

高精度线结构光光条中心快速提取算法

赵文培¹,程进^{2,3},王梦莹¹,李庞跃²,彭熙舜¹,龙纪安¹,李宜峰²,陆安江¹

(1. 贵州大学,贵州 贵阳 550025;2. 西安工业大学,陕西 西安 710016;3. 无锡微视传感科技有限公司,江苏 无锡 214192)

摘要:提取光条纹中心是线结构光测量中至关重要的环节,提取效果直接影响测量速度和精度。针对传统 Steger 算法提取光条纹中心时存在由于光条纹宽度变化过大和冗余点过多导致提取精度低的问题,本文提出一种改进 Steger 快速高精度光条纹中心线提取方法。首先对光条纹原图像进行图像预处理,去除噪声点并保留感兴趣区域;然后通过直接遍历像素点的方式快速获得光条纹宽度,并对光条纹区域进行 Canny 边缘检测,结合几何中心法对条纹边缘图进行计算,获得像素初始点;最后对初始点进行一维卷积构建 Hessian 矩阵,在法线上进一步精确提取中心线。实验结果表明:该算法的精度相对于传统 Steger 算法提升了 42.6%,在耗时上相对于传统 Steger 算法缩短了 64.5%,可以实现精确提取亚像素级精度光条纹的同时又满足工业测量的实时性的要求。

关键词:线结构光测量;光条纹中心线提取;Steger 算法;Canny 边缘检测;几何中心法

中图分类号:TN247;TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.017

High precision line structure light fast extraction algorithm

ZHAO Wen-pei¹,CHENG Jin^{2,3},WANG Meng-ying¹,LI Pang-yue²,PENG Xi-shun¹,
LONG Ji-an¹,LI Yi-feng²,LU An-jiang¹

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China;2. Xi'an Technological University, Xi'an 710016, China;
3. Wuxi V-Sensor Technology Co., Ltd., Wuxi 214192, China)

Abstract: The extraction of center lines from light fringes is a crucial step in line-structure light measurement, as the extraction accuracy directly affects the measurement speed and precision. In response to the low extraction accuracy issue in traditional Steger algorithm due to large variations in light fringe width and excessive redundant points, an improved Steger-based fast and high-precision method for extracting center lines from light fringes is proposed in this paper. First of all, the original image of light fringes is preprocessed to remove noise points and retain the region of interest. Then, the width of light fringes is rapidly obtained by directly traversing pixel points, followed by Canny edge detection on the fringe area and calculation of pixel initial points using the geometric center method. Finally, a one-dimensional convolution is performed on the initial points to construct the Hessian matrix, enabling further precise extraction of the center line along the normal direction. Experimental results demonstrate that this algorithm improves accuracy by 42.6% compared to the traditional Steger algorithm and reduces processing time by 64.5%, thus achieving precise sub-pixel level extraction of light fringes while meeting the real-time requirements of industrial measurement.

Keywords: line structure light measurement; light fringe centerline extraction; Steger algorithm; Canny edge detection; geometric center method

基金项目:贵州省自然科学基金项目(No. 黔科合基础-ZK[2023]一般055);贵州省科技支撑计划项目(No. 黔科合支撑[2023]一般465)资助。

作者简介:赵文培(1999-),男,硕士研究生,研究方向为结构光三维测量,计算机视觉技术等。E-mail:zwp_0901@163.com

通讯作者:陆安江(1978-),男,博士,教授,研究方向为三维测量,计算机视觉,嵌入式系统技术等。E-mail:1289601387@qq.com

收稿日期:2024-03-22

1 引言

随着工业化进程的加速,现代工业对零件加工精度的要求越来越高。线结构光测量作为一种重要的光学测量手段,由于其非接触性、高精度等特点,逐渐成为工业及科研领域的主要测量工具^[1-2]。光条纹中心线的提取作为线结构光测量的关键步骤之一,直接影响测量速度与精度,也成为当前研究的热点^[3-4]。

目前,条纹中心提取技术可以总结为两大类:以几何中心作为光条纹中心的提取方法和以能量中心作为光条纹中心的提取方法^[5]。几何中心法通过分割光条纹区域并计算区域的几何中心来提取中心线,其结构简单,提取速度快,但其提取效果无法达到亚像素精度^[6]。能量中心法利用光条纹图像的灰度分布特性来确定光条纹的中心线,常见提取方法有灰度重心法、极值法和 Steger 算法等^[7]。灰度重心法虽然能够提取到亚像素精度,但其在非均匀光照条件下准确性较差,稳定性不好,鲁棒性不强^[8]。极值法对噪声敏感,出现多峰情况下难以确定全局极值^[9]。与以上算法相比,Steger 算法不仅能够提取到亚像素精度,而且具有高准确度和稳定性,是光条纹中心提取的主流算法^[10-11]。

Steger 算法的精度高,稳定性好,抗噪声能力强,但多重卷积带来的计算复杂度巨大,导致速度较慢^[12]。此外,如果整幅图像仅使用相同的高斯卷积核大小,当光条宽度分布不均匀或曲率变化较大时,难以准确提取中心线,甚至导致光条的不连续。在光条的两端,由于光条的不连续和灰度的突变,容易产生多个光条中心点;同样,如果光条位于图像的边缘,也会有多个中心点。如果光条中有交叉口,在交叉口附近的光条中心线往往会有较大的误差。

为解决上述问题,部分学者对 Steger 算法进行了深入研究。王志永^[13]在进行 Steger 算法提取中心线之前运用灰度重心法结合点斜式法求取光条宽度。该方法适应性强,提高了结果的精确性,但其算法流程较为复杂。南方^[14]在进行 Steger 法提取时通过随机霍夫变换求出光条区域的宽度值。该方法抗干扰能力强,提高了算法的稳定性,但其时效性较差,提取速度较慢。吴玉波^[15]在进行 Steger 算法提取中心线时使用最小二乘法拟合直线来校正线点的坐标,解决了 Steger 算法出现大量冗余点的问题,但

其只适应直线型的中心线提取,适应性不强。

针对上述问题,本文提出了一种改进 Steger 快速高精度光条纹中心线提取方法。该算法采用遍历法快速求解光条纹宽度,同时结合几何中心法和 Canny 边缘检测法对光条纹中心点进行初步定位。然后利用高斯函数可分离性在初始点构建 Hessian 矩阵,在法线方向计算中心点,从而消除了边缘冗余点的情况。经实验验证,本文算法显著提高了中心线提取的准确性和实时性,为线结构光快速精确测量提供了一种可靠的解决方案。

2 线结构光测量系统

本文使用的光条纹图像由一个包含线激光投射装置和图像采集装置的 3D 线结构光相机获得,系统组成如图 1 所示。激光器发出的光经过准直透镜准直和鲍威尔棱镜扩束发射出线激光;图像采集装置主体为 230 万像素的黑白工业相机,镜头使用 M12 接口无畸变机器视觉镜头,计算机用来处理采集到的数据。

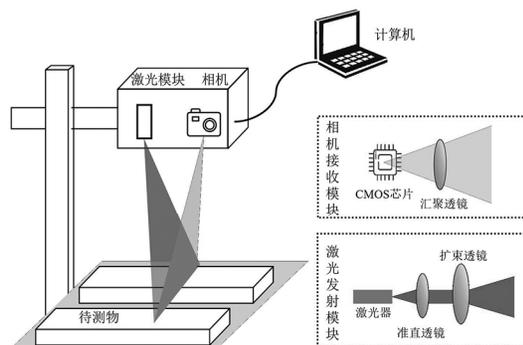


图 1 系统组成

Fig. 1 System components

该测量系统的主要特点如下:

1) 采用了黑白工业相机,不需要处理 RGB 信息,处理速度快,具有更高的图像对比度和低噪声水平;可提供更清晰、更准确的图像,特别适用于光线较暗或对图像质量要求较高的工业环境;相对同型号的 RGB 相机,对 660 nm 的光谱响应度提高 5%。

2) 采用了 660 nm 的半导体激光器,具有高效能、低功耗、快速响应、易于控制、高频率操作的优点,可以实现高效的光能转换和可靠的激光输出,对金属有更高的对比度。

3) 采用了准直透镜和鲍威尔棱镜,激光器发出的光经过准直透镜准直和鲍威尔棱镜扩束,能够获得能量分布均匀、线宽窄、直线度高的线激光。具体参数如表 1 所示。

表 1 线激光模块和相机的参数

Tab. 1 Line laser module and camera parameters

项目	线激光模组	工业相机
波段/mm	660 ± 5	450 ~ 750
工作距离/mm	350 ~ 600	手动对焦
视场/(°)	30	27 × 17
出光功率/mW	100	/
分辨率	/	1920 × 1200
像素大小/ μm	/	3.0
焦距/mm	/	12
F 数	/	2.8

3 算法描述

3.1 Steger 算法

Steger 算法是基于 Hessian 矩阵来实现对结构光光条纹中心进行亚像素级别的提取^[16]。其思想是通过 Hessian 矩阵求得激光条纹中心线的法线方向,进而沿着法线方向进行泰勒展开,即可求出光条纹中心点的位置。

然而,传统的 Steger 算法仍存在问题,如下:1)固定选择单一的高斯核函数标准差,当标准差值过大时,光条纹图像会过度平滑造成模糊虚化;而当标准差值过小时,光条纹图像会丢失细节并伴有噪声。2)Steger 算法提取结果中边缘会出现许多冗余点,针对一些条纹图光条断层的情况下,容易出现精度不准等误差。3)Steger 算法需要对每个像素点做五次的高斯核二维卷积,严重影响提取速度。

为了提高光条纹中心的提取精确性和速度,本文设计了一种改进 Steger 的光条纹中心线提取算法。该算法通过遍历像素点的方式快速求得光条纹宽度,以适应不同光条纹中心的变化,确保了提取结果的精确性;利用边缘检测法和几何中心法粗略估计求得条纹初始点,提高了算法的抗噪性;根据高斯函数可分离特性将需要对每个条纹中心点做的五次高斯核二维卷积改为只对初始点进行十次一维卷积,解决了边缘冗余点的问题,同时大幅度提升算法的运行速度。

3.2 改进 Steger 的光条纹中心提取

本文算法具体步骤如下:1)提取光条纹图像中的感兴趣区域,减少计算量;2)对图像做中值滤波和形态学去噪,同时采用大津法对图像进行分割;3)对二值化图像作投影处理,快速计算出光条纹宽度;4)对图像进行 Canny 边缘检测,结合几何中心

法对条纹边缘图进行粗略估计,计算出像素初始点;5)对初始点进行一维卷积构建 Hessian 矩阵,在法线上进一步提取中心线,实现亚像素精度的提取。在运算过程中,采用 Canny 边缘检测和几何中心法求得初始点,提高抗噪性;遍历像素点快速计算条纹宽度,增强适应性;在初始点上构建 Hessian 矩阵进行提取中心线,降低算法复杂度,具体流程如图 2 所示。

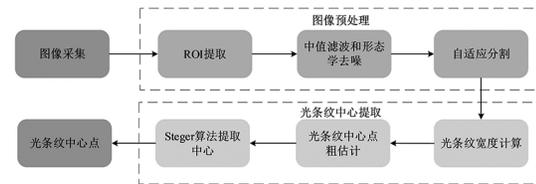


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

3.2.1 图像预处理

在采集的图像中,光条纹在整幅图像中所占比例较小且线激光两端的区域都是无用区域。为了减少图像处理的计算量并排除无关区域的干扰,本文使用感兴趣区域 ROI (Region of Interest) 来确定待提取的光条纹区域。通过手动框选包含光条纹的区域,并提取有效 ROI,有效区域能够在原图缩小的情况下仍旧保留核心信息,后续处理只需对框选区域进行操作,如图 3 所示。



图 3 ROI 区域设置

Fig. 3 ROI area configuration

在实际图像采集过程中,噪声是一个常见的问题,传统的去噪方法在处理一些特定类型的噪声时效果有限。为了解决这个问题,本文引入了中值滤波和形态学开运算的相结合方法。中值滤波通过对像素点周围的邻域内像素值进行排序,选取中间值作为当前像素的新值,从而能够有效去除图像中的椒盐噪声和斑点噪声。形态学开运算通过对图像中的目标进行腐蚀、膨胀操作,能够有效去除图像中的小区域内的噪点和细小的边缘,同时保持目标整体形状不变,从而有效清除图像中的细小噪声并去除边缘毛刺。结合两种方法可以有效地去除图像中的小噪点和细小的干扰,同时可以保持物体的边缘连续性,避免因去除噪点而导致物体形状变化。

为了简化图像、减少计算量并提高算法的执行速度,采用图像阈值分割是一种有效的处理手段。本文引入 Otsu 算法,该算法利用最大类间方差原理可以自适应选取分割阈值,能简单高效地将图像转换为二值化图像。其通过图像的灰度特性初始化阈值 t ,将图像分为前景和背景两个部分;接着利用前景和背景的灰度平均值 I_1 和 I_2 ,以及它们分别占总图像灰度的比例 g_1 和 g_2 进行计算,得到全局平均灰度值 I_0 以及类间方差 S ,具体步骤如下式所示:

$$I_0 = I_1 \cdot g_1 + I_2 \cdot g_2 \quad (1)$$

$$S = (I_1 - I_0)^2 \cdot g_1 + (I_2 - I_0)^2 \cdot g_2 \quad (2)$$

将上式化简得

$$S = g_1 \cdot g_2 \cdot (I_1 - I_2)^2 \quad (3)$$

根据 S 值最大时对应的阈值 t 确定为最佳阈值。

$$I(x,y) \begin{cases} 0, I(x_0, y_0) < t \\ 255, I(x_0, y_0) \geq t \end{cases} \quad (4)$$

式中, $I(x,y)$ 是灰度图像; $I(x_0, y_0)$ 是每个像素点代表的灰度值。预处理后的效果图如图 4 所示。

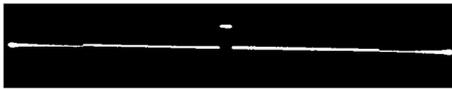


图 4 预处理后的效果图

Fig. 4 Effect image after preprocessing

3.2.2 光条纹中心提取

在提取光条纹中心之前,首先要计算出准确的光条纹宽度。本文提出了一种快速光条宽度求解方法,通过二值化后的光条纹图像矩阵可以快速计算光条纹宽度。具体步骤如下:

1) 将原始光条纹图像二值化处理,将其归一化为一个由 0 和 1 组成的矩阵,每个像素的位置由其在矩阵中的行列索引确定。

2) 从最左到右遍历每一列的所有像素,当值等于 1 时,记录下该像素的位置,并继续搜索直到遇到值等于 0 的像素,这样就能确定每一行的起始位置和结束位置。

3) 通过每一列的结束位置减去起始位置得到每一行的光条宽度。最后,计算所有行中光条宽度的均值作为所求光条宽度,快速计算光条宽度示意图如图 5 所示。

在线结构光测量中,金属材料表面反射以及被测物体不规则会导致光条纹宽度不一致,从而影响测量准确度。为了解决这个问题,本文将几何中心法与边缘检测法相结合,提取出光条纹中心初始点。首先采

用 Canny 算法进行边缘检测,接着采用一种行向查询方法来识别每一列中最上层和最底层的非零像素点的列坐标值,取其平均值作为初始点的中心坐标,即可粗略提取边缘像素的初始点,如图 6 所示。

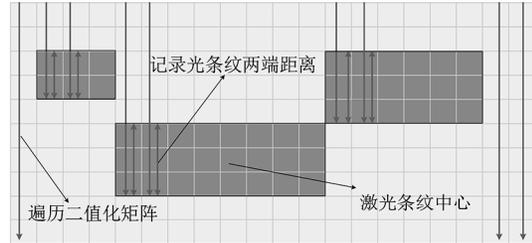
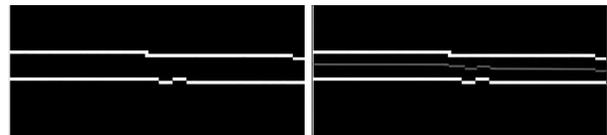


图 5 快速计算光条纹宽度示意图

Fig. 5 Schematic diagram for fast calculation of stripe width



(a) 边缘图像

(b) 边缘及中心线图像

图 6 边缘及边缘中心线图像

Fig. 6 Edge and edge center line images

在提取时,传统的 Steger 算法中,需要对每一个像素点进行五次高斯核二维卷积来求解该点 Hessian 矩阵,计算复杂度高,耗时长,提取的中心线边缘会出现大量冗余点。针对此类问题,本文提出只对粗略求得的初始点 (u,v) 进行卷积求解 Hessian 矩阵,利用高斯函数可分离特性拆分卷积核,将二维高斯核函数转换为一维高斯核函数。具体步骤如下:

先对粗略提取的初始点进行十次一维卷积构建 Hessian 矩阵。利用高斯函数可分离特性可以得到:

$$\begin{aligned} G(x,y) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{y^2}{2\sigma^2}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} * \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \\ &= G(x) * G(y) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_x(x,y) = G'(x)G(y) \\ G_y(x,y) = G(x)G'(y) \\ G_{xx}(x,y) = G''(x)G(y) \\ G_{xy}(x,y) = G'(x)G'(y) \\ G_{yy}(x,y) = G(x)G''(y) \end{cases} \quad (6)$$

设置高斯卷积核为 $\sigma = \frac{w}{\sqrt{3}}$,其中 w 是所求得的光条宽度,联立 (5) 和 (6) 式,构建粗略提取的中心点的 Hessian 矩阵:

$$H(u_0, v_0) = \begin{bmatrix} G''(u)G(v)G'(u)G'(v) \\ G'(u)G'(v)G(u)G''(v) \end{bmatrix} \otimes I(u_0, v_0)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{uv} & r_{vv} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $I(u_0, v_0)$ 是粗略提取到的初始点, $H(u_0, v_0)$ 是初始点的 Hessian 矩阵。通过将图像的二维卷积转化为一维卷积, 由直接计算二维卷积的 $5n^2$ 次乘法降低为 $10n$ 次乘法, 大幅降低计算复杂度, 提高处理速度, 同时解决了边缘出现冗余点的问题。

接着利用 $H(u_0, v_0)$ 确定光条纹的法线方向, 计算其最大特征值 λ , 根据最大特征值计算其法线方向的单位向量 $\vec{e}_0 = [e_u, e_v]$, 具体公式求解如下:

$$\begin{cases} e_u = r_{uv} / \sqrt{r_{uv}^2 + (r_{uu} - \lambda)^2} \\ e_v = (r_{uu} - \lambda) / \sqrt{r_{uv}^2 + (r_{uu} - \lambda)^2} \end{cases} \quad (8)$$

此时的亚像素精度中心点由初始点 $I(u_0, v_0)$ 沿着 \vec{e}_0 的方向展开二阶泰勒多项式, 表达式为:

$$I(u_0 + t \cdot e_u, v_0 + t \cdot e_v) = I(u_0, v_0) + t \cdot e_0 [r_u, r_v]^T + t \cdot e_0 \cdot H(u_0, v_0) \cdot e_0^T \quad (9)$$

$I(x_0 + t \cdot e_u, y_0 + t \cdot e_v)$ 为亚像素精度中心点, 其中 r_u, r_v, t 的计算公式为:

$$\begin{cases} r_u = (\partial G(u, v) / \partial u) \otimes I(u, v) \\ r_v = (\partial G(u, v) / \partial v) \otimes I(u, v) \end{cases} \quad (10)$$

$$t = - \frac{e_u \cdot I_u + e_v \cdot I_v}{e_{uv}^2 \cdot I_u + 2e_u \cdot e_v \cdot I_{uv} + e_v^2 \cdot I_{vv}} \quad (11)$$

联立式(7)、(8)、(9)、(10)、(11)可求得光条纹中心的亚像素坐标。

4 实验结果与分析

为了验证算法在速度和精度方面的优越性, 针对直线型、圆弧型和折线型 3 种工况下的光条纹进行提取实验, 并将其与灰度重心法以及 Steger 方法进行了对比评估。实验处理配置如下: 微视传感公司 PSN0600GA1 线结构光视觉传感器; 机械臂选用 FANUC-M10iD/12 六轴机器人; PC 端配备了由 Intel(R) Core(TM) i5 - 8300H CPU @ 2.30 GHz 处理器和 NVIDIA GeForce GTX 1050Ti 显卡组成的硬件配置, 系统是 Win10, 使用仿真软件是 MATLAB2019。搭建实验平台如图 7 所示。

4.1 精度分析

采用上述工业相机采集光条纹图像, 将线激光投射到长方形标准块上, 分别采集 6 张不同的光条纹图像, 按照数字 1 到 6 编号下去, 分别使用本文算法、Steger 算法、灰度重心法进行实验。以编号为 1 的图像为例, 对本次实验进行分析。图 8 是各种算法光条中心提取效

果图。

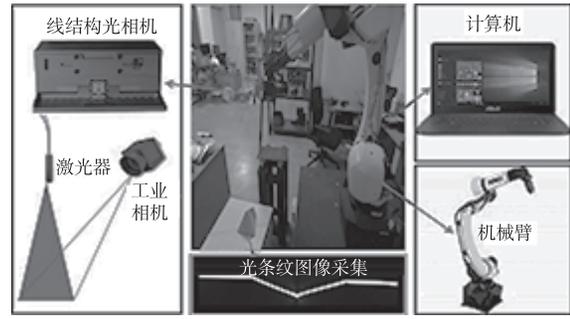


图 7 实验平台展示图

Fig. 7 Experimental platform display diagram

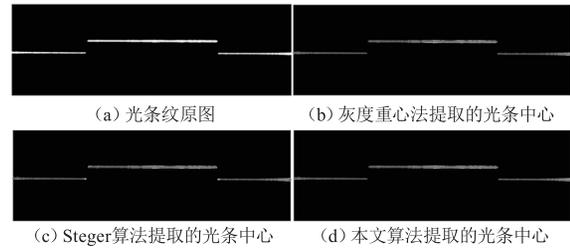


图 8 各种算法光条中心提取效果图

Fig. 8 Effect diagram of light strip center extraction by various algorithms

关于精度分析, 到目前为止, 缺乏一套统一的方法用于评估光条中心提取的精度^[17]。为此, 本文提出了两种验证方法。

1) 因为光条中心的真实数据无法获取, 导致真实的偏差 δ 未知, 从而无法直接测量光条中心的均方根差 RMSE。本文在未知真实偏差 δ 的情况下, 用残差 $U_i = x_i - \bar{x}$ 或 $U_i = y_i - \bar{y}$ 代替真实偏差 ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$), 均方差计算公式表示为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n-1}} \quad (12)$$

表 2 三种算法提取的光条中心误差值

Tab. 2 The center error values of the optical strip extracted by the three algorithms

算法	X 坐标轴 RMSE/像素	Y 坐标轴 RMSE/像素
灰度重心法	7.8591	0.5873
Steger 算法	7.8535	0.5745
本文算法	7.362	0.5514

从表 2 可以得到, 本文算法的 RMSE 最小, 在 X 坐标轴上, 相比于灰度重心法提升了 0.2271 像素, 相比于 Steger 算法提升了 0.2215 像素; 在 Y 坐标轴上, 相比于灰度重心法提升了 0.0359 像素, 相比于 Steger 算法提升了 0.0231 像素。这是由于本文算

法根据真实的光条纹宽度设置高斯核进行卷积,使得算法稳定性更好,精度也高。

2) 本文将原光条纹图分为 ab、bc、cd 三段,如图 9 所示。



图 9 光条纹分段图

Fig. 9 Segmentation diagram of light fringe

对 ab、bc、cd 三段提取到的中心点单独进行直线拟合,得到的拟合直线如表 3 所示。

表 3 三种算法提取的光条中心拟合直线

Tab. 3 The center of the light strip extracted by three algorithms fits the straight line

激光编号	算法	拟合直线
ab	灰度重心法	$y = -0.00135x + 130.04687$
	Steger 算法	$y = -0.00421x + 130.18725$
	本文算法	$y = -0.00315x + 130.13818$
bc	灰度重心法	$y = -0.00381x + 98.35562$
	Steger 算法	$y = -0.00390x + 98.47572$
	本文算法	$y = -0.00371x + 98.30825$
cd	灰度重心法	$y = -0.00610x + 131.38809$
	Steger 算法	$y = -0.00457x + 130.33587$
	本文算法	$y = -0.00572x + 131.1051$

表 3 已知 ab、bc、cd 三段像素点的拟合直线,分别取每段各像素点到拟合直线的平均距离作为偏差进行验证,得到的像素平均偏差如图 10 所示。

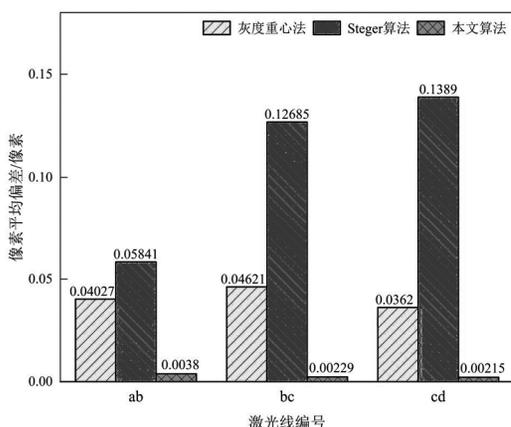


图 10 三种算法提取的光条中心误差值

Fig. 10 Error values of the center of the light strip extracted by the three algorithms

从图 10 可以看出,本文算法的像素偏差远比传统 Steger 算法和灰度重心法小,充分证明了本文算法能更好的提取光条纹中心横截面的有效像素,三段光条中心提取的数据表明了本文算法具有更好的准确性和稳定性。

为了更加直观的看出本文算法的优越性,将各算法提取的光条中心进行局部放大,根据图 11(a) 中的黄框进行放大,效果图如图 11 所示。

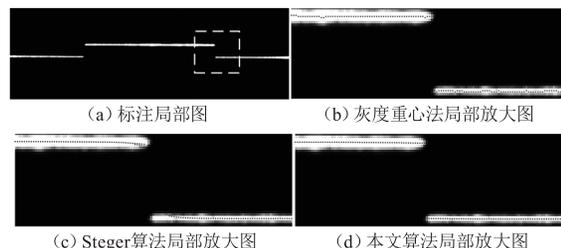


图 11 局部放大对比图

Fig. 11 Local zooming comparison

通过对比图可以得知,灰度重心法容易受到噪声的影响,噪声点可能会被错误地当作像素点一起计算,进而导致提取的中心点存在偏差,使得结果不够稳定;Steger 算法相对灰度重心法要更加稳定,但提取的边缘处会出现大量冗余点,且出现了失真的情况;相比之下,本文算法提取效果最佳,不容易受到噪声干扰,且在边缘处不会出现冗余点的情况,提取的中心点更加平滑、稳定。

(2) 时效性分析

为了验证本文算法速度的优越性,分别采用 3 种算法对 6 张图片进行中心提取,每种图片重复提取 5 次,取 5 次的平均值作为每张图的处理时间,如图 12 所示。

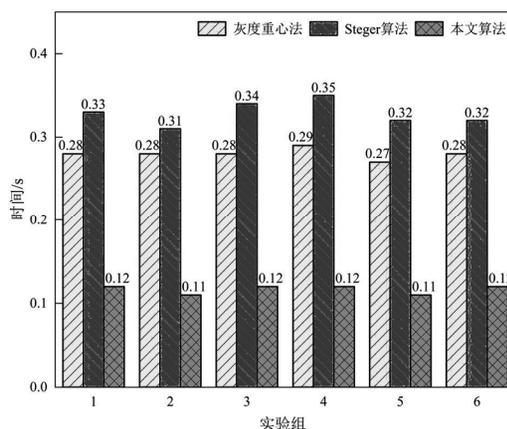


图 12 各算法时间对比图

Fig. 12 Time comparison diagram of each algorithm

从图 12 可以看出,传统 Steger 算法处理最为耗

时,灰度重心法由于操作简单用时较少,本文在计算卷积之前粗略求得初始点,只对初始点进行十次的一维卷积构成 Hessian 矩阵,避免了 Steger 算法对各个像素点再做卷积,且算法开始只处理感兴趣的区域,缩短了处理时间,耗时仅为传统 Steger 算法的 1/3,达到快速提取的目的。

(3) 适应性分析

为了验证本文算法的适应性,分别对直线型、折线型以及圆弧型光条纹图像进行实验,处理结果如图 13 所示。

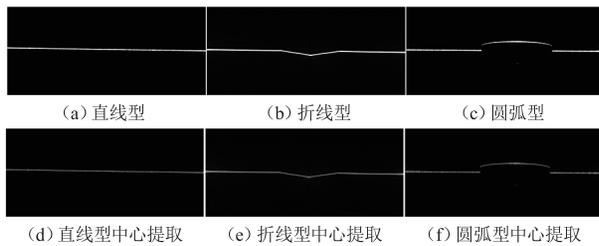


图 13 激光条纹提取示意图

Fig. 13 Schematic diagram of laser fringe extraction

图 13 中分别对应曲率为 0、曲率突变和曲率连续变化的光条纹,可以看出本文算法在对处理光条纹图像时,无论是曲率为 0、曲率突变还是曲率连续变化的情况,都能够有效地适应并提供准确的图像信息提取和分析,具有很强的适用性和稳健性。

5 结论

本文在 Steger 算法基础上提出一种改进的快速高精度光条纹中心亚像素精度提取方法。该方法先是对光条纹图像进行一定的预处理;然后通过直接遍历像素点的方式快速获得光条纹宽度;接着进行 Canny 边缘检测,并结合几何中心法对条纹边缘图进行粗略估计像素初始点;最后对初始点进行一维卷积构建 Hessian 矩阵,在法线上提取中心线,实现亚像素精度的提取,有效解决了传统 Steger 算法在提取时光条纹宽度变化过大出现失真和冗余点过多的问题。实验结果表明本文算法对光条纹中心进行提取时表现突出,较灰度重心法提升了 0.2630 像素,较传统 Steger 算法提升了 0.2446 像素,能准确在物体表面的起伏情况方面表现出色,尤其在处理激光条纹曲率较大的区域时能够有效提取细节信息,这为后续进行高精度三维重建建立了坚实的基础。

参考文献:

[1] Jin Shoufeng, Shen Wenjun, Xiao Fuli, et al. Measure-

ment method of steel ring roundness based on line structured light [J]. Journal of Textile Research, 2022, 44 (10): 164 - 171. (in Chinese)

金守峰,沈文军,肖福礼,等. 基于线结构光的钢领内表面圆度测量方法 [J]. 纺织学报, 2023, 44 (10): 164 - 171.

[2] Pan Shuo, Shao Xinjie, Li Xiaolei, et al. Sub-pixel extraction of laser stripe center based on block-matching [J]. Laser & Infrared, 2021, 51 (6): 814 - 819. (in Chinese)

潘硕,邵新杰,李晓磊. 基于块匹配的激光条纹亚像素中心提取 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (6): 814 - 819.

[3] Wang Rongjun, Huang Mingming, Ma Lidong. Research on center extraction algorithm of line structured light based on inilateral tracking and midpoint prediction [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 5 (18): 108 - 118. (in Chinese)

王荣军,黄明明,马立东. 基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法研究 [J]. 中国激光, 2024, 5 (18): 108 - 118.

[4] Tian Ying, Huang Danping, Yu Shaodong, et al. Research on 3D measurement method of complex reflectivity objects [J]. Laser & Infrared, 2022, 52 (4): 522 - 529. (in Chinese)

田颖,黄丹平,于少东,等. 复杂反射率物体三维测量方法研究 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (4): 522 - 529.

[5] Li Yingying, Zhang Zhiyi, Yuan Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (10): 13 - 22. (in Chinese)

李莹莹,张志毅,袁林. 线结构光光条中心提取综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (10): 13 - 22.

[6] Chen Yu. Research on 3D surface reconstruction technology based on laser scanning [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese)

陈宇. 基于激光扫描的三维表面重建技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.

[7] Ming H, Xiao X. A method of laser stripe centerline extraction based on deep learning for structured light 3D reconstruction [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2522 (1): 012045.

刘天赐,刘桂华,胡莉,等. 基于法线引导的激光中心

[8] Li S, Gao X, Xie Z. Underwater structured light stripe center extraction with normalized grayscale gravity method [J]. Sensors, 2023, 23 (24): 9839.

[9] Liu Tianci, Liu Guihua, Hu Li, et al. Laser center-line extraction method based on normal guidance [J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44 (1): 211 - 218. (in Chinese)

- 线提取方法[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 211 – 218.
- [10] Nicola G, Paolo C, Marco G R. Automated measurement of geometric features in curvilinear structures exploiting steger's algorithm. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(8): 4023.
- [11] Zhang Yue, Zhang Ning, Xu Xiping, et al. Catadioptric-midirectional monocular visual distance measurement method integrating structured light[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(4): 490 – 503. (in Chinese)
张越, 张宁, 徐熙平, 等. 融合结构光的折反射全景单目视觉测距[J]. 光学精密工程, 2024, 32(4): 490 – 503.
- [12] Zhiqiang L, Jie S, Xianda Z, et al. High-accuracy spectral measurement of stimulated-brillouin-scattering lidar based on Hessian matrix and steger algorithm[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1511 – 1511.
- [13] Wang Zhiyong, Yu yu, Wang Wuyue, et al. Line laser center extraction based on improved Steger algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 84 – 89. (in Chinese)
王志永, 于宇, 王武越, 等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 84 – 89.
- [14] Nan Fang, Li Dahua, Gao Qiang, et al. Implementation of adaptive light stripe center extraction of improved Steger algorithm[J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 85 – 88. (in Chinese)
南方, 李大华, 高强, 等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 85 – 88.
- [15] Wu Yubo, Chen Dilai, Yang Chao, et al. Multi-line structured light center extraction based on improved steger algorithm[J]. Applied Laser, 2023, 43(10): 188 – 195. (in Chinese)
吴玉波, 陈迪来, 杨超, 等. 基于 Steger 算法的多线结构光中心取[J]. 应用激光, 2023, 43(10): 188 – 195.
- [16] Ming L, Xiao L, Shaolu W, et al. Realizing quality inspection in magnetic pulse crimping manufacturing: using Steger algorithm and self-attention[J]. Journal of Materials Processing Tech. , 2023, 311: 117799.
- [17] Li Weiming, Peng Guo, Gao Xingyu, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 47(3): 192 – 199. (in Chinese)
李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 192 – 199.