糊。基于成像公式及三角形相似原理,得弥散圆直径

$$d = VD\left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U + \Delta u}\right) \quad (12)$$

式中: V 为 p' 与镜头的间距; U 为物体与镜头的间距; Δu 为离面位移。

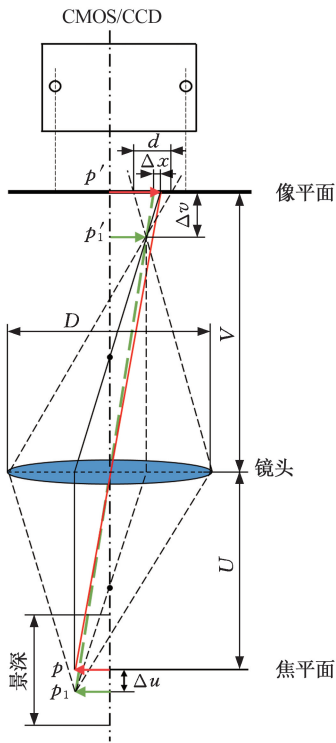


图7 视觉寻靶的光学原理

Fig.7 Optical principle of the visual targeting

由式(12)可知,弥散圆直径 d 与离面位移 Δu 正相关。被测对象与焦平面的距离越大,弥散圆直径越大,图像越模糊。被测对象与焦平面的间距在一个景深(depth of field, DoF)内时,弥散圆直径小于传感器像元大小,人眼无法分离离焦模糊造成的影响。

被测对象从平面 p 偏离至平面 p_1 时,它从物平面到像平面的三维坐标变换会引发投影几何畸变,从而引入虚位移 Δx ,导致测量结果产生误差。通过理论计算^[16]可得离面位移产生的虚位移 Δx 和虚应变 ϵ :

$$\Delta x = x\Delta u/U \quad (13)$$

$$\epsilon = \Delta u/U \quad (14)$$

式中: x 为物体未发生离面位移时在像平面上的长度。由式(13)、式(14)可知,虚应变与离面位移 Δu 正相关,与物距 U 负相关。

离面位移引起图像离焦模糊,引入虚位移,且这种劣化的影响随放大倍数增大而更严重。离面位移与光源强度耦合,通过改变光源到被测对象的距离改变像平面照度。

2.3 靶标破损的影响分析

钻孔精度、激光能量稳定性、压膜贴合度的问题会引起边缘变形、破损毛刺、油墨污染、边缘泛白、背景混淆、对比度低等靶标异常^[3,32],如图8所示。

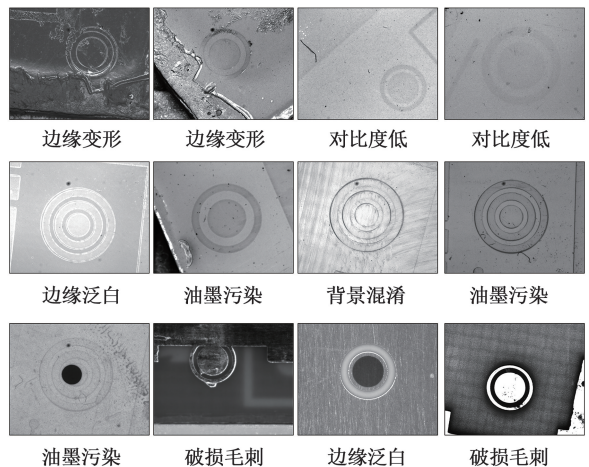


图8 来自应用场景的典型靶标异常

Fig.8 Typical target anomalies from application scenarios

靶标对比度低可通过设置合适的光照条件来弥补。边缘变形、破损毛刺等异常难被弥补,如破损毛刺使靶标丧失部分轮廓,引入杂质噪声,降低成像信噪比。靶标异常导致轮廓边缘存在大量噪声,影响靶标识别算法的识别结果。

为探究破损对靶标识别算法识别结果的影响,以直径3 mm的圆形图案为基础,参考实际应用场景中的缺陷设计异常靶标,如图9所示。正常靶标为同心圆环结构,内圆直径为3 mm,圆环与内圆间距0.5 mm,圆环径向宽度为0.5 mm。为设计异常靶标,本文在正常靶标的基础上,以15°圆心角为单位,在0°~270°的范围内,对圆心角对应的内圆区域进行缺陷设计,共设计异常靶标19个。三类扰动源的可控量化设计如图10所示。

3 LDI机靶标识别算法的抗扰性能测试

3.1 视觉寻靶装置样机的搭建与靶标识别算法测试

3.1.1 视觉寻靶装置的样机搭建

为量化表述“光照强度、离面位移、靶标异常

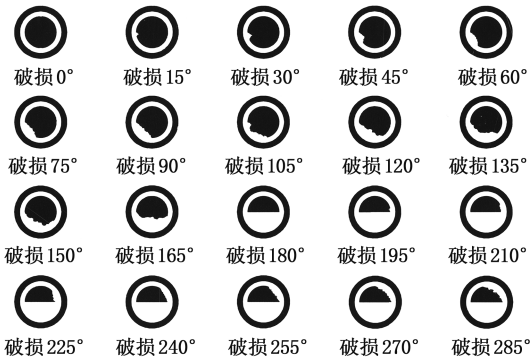


图 9 破损靶标的设计

Fig.9 Design of broken targets

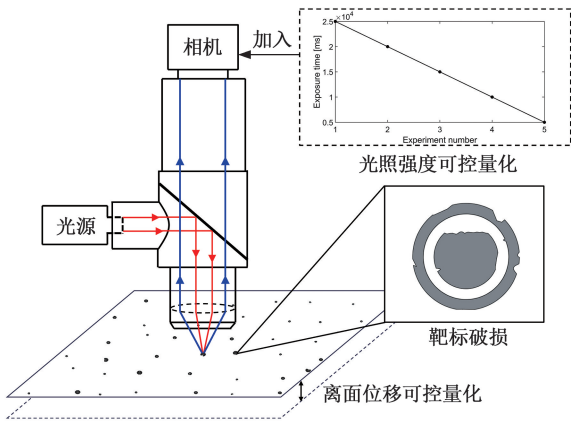
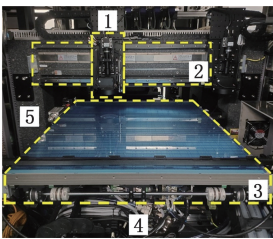


图 10 三类扰动源的可控量化设计

Fig.10 Controllable quantifiable design of three disturbances

对 RRHT 靶标识别算法的影响,评估所设计算法的抗扰性能,搭建了视觉寻靶样机。视觉寻靶样机由 CMOS 面阵相机(海康威视 MV-CU050-60GM)与远心镜头(视清科技 WWK05-110-230-D20)组成。工作距离为 110 mm,视野 14.40 mm×10.80 mm,景深 1.10 mm。LED 环形光源为锐视光电 P-RL-105-65-RYIR850,LDI 机视觉寻靶装置的样机如图 11 所示。



1.寻靶装置 2.对位台 A 3.吸盘 4.对位台 B 5.基座

图 11 LDI 机视觉寻靶装置的样机

Fig.11 Prototype of LDI machine visual targeting device

异常靶标由 LDI 机(科视光学 KST-DI2428-6FHB)光刻。对位台均由伺服电机(松下 MHMF082L1V2M)驱动,对位台 A 的 X 轴和对位台 B 的 X 轴、Y 轴均通过光栅尺(分辨率 0.1 μm,雷尼绍)测量反馈。带动寻靶装置的对位台

A 的 X 轴定位精度为 1.10 μm,重复定位精度为 0.90 μm。带动基板对位并在 Z 轴生成可控离面位移的对位台 B 的 Y 轴、Z 轴的定位精度分别为 1.64 μm 和 5.50 μm,重复定位精度分别为 1.45 μm 和 1.90 μm。

3.1.2 下采样层数对靶标识别算法效率的影响

硬件平台的 CPU 为 Intel i7-13700H、内存为 16 G,操作系统为 Windows 11,开发环境为 MATLAB R2023b。靶标图像采用分辨率为 1280×1024 像素的靶标灰度图和二值仿真图(图 12)。

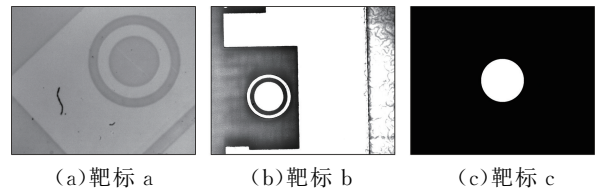


图 12 靶标灰度图和二值仿真图

Fig.12 Grayscale target image and binary simulation image

测试过程中的参数如表 1 所示,其中,仅当采样层数 $n_{pyr} = 1$ 时, $L_4 = 2$, 阈值 $k = 1$ 。

表 1 RRHT 算法的参数设置

Tab.1 Parameters configuration of the RRHT algorithm

物理量	数值	物理量	数值
待测圆半径 R		阈值 L_1	1
最小半径 r_{min}	$\frac{R}{1.05 \times 2^{n_{pyr}-1}}$	阈值 L_2	1
最大半径 r_{max}	$\frac{1.05R}{2^{n_{pyr}-1}}$	阈值 L_3	2
圆轮廓完整度 λ_c	0.75 ~ 0.85	阈值 L_4	2 或 R/20
下采样层数 n_{pyr}	1 ~ 4	阈值 L_5	R/10
采样间距 ϵ	1	迭代次数 t'	2500
检测圆数量 n_c	1	阈值 k	1 或 3

为测试下采样层数的影响,将下采样层数设为 1 ~ 5 并进行测试。每次测试(一个下采样层数的测试)均重复 55 次以减小随机误差,提高实验的可靠性和准确性。进行 55 组重复测试的过程中,由于设备初期的运行状态尚未稳定,前几次测试的算法耗时总是略大于后续测试的算法耗时。为保证测试结果的准确性,舍弃前 5 次不准确的测试结果。结果如表 2 所示。

表 2 下采样层数对靶标识别时间的影响

Tab.2 Effects of numbers of down-sampling layers on the recognition time of the targets

n_{pyr}	识别时间 /s			改善效果 /%
	靶标 a	靶标 b	靶标 c	
1	0.199	0.143	0.142	0
2	0.110	0.105	0.083	38.45
3	0.086	0.073	0.073	52.22
4	0.076	0.062	0.067	57.49
5	0.070	0.043*	0.065	60.45

注: * 表示算法失效,未代入计算提升百分比。

由表 2 可知,下采样加速方法显著提升算法效率。未进行下采样即 $n_{pyr} = 1$ 时,靶标识别时间略小于 0.2 s;采用下采样加速方法后,随着下采样层数的增大,靶标识别算法的运行速度不断提高, $n_{pyr} = 5$ 平均节约 60.45% 的计算时长。

下采样加速方法通过降低图像分辨率来提高效率,但多次进行下采样会丢失图像的大量信息,影响算法精度与稳定性,甚至导致算法失效。如表 2 所示, $n_{pyr} = 5$ 时,算法无法识别靶标 b。效率提升效果随下采样层数的增加而降低。为兼顾效率与精度,下采样层数设为 3 或 4 比较合理。

3.2 算法抗扰性能测试

测试算法性能前,向 LDI 机导入靶标设计资料,获取靶心理论值(X_0, Y_0, R_0)。对位台 A 与对位台 B 协同运动,将靶标移至寻靶装置视野中心。

基板为蓝底,表面涂覆的感光油墨易受白光影响而分解,影响靶标图案的质量,因此测试在黄光环境进行。无扰动时,光源波长 λ 取 593 nm,辐照度 E 取 35 886 lx,离面位移取零,相机曝光时间取 15 ms。测试所用靶标图像大小为 2592×1944 像素,测试过程中 n_{pyr} 始终为 4。为保证算法在不同光照强度、离面位移、靶标异常下可成功识别,在测试过程中调整参数。每组测试重复 55 次,处理数据时舍弃前 5 次测试结果。

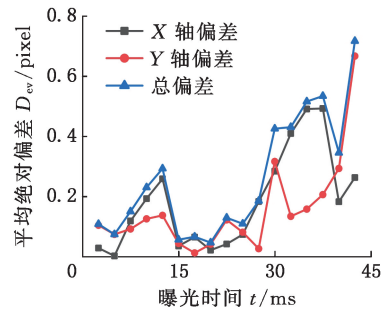
3.2.1 光照强度的算法抗扰性能测试

光照强度、相机增益、光圈与曝光时间对图像质量的影响近似。通过调节曝光时间来模拟不同光照强度对图像的影响,量化光照强度的扰动。保持靶标位置不变,曝光时间以 2.5 ms 为单位从 0 开始逐渐增加至 42.5 ms,且测试过程中未加入扰动(离面位移和靶标异常)。以曝光时间 15 ms 的识别结果为基准,计算偏差 D_{ev} ,测试结果如图 13 所示。

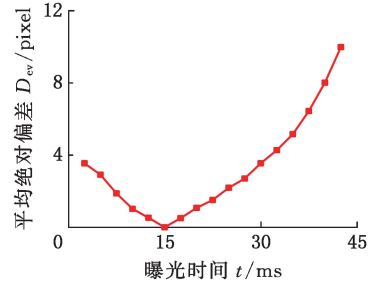
由图 13 可知,过曝光(曝光时间大于 30 ms)与欠曝光(曝光时间小于 15 ms)均不利于靶标识别,但过曝光的影响更严重。由图 13a、图 13b 可知,RRHT 算法计算的圆心位置偏差随曝光时间的增长而先降后升;曝光时间对 R 偏差的影响显著线性相关。由图 13c、图 13d 可知,算法稳定性和效率仅受过曝光的影响:曝光时间为 30.0~42.5 ms 时,RRHT 算法的稳定性随曝光时间的增长而降低;曝光时间为 20.0~42.5 ms 时,RRHT 算法的平均耗时随曝光时间的延长而缩短。因此,将曝光设为 15~20 ms 利于算法执行。

3.2.2 离面位移的算法抗扰性能测试

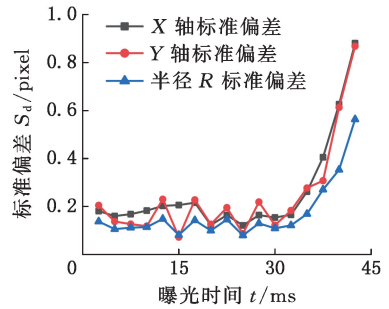
测试过程中,靶标位置不变,以镜头景深的整



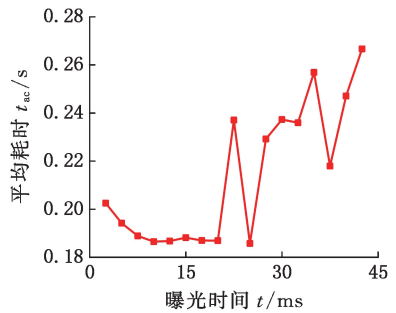
(a)对圆心位置计算偏差的影响



(b)对半径计算偏差的影响



(c)对重复定位精度的影响



(d)对算法平均耗时的影响

图 13 光照强度对靶标识别算法精度、速度和稳定性的影响

Fig.13 Effect of light intensity on the accuracy, speed and stability of target recognition algorithm

数倍设置离面位移的幅值。由于对位台 B 的 Z 轴行程为 17.00 mm,焦面位于 Z 轴行程范围内的 9.80 mm 处,因此以景深 D_f 为单位控制对位台 B 在 $-8D_f \sim 5D_f$ 范围生成不同振幅的离面位移(总计 14 组)。以无离面位移即被测对象在焦平面的算法识别结果为参照,计算偏差 D_{ev} (未加入扰动光照条件和靶标异常),测量结果如图 14 所示。

由图 14 可知,离面位移对算法精度的影响显

表 3 线性拟合结果

Tab.3 Linear fitting results

指标	$-8D_f \sim 0$	$0 \sim 5D_f$
X 轴偏差	$\alpha = -0.511\beta + 0.604$	$\alpha = 0.764\beta + 0.209$
总偏差	$\alpha = -0.512\beta + 0.623$	$\alpha = 0.868\beta + 0.121$
R 偏差	$\alpha = -3.523\beta + 0.604$	$\alpha = 3.331\beta - 0.483$

3.2.3 靶标异常的算法抗扰性能测试

以圆环的外圆坐标和内圆坐标的识别结果之差为参照计算定位偏差 D_{ev} , 未加入光照条件和离面位移扰动, 测试结果如图 15 所示。

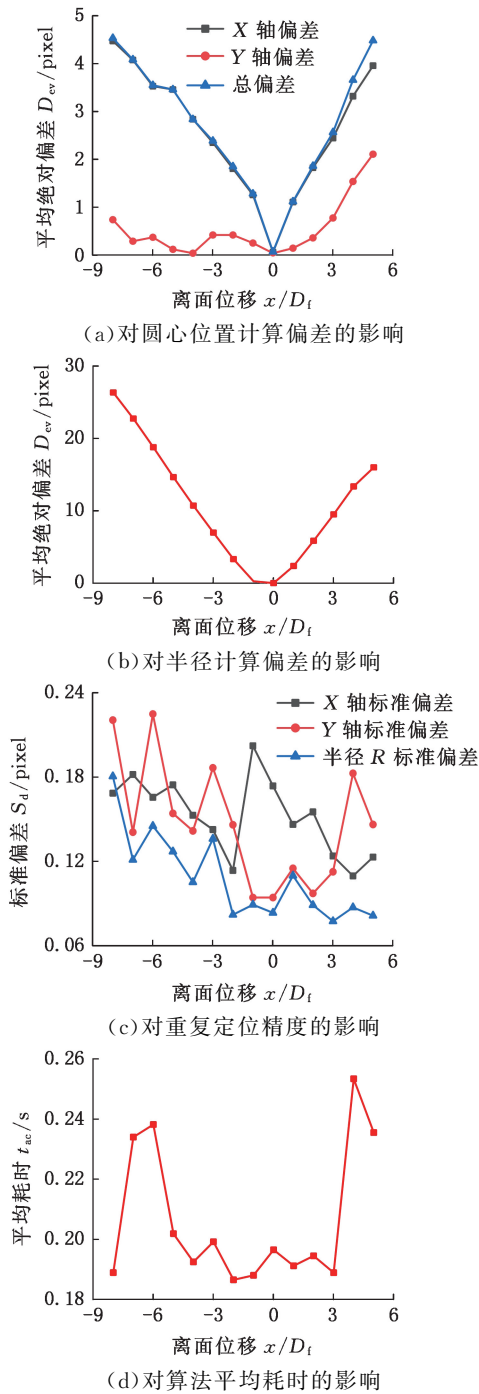


图 14 离面位移对靶标识别算法精度、速度和稳定性的影响

Fig.14 Effect of out-of-focused-plane displacements on the accuracy, speed and stability of target recognition algorithm

著, 对算法稳定性和效率的影响不显著。离面位移与圆心位置的 X 轴偏差和总偏差, 以及半径偏差显著线性相关, 但对圆心位置的 Y 轴偏差和平均耗时的影响不显著。线性拟合结果如表 3 所示, 表中的 α 、 β 分别为算法识别结果的平均绝对偏差和离面位移幅值。每增加 1 个景深的离面位移, 圆心位置的 X 轴偏差和总偏差至少增加 0.5 个像素, 半径偏差至少增加 3 个像素。

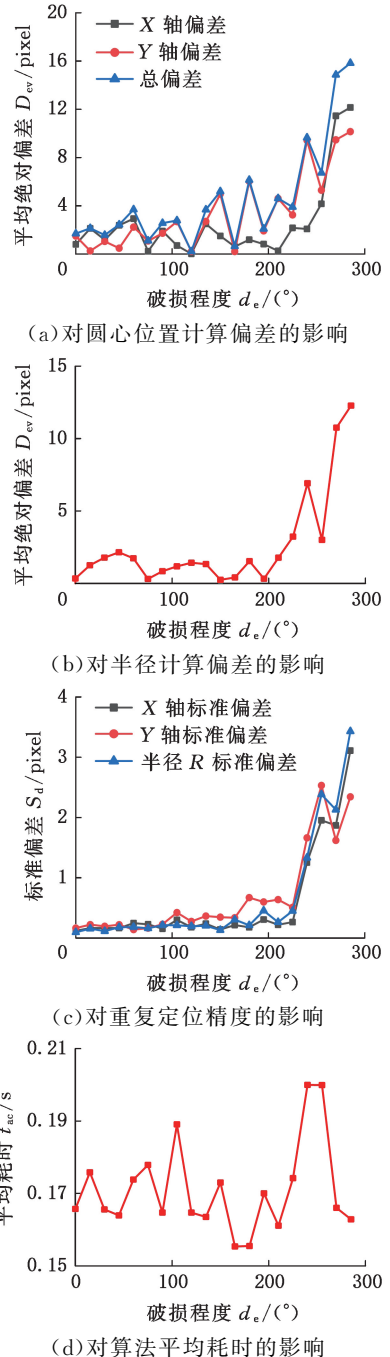


图 15 靶标破损对靶标识别算法精度、速度和稳定性的影响

Fig.15 Effect of target breakage on the accuracy, speed and stability of target recognition algorithm

由图 15 可知,靶标破损显著劣化靶标识别算法的精度与稳定性,但对算法速度的影响不明显。RRHT 算法对破损区域圆心角小于 200° 的靶标具有稳健性,算法性能劣化不明显;破损区域圆心角超过 200° 时,算法的精度与稳定性随破损区域圆心角的增大而快速下降。

3.2.4 三种扰动源激励前的空白组性能

在测试三种扰动前进行空白组的性能测试,光源波长取 593 nm,辐照度取 35 886 lx,离面位移取零,相机曝光时间取 15 ms。测试数据如表 4 所示,LDI 机硬件及算法的起始性能指标在三种扰动激励测试前是相近的。

表 4 三种扰动激励前的空白组性能指标

Tab.4 Performance indexes of blank groups before testing for excitation of three disturbance resources

像素

评价指标	光照强度	离面位移	靶标异常
d_x	0.206	0.174	0.120
d_y	0.073	0.094	0.165
d_R	0.081	0.083	0.095
t_{ac}	0.188	0.196	0.166

4 结论

本文提出了稳健性较强的 LDI 机靶标识别算法,并研究了光照强度、离面位移、靶标异常这三类扰动对 LDI 机靶标识别的影响。设计了扰动的量化激励生成测试系统,生成了可控量化的扰动。使用靶标识别精度、速度与稳定性指标对扰动造成的识别时间进行了量化分析。实验表明,算法在无扰动下的标准偏差最大约 0.206 像素,对单个靶标的识别时间平均小于 0.2 s。

分别加入三种扰动后,靶标识别算法的性能发生不同程度的劣化。光照强度对算法的三项性能指标均造成显著影响,欠曝光(曝光时间小于 15 ms)只劣化算法精度,过曝光(曝光时间超过 20 ms)劣化算法的精度、速度与稳定性。因此,15~20 ms 的曝光有利于算法识别靶标。离面位移仅对算法精度有显著影响,离面位移与圆心位置的 X 轴偏差和总偏差,以及半径偏差显著线性相关,对圆心位置的 Y 轴偏差和算法平均耗时的影响不显著。靶标异常对靶标识别算法的精度和稳定性造成显著影响,但破损区域圆心角小于 200° 时,算法具有稳健性。

后续研究将致力于提高 LDI 机靶标识别算法的稳健性,并对 LDI 机靶标识别对位的后续光刻工艺进行离面位移扰动的量化分析。通过加入可控离面位移来获得离面位移对 LDI 机光刻精

度劣化的影响。

参考文献:

- [1] 何敏菲,朱大钊,王洪庆,等.基于双光子直写的微纳光学器件研究进展[J].光学学报,2023,43(16):203-218.
HE Minfei, ZHU Dazhao, WANG Hongqing, et al. Advancements in Micro-Nano Optical Device Based on Two-Photon Direct Writing[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(16):203-218.
- [2] 张思琪,周思翰,杨卓俊,等.基于数字微镜器件的无掩膜光刻技术进展[J].光学精密工程,2022,30(1):12-30.
ZHANG Siqi, ZHOU Sihan, YANG Zhuojun, et al. Research Progress of Maskless Lithography Based on Digital Micromirror Devices[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(1):12-30.
- [3] 方林,董帅,郑超,等.基于人工智能的 LDI 对位靶标精确识别方法探讨[J].印制电路信息,2022,30(11):16-21.
FANG Lin, DONG Shuai, ZHENG Chao, et al. Discussion on Accurate Identification Method of LDI Alignment Target Based on Artificial Intelligence[J]. Printed Circuit Information, 2022, 30(11):16-21.
- [4] 李辉,方林,刘国藩,等.基于多轴对准定位平台提升 LDI 机生产效率的探讨[J].印制电路信息,2022,30(12):1-6.
LI Hui, FANG Lin, LIU Guofan, et al. Discussion on Improving the Production Efficiency of LDI Machine Based on Multi-axis Alignment Positioning Stage[J]. Printed Circuit Information, 2022, 30(12):1-6.
- [5] KOPPARAPU S K. LightingDesign for Machine Vision Application[J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(7):720-726.
- [6] MORENO I. Image-like Illumination with LED Arrays:Design[J]. Optics Letters, 2012, 37(5):839-841.
- [7] 史晨阳,林燕丹.机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计[J].光学学报,2020,40(20):118-128.
SHI Chenyang, LIN Yandan. LED Ring Array Design for Uniform Illumination Imaging in Machine Vision[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20):118-128.
- [8] 张旭,郑泽龙.主动光立体靶检测及其在工业机器人位姿测量中的应用[J].中国机械工程,2016,27(19):2594-2601.
ZHANG Xu, ZHENG Zelong. Active Light Stereo

- Target Detection and Its Applications in Industrial Robot's Pose Measurement[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(19):2594-2601.
- [9] SHAO Wei, LIU Kaibin, SHAO Yunqiu, et al. Smooth Surface Visual Imaging Method for Eliminating High Reflection Disturbance [J]. *Sensors*, 2019, 19(22):4953.
- [10] WANG Rui, YANG Kaiming, ZHU Yu. A High-precision Mark Positioning Algorithm Based on Sub-pixel Shape Template Matching in Wafer Bonding Alignment [J]. *Precision Engineering*, 2023, 80:104-114.
- [11] 石吉豪, 钟羽中, 郑秀娟, 等. 基于光线散射衰减模型的低照度图像增强[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(8):1244-1255.
- SHI Jihao, ZHONG Yuzhong, ZHENG Xiujian, et al. Low-light Image Enhancement Algorithm Based on Light Scattering Attenuation Model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(8):1244-1255.
- [12] 姚宇捷, 彭宇辉, 陈泽辉, 等. 支持抗光照目标检测的改进 YOLO 算法[J]. *汽车工程*, 2023, 45(5):777-785.
- YAO Yujie, PENG Yuhui, CHEN Zehui, et al. An Improved YOLO Algorithm Supporting Anti-illumination Target Detection[J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(5):777-785.
- [13] SU Gaozhao, LU Guoliang, YAN Peng. Planar Motion Measurement of a Compliant Micro Stage: an Enhanced Microscopic Vision Approach [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(5):1930-1939.
- [14] 王瑞洲, 梁灿聪, 蔡远馨, 等. 离面位移激励下微视觉运动追踪精度劣化特性[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1):119-128.
- WANG Ruizhou, LIANG Chicong, CAI Yuanxin, et al. Degradation Characteristics of In-focused-plane Micro-vision Motion-tracking Accuracy Excited by Out-of-focused-plane Displacements [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(1):119-128.
- [15] 房运涛, 王晓东, 徐松, 等. 万向支架微小螺纹副自动装配系统[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(6):698-706.
- FANG Yuntao, WANG Xiaodong, XU Song, et al. Miniature Thread Pairs Automatic Assembly System for Gimbals[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(6):698-706.
- [16] SUTTON M A, YAN J H, TIWARI V, et al. The Effect of Out-of-plane Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10):746-757.
- [17] WANG Lianpo, CHEN Yuangang, LI Hui, et al. Out-of-plane Motion and Non-perpendicular Alignment Compensation for 2D-DIC Based on Cross-shaped Structured Light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134:106148.
- [18] WANG Ruizhou, WU Heng. Design and Test of a Spatial Nanopositioner for Evaluating the Out-of-focus-plane Performance of Micro-vision[J]. *Micromachines*, 2023, 14(3):513.
- [19] WU Heng, ZHANG Xianmin, GAN Jinqiang, et al. Displacement Measurement System for Inverters Using Computer Micro-vision[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 81:113-118.
- [20] SEO C H, JEON Y H, LEE H K, et al. Reaction Force Compensator for High-speed Precision Stage of Laser Direct Imaging Process[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018(1):8324539.
- [21] 王楠, 李恩普, 汤忠斌, 等. 二维数字图像相关方法的拉伸实验误差分析[J]. *光学仪器*, 2012, 34(3):5-12.
- WANG Nan, LI Enpu, TANG Zhongbin, et al. An Investigation of the Experimental Error of 2-D DIC Method Applied to Tensile Strain Measurement[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(3):5-12.
- [22] PAN Bing, YU Liping, WU Dafang. High-accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9):1719-1733.
- [23] PAN Bing, YU Liping, WU Dafang. High-accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements Using Low-cost Imaging Lenses: Implementation of a Generalized Compensation Method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(2):025001.
- [24] 崔海华, 徐振龙, 杨亚鹏, 等. 一种基于深度学习图像超分的环形靶标稳定检测方法[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(23):2861-2867.
- CUI Haihua, XU Zhenlong, YANG Yapeng, et al. A Circular Target Stability Detection Method Based on Deep Learning Image Super-resolution [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(23):2861-2867.
- [25] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986(6):679-698.
- [26] SHANG Ce, TAO Guoliang. An Automatic Assembly Technology for Perforated Discs Based on Contour Optimized Hough Circle Transform[J].

- Applied Mechanics and Materials, 2013, 459:297-303.
- [27] WANG Guojun. A Sub-pixel Circle Detection Algorithm Combined with Improved RHT and Fitting [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(39):29825-29843.
- [28] JIANG Lianyuan. A Fast and Accurate Circle Detection Algorithm Based on Random Sampling[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 123:245-256.
- [29] 肖敏, 庄春刚, 熊振华. 基于机器视觉的液晶显示屏装配尺寸检测算法的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(1):7-11.
- XIAO Min, ZHUANG Chungang, XIONG Zhenhua. Measurement Algorithm of LCD Mounting Dimension Based on Machine Vision [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(1):7-11.
- [30] 祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1):186-191.
- ZHU Zhenmin, QU Xinghua, LIANG Haiyu, et al. Uniform Illumination Study by Light-Emitting Diode Ring Array and Diffuse Reflection Surface [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1):186-191.
- [31] 巢渊, 徐鹏, 唐寒冰, 等. 视觉检测系统 LED 光源照度优化方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12):357-368.
- CHAO Yuan, XU Peng, TANG Hanbing, et al. Illumination Optimization Method of LED Light Source for Visual Inspection System[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12):357-368.
- [32] 李云峰, 李晟阳. 基于梯度方向信息熵的印刷电路板缺陷检测[J]. 中国机械工程, 2017, 28(6):695-701.
- LI Yunfeng, LI Shengyang. Defect Detection for PCBs Based on Gradient Direction Information Entropy[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(6):695-701.
- (编辑 张 洋)
-
- 作者简介:**王瑞洲*, 男, 1990 年生, 副教授。研究方向为柔顺机构、微纳定位与运动控制、微视觉。发表论文 30 余篇。E-mail: wangrz@gdut.edu.cn.
- 本文引用格式:**
王瑞洲, 张宇龙, 王华, 等. 激光直接成像机靶标识识别算法的设计及抗扰性能测试[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1624-1635.
- WANG Ruizhou, ZHANG Yulong, WANG Hua, et al. Design and Anti-disturbance Performance Tests of Target Recognition Algorithm for LDI Machines[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1624-1635.
-
- (上接第 1581 页)
- [17] 李浩, 焦彦超, 张玉彦, 等. 基于数字孪生的飞机装配激光跟踪仪站位优化研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(11):1986-1994.
- LI Hao, JIAO Yanchao, ZHANG Yuyan, et al. Research on Station Optimization of Laser Tracker for Aircraft Assembly Based on Digital Twin[J]. China Industrial Economics, 2024, 35(11):1986-1994.
- [18] MANWILLER P E. A New Modeling Approach for a Priori Uncertainties of Laser Tracker Angle Measurements[J]. Journal of Surveying Engineering, 2023, 149(4):04023009.[LinkOut]
- [19] 班建华, 汪西, 刘思仁, 等. 组合式测量技术在飞机部件形位检测中的应用[J]. 现代制造工程, 2019(2):100-104.
- BAN Jianhua, WANG Xi, LIU Siren, et al. Application of Combinatorial Measurement Technology in Shape Measurement of Aircraft Parts [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(2):100-104.
- [20] 马一心, 范百兴, 黄剑. 多台激光跟踪仪联合动态位姿测量精度评定方法研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(2):55-59.
- MA Yixin, FAN Baixing, HUANG Jian. Research on the Evaluation Method of the Accuracy of Combined Dynamic Position and Attitude Measurement of Multiple Laser Trackers[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(2):55-59.
- (编辑 张 洋)
-
- 作者简介:**文笑雨, 女, 1988 年生, 博士, 副教授。研究方向为车间调度、数字孪生、制造系统运行优化。发表论文 60 余篇。E-mail: wenxiaoyu@zzuli.edu.cn. 张玉彦* (通信作者), 男, 1989 年生, 博士, 副教授。研究方向为智能制造、深度学习、设备状态监测、信号分析。发表论文 13 篇。E-mail: 2020022@zzuli.edu.cn.
- 本文引用格式:**
文笑雨, 张昊, 张玉彦, 等. 数字孪生环境下飞机装配过程中的激光跟踪仪位置优化[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1573-1581.
- WEN Xiaoyu, ZHANG Hao, ZHANG Yuyan, et al. Optimization of Laser Tracker Positions in Aircraft Assembly Processes under Digital Twin Environments [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1573-1581.