

基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法研究

王荣军¹, 黄明明^{1,2}, 马立东^{1,2*}

¹太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024;

²太原科技大学重载装备作业智能化技术与系统山西省重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 线结构光测量技术被广泛应用于工业检测领域,而激光条纹中心提取质量直接影响线结构光的测量精度。针对现有算法在曲率变化较大或干扰严重工况下条纹中心提取效果较差的问题,提出了一种基于单边跟踪与中点预测的中心提取算法。首先根据激光条纹灰度和走向对其进行单边跟踪,同时结合灰度重心法和最小二乘法预测初始中心点坐标,然后利用初始中心点邻近像素差分构建 Hessian 矩阵,计算最终中心点坐标。实验结果表明:该算法的处理速度是几何中心法的 3.96 倍、测量精度是 Steger 法的 2.06 倍,在信噪比为 8.52 dB 且激光条纹与噪声相连的严重干扰情况下,提取精度是 Steger 法的 5.76 倍。所提算法在保证速度和精度的同时,具有较好的抗干扰性和适用性,对于条纹质量较差的工业检测具有一定意义。

关键词 测量; 中心提取; 单边跟踪; 中点预测; 差分; 线结构光

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231087

1 引言

线结构光测量技术是一种基于激光三角法的非接触式测量技术,被广泛应用于三维重建^[1]、工业检测^[2-3]、焊缝跟踪^[4-5]等领域。在线结构光测量系统的应用中,相机采集到的激光条纹具有一定宽度,而图像处理时只需要激光条纹的中心坐标信息,激光条纹中心的提取质量直接影响测量精度,因此,快速、精确且适用性好的线结构光中心提取算法是线结构光测量技术的核心。

国内外学者对线结构光中心的提取算法进行了广泛的研究,现有的线结构光中心提取算法主要是基于几何中心法^[6]、极值法^[7]、灰度重心法^[8]、曲线拟合法^[9]、Steger 法^[10]进行改进。其中,极值法简单快速,单独使用时需要保证无干扰^[11],而面对实际环境中的各种干扰,研究者常将极值法用于激光条纹的粗定位^[12],并结合其他方法进行中心提取。几何中心法根据激光条纹几何形状计算中心,研究者常从图像分割出发^[13],将激光条纹尽可能从图像中分离出来,然后使用几何中心法计算分割后的条纹中心。灰度重心法计算简单且可实现亚像素检测,研究者常从规划搜索路径^[14]、重心计

算公式^[15]、感兴趣区域^[16]等角度进行优化,以提升速度和精度,但仅能抵抗小噪声的干扰。曲线拟合法能够平滑曲线,常被用来拟合提取点^[17-18],使提取结果平滑,但算法复杂度较高。Steger 法以其精度高的特点而受到关注,研究者从感兴趣区域^[19-20]和法向计算公式构建^[21]等方面进行优化,算法速度有一定提升,但仍不满足实时性要求。

虽然研究者们提出了许多不同的线结构光中心提取算法,但现有算法通常假定激光条纹较为规整、曲率变化较小,在曲率变化较大处提取误差较大。同时,当计算图像中有较严重的干扰时,干扰易被作为激光条纹的一部分进行计算,导致提取结果出现较大误差。因此,本文提出了一种基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法,能够有效避免曲率变化较大处或干扰严重对激光条纹中心提取的影响。该算法通过改进边界跟踪算法寻找激光条纹的上边界,同时,结合灰度重心法和最小二乘法预测激光条纹的初始中心点,然后利用差分在初始中心点处构建 Hessian 矩阵,在法线方向计算中心点坐标,从而能够在曲率变化较大处或干扰严重处有较好的提取精度。

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-26; 录用日期: 2023-11-03; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274389)、山西省重点研发计划(202102010101003)、山西省科技合作交流专项项目(202104041101031)、山西省留学人员科技活动择优资助项目(20220028)、山西省省筹资助留学回国人员项目(2022-160)、山西省基础研究计划联合资助项目(太重)(TZLH20230818011)

通信作者: *mald@tyust.edu.cn

2 基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法

基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法原理如下:采用单边跟踪算法对激光条纹的上边界进行跟踪,每跟踪到一个激光条纹上边界点,采用灰度重心法和最小二乘法预测激光条纹的初始中心点,最后利用差分构建 Hessian 矩阵,在法向上进一步提取中心点。在计算过程中,单边跟踪算法能够抵抗小噪声,

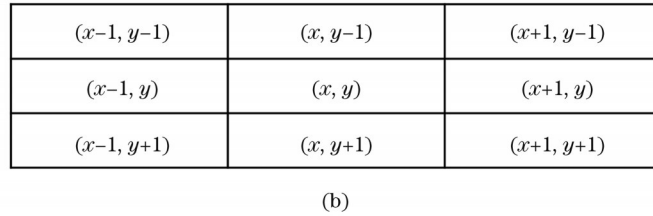
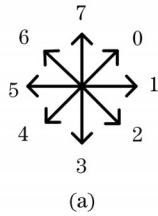


图 1 像素 8 邻域的两表示。(a) 8 邻域链码表示;(b) 8 邻域坐标表示

Fig. 1 Two kinds of representations of pixel eight-neighborhood. (a) Eight-neighborhood chain code representation; (b) eight-neighborhood coordinate representation

顺时针方向的边界跟踪算法原理如下:

- 1) 遍历二值图像,找到其中某个灰度值为 255 的像素点,以该像素点为起始点;
- 2) 将起始点作为当前点,从当前点链码值为 0 的方向开始顺时针搜索下个边界点。将每次搜索到的下个边界点作为当前点;
- 3) 当搜索到当前点的链码值为偶数时,将搜索下个边界点的起始方向逆时针旋转 45° ;
- 4) 当搜索到当前点的链码值为奇数时,将搜索下

个边界点的起始方向逆时针旋转 90° ;

2.1 激光条纹单边跟踪

传统的边界跟踪^[22]是根据像素的 8 邻域按照顺时针或者逆时针方向对二值图像的轮廓进行跟踪,起始条件为灰度值为 255 的像素点,终止条件为到达跟踪的起始点,形成封闭轮廓。图 1 所示为像素 8 邻域的两表示方式。

个边界点的起始方向逆时针旋转 90° ;

- 5) 重复步骤 2)、3)、4),直到搜索到的下个边界点与起始点相同,则停止边界跟踪。

本文针对激光条纹的特点,对边界跟踪算法进行改进,提出了一种适用于激光条纹的单边跟踪算法,该算法仅跟踪激光条纹上边界,选择性搜索边界点邻域像素,且能滤除小噪声。图 2 为单边跟踪的搜索示意图,其中每个方格代表 1 个像素,激光条纹为 3 个像素,小噪声为 2 个像素。

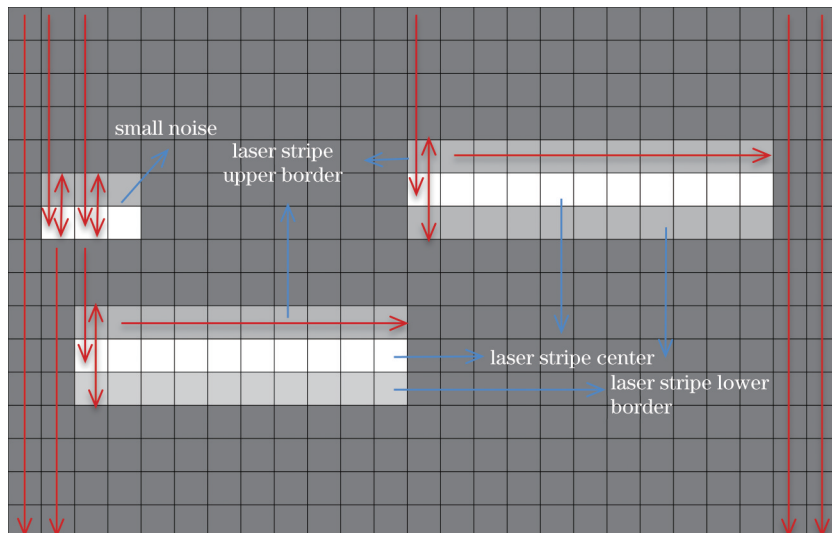


图 2 单边跟踪搜索示意图

Fig. 2 Schematic of unilateral tracking search

激光条纹是一条直线,照射到物体上时会出现变形,形成倾斜直线或弧线。根据光条的这个特点,从图像左上角开始搜索,在单边跟踪时,根据当前点被搜索到时的链码值的不同,在当前点 8 邻域中的 0、1、2 链码

方向的候选像素点中进行搜索。图 3 为当前点被搜索到时的不同链码值对应的候选点搜索示意图。

如图 4 所示,激光条纹的单边跟踪算法的流程及原理如下。

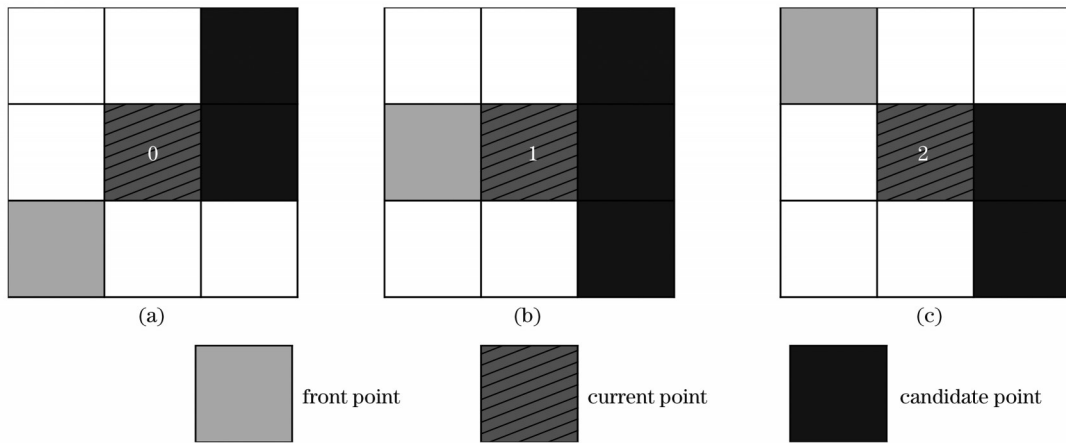


图 3 候选点搜索示意图。(a)链码值为0;(b)链码值为1;(c)链码值为2

Fig. 3 Schematics of candidate point search. (a) Chain code value of 0; (b) chain code value of 1; (c) chain code value of 2

1) 将图像灰度化,从上到下、从左到右对图像进行扫描,搜索大于初始阈值(T_0)的点集中的灰度极值点,根据该极值点的灰度值设置合适的搜索阈值(T_1),分别向上、向下搜索,直到遇到小于 T_1 的点时停止搜索,记录该列不小于 T_1 的像素点数目(n)。如果 n 介于两个宽度阈值 w_1 和 w_2 之间,则将向上搜索到的最后不小于 T_1 的点作为上边界跟踪的起始点(p_{start});如果 n 不在 w_1 和 w_2 之间,则将这部分不小于 T_1 的像素点视为小噪声进行滤除,自该点继续搜索。

2) 以 p_{start} 为起点,从其链码值(D_{start})为0的方向开始顺时针搜索下个上边界点 $P_{i'}$,其中, i' 为点编号。将每个搜索到的上边界点 $P_{i'}$ 作为搜索下一个新的上边界点 $P_{i'+1}$ 的当前点(p_{cur}),记录 p_{cur} 被搜索到时的链码

值(D_{cur})。

3) 在进行单边跟踪时,当搜索到链码值为0或1的上边界点,即 $D_{cur}=0$ 或 $D_{cur}=1$ 时,将顺时针搜索下一个新上边界点的起始方向置为0,即 $D_{start}=0$;当搜索到链码值为2的上边界点,即 $D_{cur}=2$ 时,将顺时针搜索下一个新上边界点的起始方向置为1,即 $D_{start}=1$;

4) 重复步骤2)和步骤3),对激光条纹的上边界进行跟踪,直到搜索到上边界的末尾点,即在该像素8链码中的0、1、2三个方向上均搜索不到符合 T_1 的点,停止单边跟踪,记录当前列数为 j 。

5) 如果图像中有多段激光条纹,则自第 $j+1$ 列、第0行开始,转至步骤1),进行新的激光条纹单边跟踪,直到搜索完图像列(l_{col}),即 $j+1 > l_{col}$ 时完成搜索。

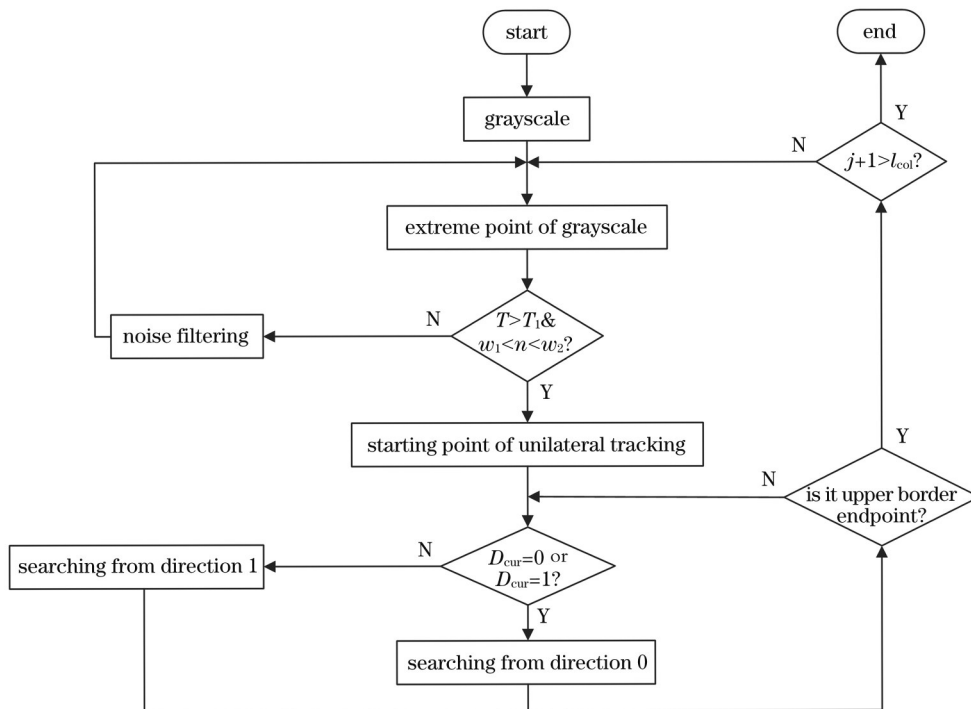


图 4 单边跟踪流程图

Fig. 4 Flow chart of unilateral tracking

2.2 基于灰度重心法和最小二乘法的初始中心点确定

本文在单边跟踪的同时计算激光条纹的初始中心点,在没有噪声干扰的激光条纹部分,取灰度重心法计算得到的点为初始中心点,在干扰严重的激光条纹部分,采用步长为 1 的最小二乘法预测该部分激光条纹

的初始中心点。图 5 为最小二乘法预测中心点的原理图。 p_i 为要预测的点 (i 为点编号), p_{i-1} 、 p_{i-2} 、 p_{i-3} 、 p_{i-4} 、 p_{i-5} 为前 5 个点, w_1 为激光条纹宽度的阈值, w_3 为计算的激光条纹宽度, $Y=kX+b$ 为前 5 个点拟合的直线方程。

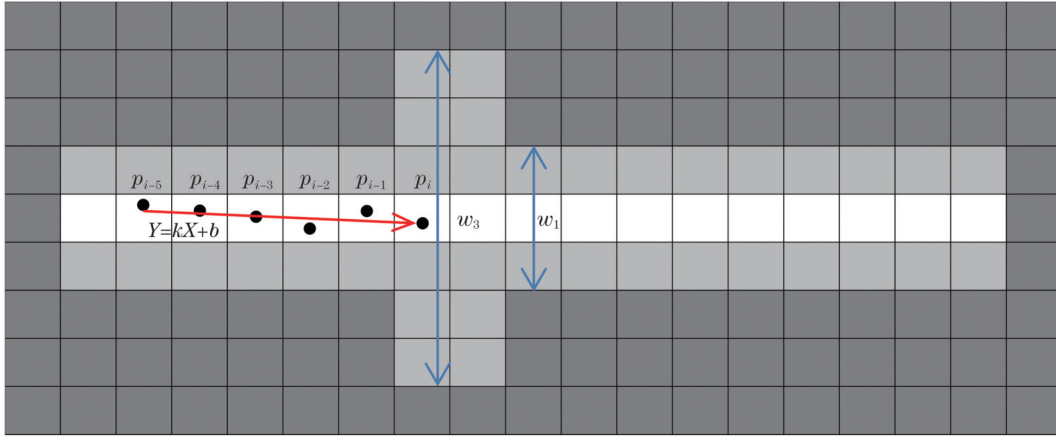


图 5 最小二乘法预测原理图

Fig. 5 Schematic of prediction with least square method

最小二乘法预测激光条纹初始中心点的具体实现方式如下。

由预测点的前 5 个点组成一组大小为 5 的点集 $\{p_{i-1}, p_{i-2}, p_{i-3}, p_{i-4}, p_{i-5}\}$, 设该点集拟合的方程为

$$Y = kX + b, \quad (1)$$

式中: Y 为拟合方程的因变量(纵坐标); X 为拟合方程的自变量(横坐标); k 为拟合方程的斜率, b 为拟合方程的截距。

拟合点与拟合直线方程的误差方程为

$$F = \sum_{a=1}^5 (kX + b - Y)^2, \quad (2)$$

式中: F 为拟合点与拟合直线方程的误差; a 为拟合点编号。

式(2)分别对 k 和 b 求偏导, 并令偏导等于 0, 可得 k 和 b 为

$$\left\{ \begin{aligned} k &= \frac{5 \sum_{a=1}^5 x_a y_a - \sum_{a=1}^5 x_a \sum_{a=1}^5 y_a}{5 \sum_{a=1}^5 x_a^2 - \left(\sum_{a=1}^5 x_a \right)^2}, \\ b &= \frac{\sum_{a=1}^5 y_a \sum_{a=1}^5 x_a^2 - \sum_{a=1}^5 x_a \sum_{a=1}^5 x_a y_a}{5 \sum_{a=1}^5 x_a^2 - \left(\sum_{a=1}^5 x_a \right)^2} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: x_a 为拟合点的横坐标; y_a 为拟合点的纵坐标。

预测点的坐标 (x_{p_i}, y_{p_i}) 可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} (x_{p_i} - x_{p_{i-1}})^2 + (y_{p_i} - y_{p_{i-1}})^2 &= 1, \\ y_{p_i} &= kx_{p_i} + b \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: $x_{p_{i-1}}$ 为预测点前一点的横坐标; $y_{p_{i-1}}$ 为预测点前

一点的纵坐标。

2.3 基于 Hessian 矩阵的中心线提取

Hessian 矩阵在图像处理中常被用于求取图像法向^[23]。二维图像中的 Hessian 矩阵表示为

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{xy} & f_{yy} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $H(x, y)$ 为 (x, y) 处的 Hessian 矩阵; f_{xx} 为图像沿 x 的二阶偏导; f_{yy} 为图像沿 y 的二阶偏导; f_{xy} 为图像先对 x 求偏导再对 y 求偏导。

在数字图像中, 灰度函数为离散型, 可以用差分来表示一阶偏导和二阶偏导, 即

$$\left\{ \begin{aligned} f_x &= f(x+1, y) - f(x, y) \\ f_y &= f(x, y+1) - f(x, y) \\ f_{xx} &= f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \\ f_{yy} &= f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \\ f_{xy} &= f_{yx} = f(x+1, y+1) - f(x+1, y) - \\ &\quad f(x, y+1) + f(x, y) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: f_x 为图像沿 x 的一阶偏导; f_y 为图像沿 y 的一阶偏导; $f(x, y)$ 为 (x, y) 处的灰度值; $f(x+1, y)$ 为 $(x+1, y)$ 处的灰度值; $f(x, y+1)$ 为 $(x, y+1)$ 处的灰度值; $f(x-1, y)$ 为 $(x-1, y)$ 处的灰度值; $f(x, y-1)$ 为 $(x, y-1)$ 处的灰度值; $f(x+1, y+1)$ 为 $(x+1, y+1)$ 处的灰度值。

以初始中心点 (x_0, y_0) 为中心, 利用 Hessian 矩阵计算初始中心点的法线方向, 将灰度分布函数 f 沿法线方向进行二阶泰勒展开, 得到法线方向上的亚像素光条中心点 $(x_0 + t \cdot e_x, y_0 + t \cdot e_y)$, 其中, $t =$

$$-\frac{e_x \cdot f_x + e_y \cdot f_y}{e_x^2 \cdot f_{xx} + 2 \cdot e_x \cdot e_y \cdot f_{xy} + e_y^2 \cdot f_{yy}}$$
, e_x 为法向单位向量在 x 方向的分量, e_y 为法向单位向量在 y 方向的分量。

分量。
如图 6 所示, 基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法的基本流程如下。

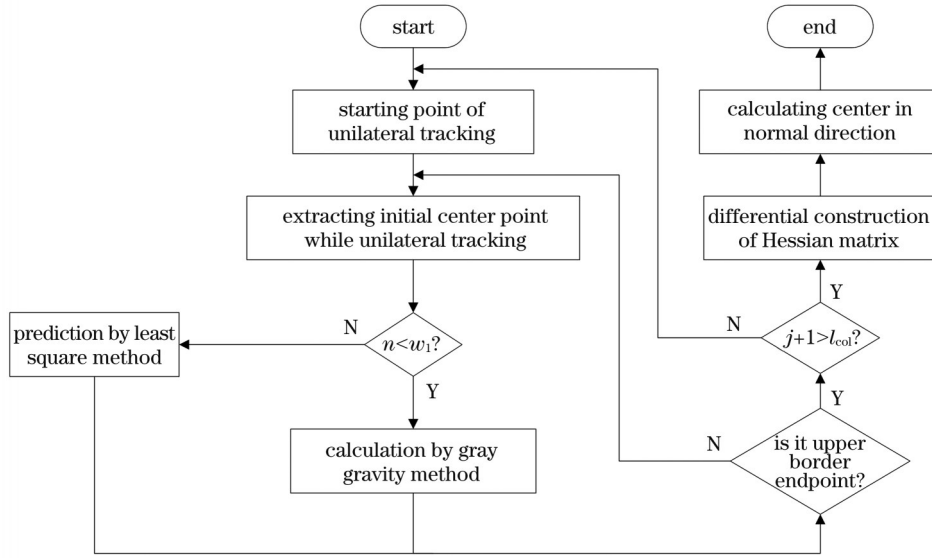


图 6 基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法流程图

Fig. 6 Flow chart of line structured light center extraction algorithm based on unilateral tracking and midpoint prediction

1) 寻找单边跟踪的起始点;

2) 对图像中的激光条纹进行单边跟踪的同时, 结合灰度重心法和最小二乘法预测激光条纹的初始中心点, 直到单边跟踪到激光条纹上边界末尾点, 记录当前列数为 j ;

3) 如果有多段激光条纹, 则自 $j+1$ 列开始, 重复执行步骤 1) 和步骤 2), 当 $j+1$ 大于图像列数 l_{col} 时完成跟踪;

4) 利用差分构建 Hessian 矩阵, 计算初始中心点法线方向上的坐标。

3 实验结果与分析

开展了曲率变化较大和干扰严重两种工况下的激光条纹提取实验, 并和几何中心法、灰度重心法、Steger 法进行对比, 以验证本文所提算法在精度和速度方面的优越性。开展了折线、弧线、弧线斜线相切和

连续变化曲线 4 种工况下的激光条纹中心提取实验, 以验证本文所提算法对不同种类激光条纹的适用性。实验处理配置如下: 计算机中央处理器 (CPU) 为 Intel (R) Core(TM) i7-12700F 2.10 GHz, 内存为 16 GB, 系统为 Win10, 编程软件为 Visual studio 2015, 编程语言为 C++, 图像处理库为 OpenCV3.2, 激光器为 650 nm 的一字线激光, 相机型号为大恒 Mer 231 41u3c。

3.1 精度分析

采集一张平整表面上有圆弧凸起的图像作为激光条纹曲率变化较大的图像, 如图 7(a) 所示; 采集一张反光导致的噪声激光条纹相连、信噪比为 12.89 dB 的图像作为干扰严重的图像, 如图 7(b) 所示。分别采用几何中心法、灰度重心法、Steger 法与本文算法提取激光条纹中心, 图 8 为四种算法对图 7(a) 曲率变化较大处的提取结果的局部放大图, 图 9 为四种算法对图 7(b) 的提取结果。

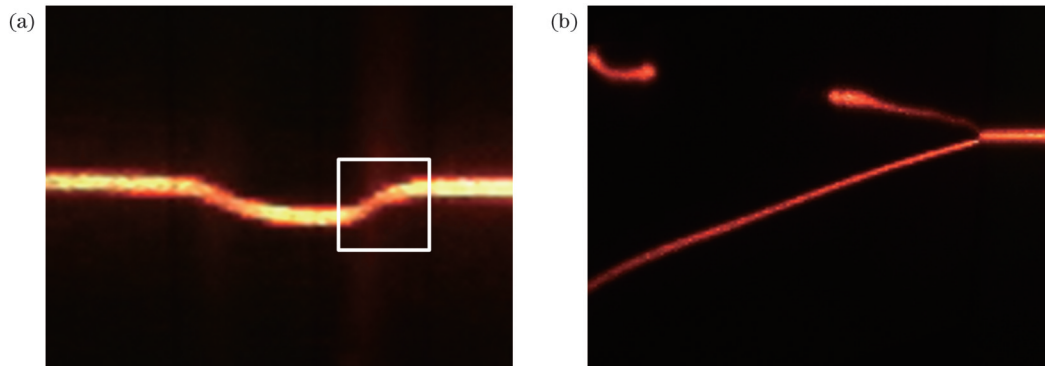


图 7 实验图像。(a) 曲率变化较大; (b) 干扰严重

Fig. 7 Experimental images. (a) Large curvature variation; (b) severe interference

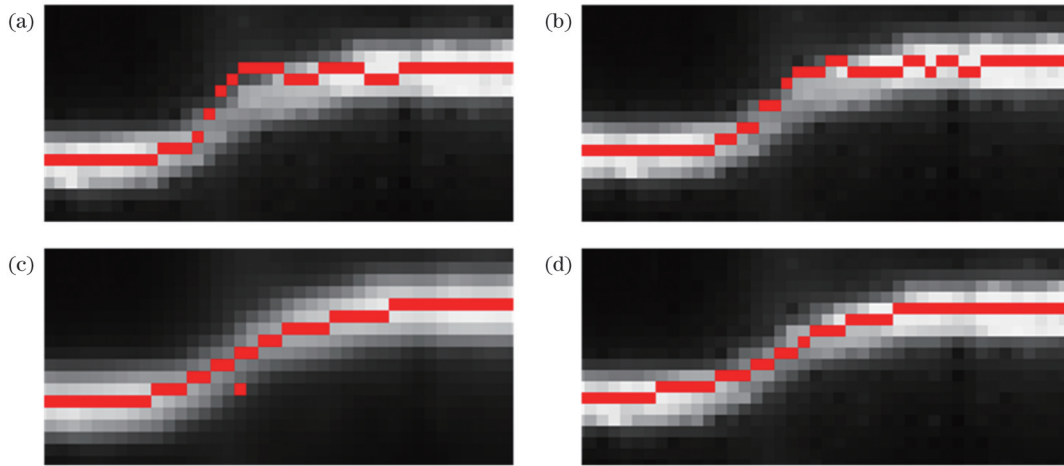


图 8 各算法对图 7(a) 曲率变化较大处提取结果的局部放大图。(a) 几何中心法; (b) 灰度重心法; (c) Steger 法; (d) 本文算法
Fig. 8 Local zoom of extraction result by each algorithm for large curvature change in Fig. 7(a). (a) Geometric center algorithm; (b) gray gravity algorithm; (c) Steger algorithm; (d) proposed algorithm

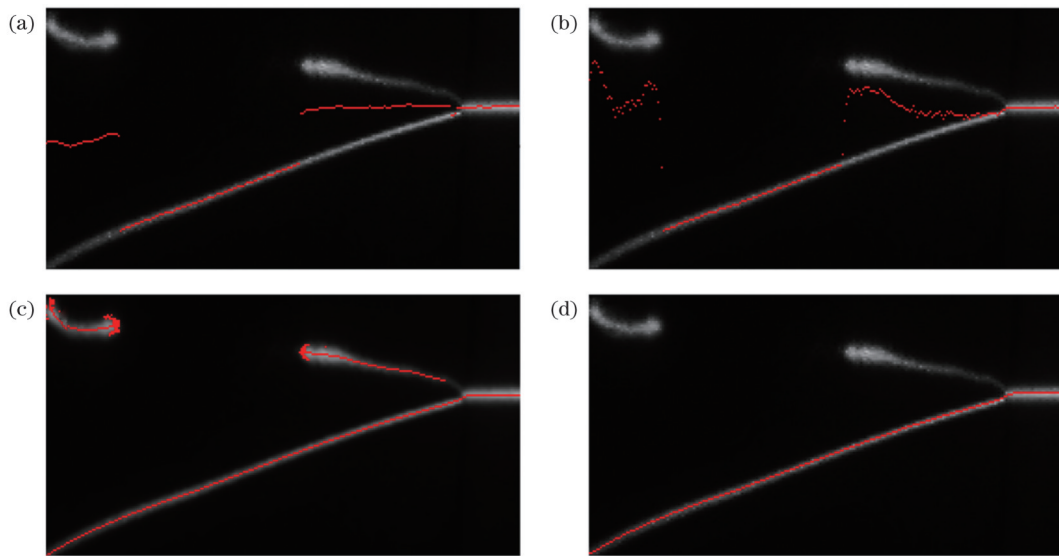


图 9 各算法对图 7(b) 的提取结果。(a) 几何中心法; (b) 灰度重心法; (c) Steger 法; (d) 本文算法
Fig. 9 Extraction result by each algorithm for Fig. 7(b). (a) Geometric center algorithm; (b) gray gravity algorithm; (c) Steger algorithm; (d) proposed algorithm

由图 8 和图 9 可以看出, 几何中心法和灰度重心法在曲率变化较大和干扰严重处, 受环境和干扰的影响, 将周围像素点作为激光条纹一起计算, 导致提取结果出现偏差。Steger 法在曲率变化较大处的提取效果较好, 但会有外点存在, 而在干扰严重处, Steger 法将干扰作为激光条纹提取了出来。相比之下, 本文算法在曲率变化较大和干扰严重处的提取结果符合激光条纹的真实形状, 提取效果较好, 这是由于本文算法进行单边跟踪时只搜索有效区域, 能够避免曲率变化较大处的环境影响, 最小二乘法能够较好地预测干扰严重处的中心, Hessian 矩阵能够在曲率变化较大处的法向修正初始中心点。

由于激光条纹的实际中心值及真实标准误差无法测得^[24], 本文使用计算机模拟生成一条截面呈高斯分布且中心纵向坐标 $y=224$ 的激光条纹, 并在图

像上添加椒盐噪声和与激光条纹相连的噪声, 使总信噪比为 8.52 dB, 去除椒盐噪声之后的信噪比为 9.00 dB。利用该干扰严重的激光条纹验证所提算法的提取精度。添加噪声的激光条纹模拟图像如图 10 所示。

分别使用几何中心法、灰度重心法、Steger 法与本文算法对图 10 进行中心线的提取, 将实线框和虚线框中的提取结果进行局部放大, 如图 11 所示。

为更加清楚直观地看出各算法的提取结果, 将各算法提取的一系列中心点坐标绘制成折线图, 如图 12 所示。

由图 11 和图 12 可以看出, 几何中心法和灰度重心法在计算中心时, 将噪声作为激光条纹的一部分进行了计算, 导致整体提取偏差较大。Steger 法选择合适的高斯核能够过滤椒盐噪声, 但在噪声激光

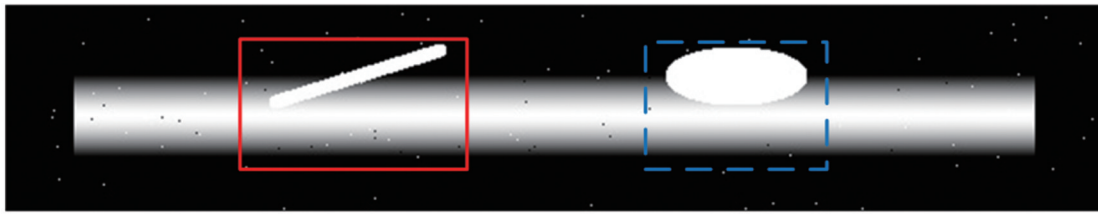


图 10 添加噪声的激光条纹模拟图
Fig. 10 Simulation of laser stripe with added noise

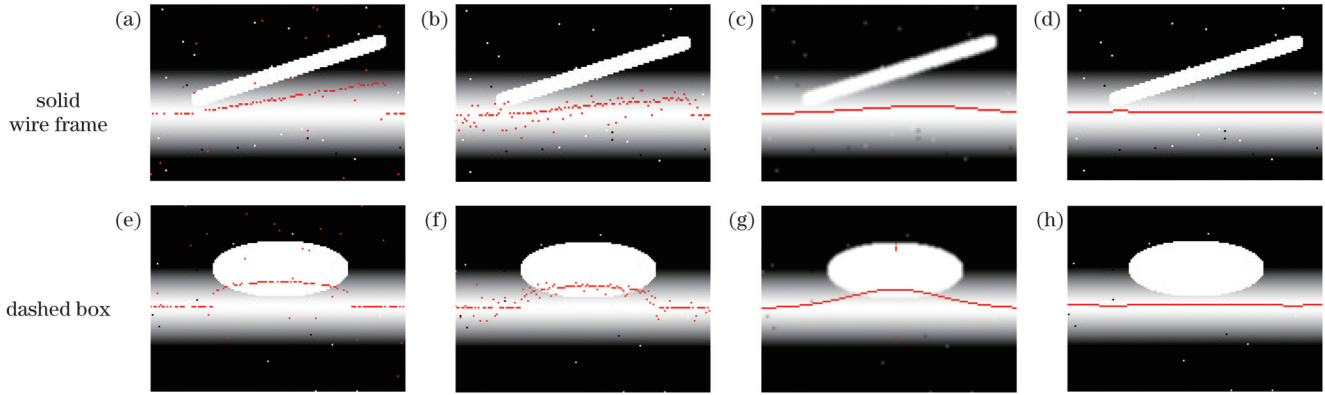


图 11 各算法提取结果的局部放大图。(a)(e)几何中心法；(b)(f)灰度重心法；(c)(g)Steger法；(d)(h)本文算法
Fig. 11 Local zoom of extraction result by each algorithm. (a)(e) Geometric center algorithm; (b)(f) gray gravity algorithm; (c)(g) Steger algorithm; (d)(h) proposed algorithm

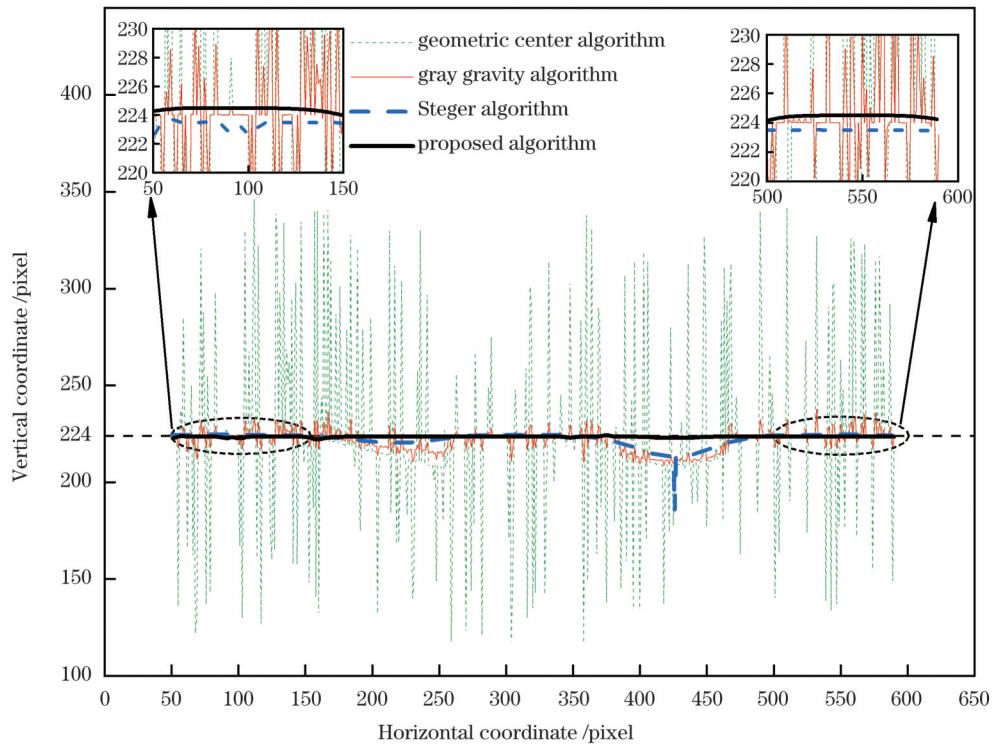


图 12 各算法的提取结果
Fig. 12 Extracted result by each algorithm

条纹相连处仍会受到影响,且有外点存在,提取结果偏离中心较大。本文算法能够抵抗椒盐噪声和噪声激光条纹相连的干扰,整体提取效果较好。这是由于在寻找单边跟踪起始点时,椒盐噪声被过滤,在噪声激光条纹相连处,对于超过光条宽度阈值的部分,

本文算法采用最小二乘法预测下个中心点,避免了干扰的影响。

采用均方根误差(RMSE)量化提取结果,进一步进行精度分析,设激光条纹的真实纵向坐标为 U ,提取的中心点纵向坐标为 U_s (s 为点编号), Q 为中心点个

数,则均方根误差的计算公式为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^Q (U_s - U)^2}{Q}}, \quad (7)$$

式中: E_{RMSE} 为RMSE的值。

表 1 为四种算法基于图 10 提取结果计算得到的 RMSE。

表 1 各算法提取结果 RMSE

Table 1 RMSE of extraction result by each algorithm

Extraction algorithm	Geometric center algorithm	Gray gravity algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm
RMSE /pixel	43.03	5.87	3.80	0.66

从表 1 可以看出,在干扰严重时,本文算法的 RMSE 最小,提取精度最高,是几何中心法的 65.19 倍,是灰度重心法的 8.89 倍,是 Steger 法的 5.76 倍。这是由于:本文算法采用最小二乘法对干扰严重处的激光条纹中心点进行预测,能够排除干扰的影响,而传统算法无法避免图 10 中噪声的干扰,将其作为激光条纹

的一部分进行计算,导致 RMSE 较大。

为进一步验证本文算法的精度,对相机和激光平面进行标定,标定完成后采用几何中心法、灰度重心法、Steger 法与本文算法分别对 2、5、10 mm 厚的标准量块进行测量。图 13 为标准量块测量精度实验图,表 2 为各算法的测量结果,图 14 为各算法的测量结果及误差。

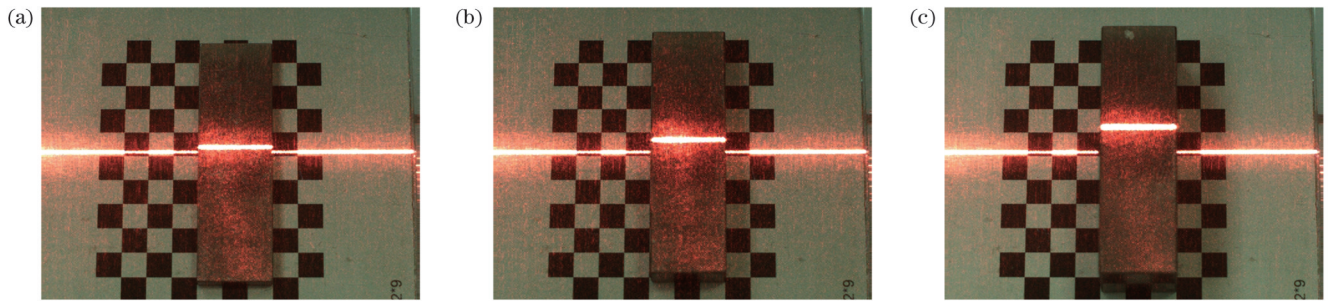


图 13 测量精度实验。(a) 2 mm 厚标准量块;(b) 5 mm 厚标准量块;(c) 10 mm 厚标准量块

Fig. 13 Measurement accuracy experiment. (a) 2 mm thick standard gauge block; (b) 5 mm thick standard gauge block; (c) 10 mm thick standard gauge block

表 2 各算法测量结果

Table 2 Measurement result of each algorithm

unit: mm

Theoretical thickness of standard gauge block	Actual thickness of standard gauge block	Measurement result of geometric center algorithm	Measurement result of gray gravity algorithm	Measurement result of Steger algorithm	Measurement result of proposed algorithm
2	2±0.00012	1.80182	1.81341	2.17729	1.94266
5	5±0.00012	4.82087	4.82656	5.09943	4.93455
10	10±0.00012	9.89274	9.89899	10.14800	9.90529

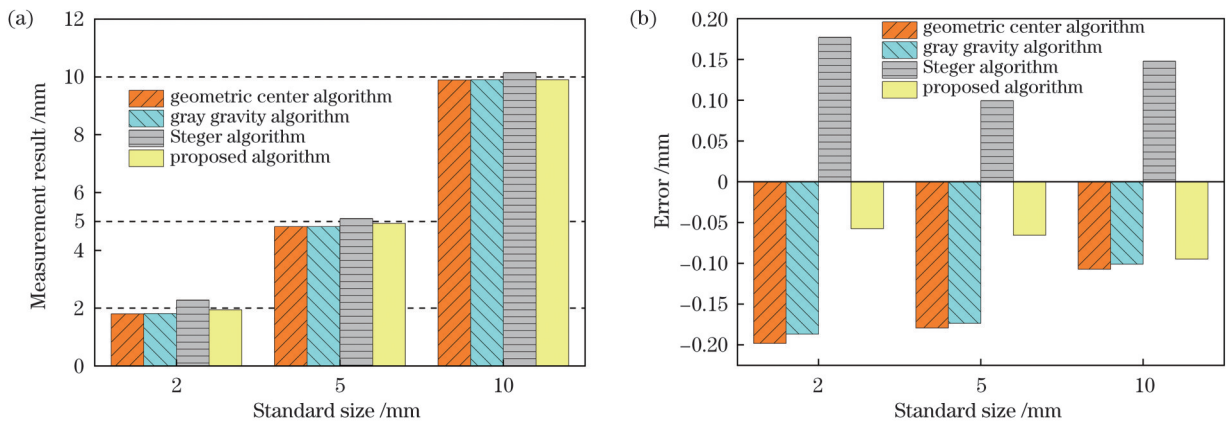


图 14 各算法测量结果及误差。(a)测量结果;(b)测量误差

Fig. 14 Measurement result and error of each algorithm. (a) Measurement result; (b) measurement error

从表 2 和图 14 可以看出,本文算法的测量误差最小,测量结果最接近标准值,精度最高,是几何中心法的 2.44 倍、灰度重心法的 2.32 倍、Steger 法的 2.06 倍。这是由于:本文算法在提取激光条纹的初始中心点之后,利用 Hessian 矩阵在初始中心点法向上进一步计算了激光条纹的中心点,提高了

精度。

3.2 速度分析

分别采用四种算法对 6 种不同规格的图片进行处理,每种规格的图片重复提取 5 次,取平均值作为每种规格图片的处理时间。表 3 为四种算法处理每种图片的时间表。

表 3 各算法处理时间
Table 3 Processing time of each algorithm

Picture specification / (pixel×pixel)	Processing time/s			
	Geometric center algorithm	Gray gravity algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm
720×540	0.084	0.092	0.167	0.013
1280×1024	0.127	0.147	0.340	0.033
1440×1080	0.162	0.172	0.383	0.038
1920×1200	0.196	0.212	0.534	0.057
2448×2048	0.320	0.335	1.072	0.112
4024×3036	0.666	0.724	2.525	0.230

从表 3 可以看出,本文算法的平均处理时间最短,Steger 法的处理时间最长,灰度重心法和几何中心法的处理时间相近。本文算法提取速度约为几何中心法的 3.96 倍,约为灰度重心法的 4.32 倍,约为 Steger 法的 10.52 倍,可见本文算法具有较快的提取速度。这是由于:本文算法改进了边界跟踪算法,通过规划搜索路径,选择性搜索边界点邻域,并仅针对初始点计算法

向,减少了算法法的像素点数量,这些均提升了速度。

3.3 适用性分析

为验证本文算法的适用性,采集不同工况下的激光条纹,依次得到折线、弧线、斜线弧线相切、连续变化曲线四种类型的激光条纹图像,本文算法的处理结果如图 15 所示。

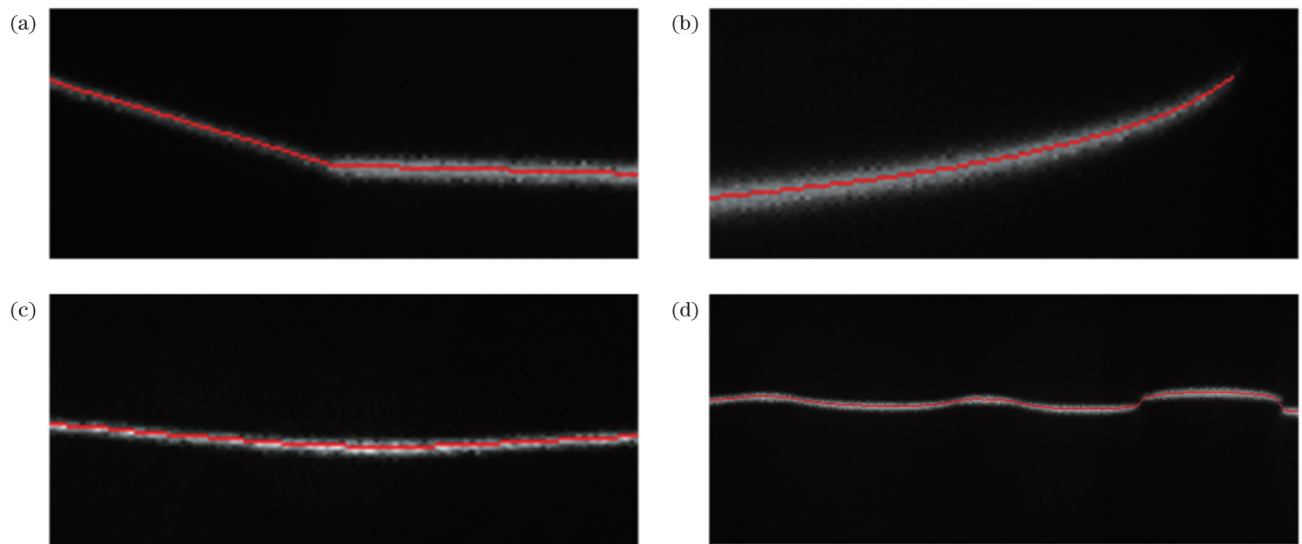


图 15 本文算法对不同种类的激光条纹处理结果。(a)折线;(b)弧线;(c)斜线弧线相切;(d)连续变化曲线

Fig. 15 Extraction results of proposed algorithm for different kinds of laser stripes. (a) Folded line; (b) arc; (c) diagonal arc tangent; (d) continuous variation curve

图 15 所示为不同种类的曲线:图 15(a)为曲率大小是 0 但方向变化的曲线,图 15(b)为曲率大小和方向连续规律变化的曲线,图 15(c)为曲率大小和方向变化较小的曲线,图 15(d)为曲率大小和方向不规律变化且变化较大的曲线。从图 15 可以看出,本文算法对

这四种激光条纹的提取结果符合激光条纹的真实走向,提取效果较好,具有较好的适用性。

4 结 论

针对传统算法对线结构光中曲率变化较大或干扰

严重处中心线提取效果不佳的问题,提出了一种基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法。通过改进边界跟踪算法,在跟踪时只对激光条纹上边界进行选择跟踪,提高了速度;通过结合灰度重心法和最小二乘法提取激光条纹的初始中心点,最小二乘法能够较好地预测干扰严重处的中心;通过初始中心点邻近像素差分构建 Hessian 矩阵,计算一系列初始中心点的法向,能够修正曲率变化较大处的初始中心点,且降低了计算的复杂度。实验结果表明,该算法在干扰严重(信噪比为 8.52 dB 且激光条纹与噪声相连)时,提取精度是几何中心法的 65.19 倍、灰度重心法的 8.89 倍、Steger 法的 5.76 倍,测量精度是几何中心法的 2.44 倍、灰度重心法的 2.32 倍、Steger 法的 2.06 倍,提取速度是几何中心法的 3.96 倍、灰度重心法的 4.32 倍、Steger 法的 10.52 倍。所提出的基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法能为非理想条件下的线结构光测量提供支持。

参 考 文 献

- [1] Liang J, Gu X Y. Development and application of a non-destructive pavement testing system based on linear structured light three-dimensional measurement[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119919.
- [2] Guo X Z, Shi Z Y, Yu B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [3] 张倩, 张坤, 朱美强, 等. 运动模糊情况下的结构光光条中心快速提取[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0112002. Zhang Q, Zhang K, Zhu M Q, et al. Fast extraction of structure light strip center under motion blur[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0112002.
- [4] Lü X Q, Gu D X, Wang Y D, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4715-4724.
- [5] 杨书娟, 蒋毅, 俞建峰, 等. 激光视觉引导的管道焊缝识别与跟踪系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1611003. Yang S J, Jiang Y, Yu J F, et al. Laser visual guided pipeline weld seam identification and tracking system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1611003.
- [6] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [7] Trucco E, Fisher R B, Fitzgibbon A W, et al. Calibration, data consistency and model acquisition with laser stripers[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1998, 11(4): 293-310.
- [8] Wang H F, Wang Y F, Zhang J J, et al. Laser stripe center detection under the condition of uneven scattering metal surface for geometric measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2182-2192.
- [9] Liu S Y, Zhang Y C, Zhang Y H, et al. Research on 3D measurement model by line structure light vision[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1): 88.
- [10] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [11] 刘祥, 王振亮, 姚鹏, 等. 三维形貌的线结构光精密旋转测量与误差补偿方法[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104004. Liu X, Wang Z L, Yao P, et al. Measurement and error compensation of 3D morphology with precision rotation line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104004.
- [12] 程鑫, 凌鹤, 李硕. 汽车焊缝密封胶条的光条中心提取算法研究[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 823-828. Cheng X, Ling H, Li S. Light bar center extraction algorithm for automotive weld sealant strips[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 823-828.
- [13] 李伟明, 梅枫, 胡增, 等. 线激光光条中心内部推进提取算法[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1104002. Li W M, Mei F, Hu Z, et al. Internal propulsion algorithm for extracting center of line laser stripe[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1104002.
- [14] 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): 0304002. Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304002.
- [15] Zhang M M, Li Z N, Zhang F Q, et al. Adaptive bidirectional gray-scale center of gravity extraction algorithm of laser stripes[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9567.
- [16] Wan Z R, Lai L J, Mao J, et al. Extraction and segmentation method of laser stripe in linear structured light scanner[J]. Optical Engineering, 2021, 60(4): 046104.
- [17] 杨毅, 闫兵, 董大伟, 等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101504. Yang Y, Yan B, Dong D W, et al. Method for extracting the centerline of line structured light based on quadratic smoothing algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101504.
- [18] Zheng Q C, Liu Q P, Zhu P H, et al. Weld line structured light stripe center extraction approach based on data dimensionality reduction[J]. Proceedings of the Romanian Academy, Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science, 2023, 24(1): 93-102.
- [19] 曹慧峰, 朱均超, 刘欣宜, 等. 一种快速光栅条纹中心亚像素坐标提取方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 52-57. Cao H F, Zhu J C, Liu X Y, et al. A method for extracting sub-pixel coordinates of grating fringe centre[J]. Laser Journal, 2021, 42(3): 52-57.
- [20] 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. Nan F, Li D H, Gao Q, et al. Implementation of adaptive light stripe center extraction of improved Steger algorithm[J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 85-88.
- [21] 蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006. Cai H Y, Feng Z D, Huang Z H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308006.
- [22] Seo J H, Chae S H, Shim J W, et al. Fast contour-tracing algorithm based on a pixel-following method for image sensors[J]. Sensors, 2016, 16(3): 353.
- [23] Zhao H N, Zhang Z, Fan M Y, et al. Calibration of a circular structured light measurement system based on a multi-diameter calibrator[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6): 065017.
- [24] 孙晓明. 基于结构光的公路路面裂缝检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 31. Sun X M. Research on key technologies of pavement crack inspection based on structure light[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 31.

Research on Center Extraction Algorithm of Line Structured Light Based on Unilateral Tracking and Midpoint Prediction

Wang Rongjun¹, Huang Mingming^{1,2}, Ma lidong^{1,2*}

¹*School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

²*Shanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Technology and System for Heavy-Duty Equipment Operations, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*

Abstract

Objective Line-structured light measurement technology is widely used in the field of industrial inspection. In the measurement system, the center extraction accuracy of the laser stripe directly influences the final measurement accuracy. Unfortunately, some factors in the industrial environment significantly affect the center extraction of the laser stripe. For example, the rounded convexity on the surface of a detected object leads to a large change in the curvature of the collected laser stripe, and the reflections on the surface of the detected object lead to a laser stripe connected with reflective noise, resulting in severe interference. In these situations, existing algorithms, such as the geometric center, gray gravity, and Steger algorithms, cannot obtain proper extraction results. In case of a large curvature change, existing algorithms fail to accurately extract the center of the laser stripe along its normal direction, resulting in a large deviation from the actual center. In the case of severe interference, existing algorithms fail to efficiently avoid interference disturbances; thus, the interference is calculated as part of the laser stripe. Therefore, it is necessary to implement countermeasures to solve these problems and improve the applicability of the center extraction algorithm.

Methods In this study, a center extraction algorithm for line-structured light based on unilateral tracking and midpoint prediction is proposed. The algorithm consists of three parts: laser stripe unilateral tracking, initial center-point determination based on the gray gravity and least-square algorithm, and center extraction based on the Hessian matrix. The upper boundary of the laser stripe is extracted using the proposed unilateral tracking algorithm according to the direction and grayscale of the laser stripe. The proposed unilateral tracking algorithm tracks only the upper boundary of the laser stripe and selectively searches the upper right, right, and lower right of the pixel eight-neighborhood when tracking each upper boundary point, thereby improving the processing speed of center extraction. In addition, the unilateral tracking algorithm can filter out small noises while performing unilateral tracking starting point searches. Simultaneously, the initial center point of the laser stripe is calculated using the gray gravity algorithm or least-square algorithm. In the laser stripe part without interference, the initial center point is calculated using the gray gravity algorithm. In the laser stripe part with serious interference (the signal-to-noise ratio is less than 15 dB, and the laser stripe is connected with noise), the initial center point is predicted by the least-square algorithm with a step length of 1 pixel. Finally, the Hessian matrix is used to modify the normal direction coordinates of the initial center point to improve the center extraction precision under large curvature change conditions. When constructing the Hessian matrix, the first-order and second-order partial derivatives are obtained from the pixel differential of the neighboring pixels at the initial center point, which reduces the complexity of the algorithm and ensures the accuracy of the center point.

Results and Discussions Laser stripes with a large curvature change and serious interference are created to compare the accuracy and speed of the proposed algorithm with those of existing algorithms. Compared with the geometric center, gray gravity, and Steger algorithms, the laser stripe center extracted by the proposed algorithm is closer to the real direction (Figs. 8 and 9), demonstrating that the proposed center-extraction algorithm for line-structured light based on unilateral tracking and midpoint prediction has the better center extraction accuracy. In the case of severe interference (the signal-to-noise ratio is 8.52 dB, and the laser stripe is connected with noise), the center extraction algorithm in this study shows the highest extraction accuracy, which is 65.19 times that of the geometric center algorithm, 8.89 times that of the gray gravity algorithm, and 5.76 times that of the Steger algorithm (Table 1). In the measurement accuracy experiment, the center extraction algorithm used in this study shows the best measurement accuracy, which is 2.44 times that of the geometric center algorithm, 2.32 times that of the gray gravity algorithm, and 2.06 times that of the Steger algorithm (Table 2 and Fig. 14). In the processing speed experiment, the center extraction algorithm used in this study shows the fastest processing speed, which is 3.96 times that of the geometric center algorithm, 4.32 times that of the gray gravity algorithm, and 10.52 times that of the Steger algorithm (Table 3). Furthermore, the center extraction algorithm proposed in this study is applicable to different types of laser stripes, such as folded lines, arcs, diagonal arc tangents, and continuous variation curves (Fig. 15).

Conclusions This study proposes a center-extraction algorithm for line-structured light based on unilateral tracking and midpoint prediction, which proves that the proposed algorithm can deal with laser stripe under the conditions with large curvature change or serious interference and obtain proper results. In addition, the proposed algorithm is faster and more applicable than existing algorithms. These advantages enable the proposed algorithm to provide support for line-structured light measurements under non-ideal conditions.

Key words measurement; center extraction; unilateral tracking; midpoint prediction; differential; line-structured light