

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210349

基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取

王志永^{1,2} 于宇^{1,2} 王武越^{1,2} 宋长禹^{1,2}

(1. 河北工业大学先进激光技术中心 天津 300401; 2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室 天津 300401)

摘要: 在三维测量与重建过程中,线激光条纹中心的提取尤为重要,Steger 算法由于运算量巨大,无法满足工业中实时性的要求。为了解决 Steger 算法运算量大、提取效率低的问题,本文提出了基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取方法,主要用于提高光条中心提取效率。首先通过滤波和形态学方法对图片进行预处理去除噪声。其次,将灰度化图像进行阈值分割,降低图像复杂度。最后,通过提取感兴趣区域、粗略估算光条宽度降低算法冗余度,再运用 Steger 算法对感兴趣区域内光条进行中心提取。通过实验数据分析,改进后的 Steger 算法流程与传统 Steger 算法相比较,不仅继承了传统 Steger 算法优良的稳定性,而且有效地提高了光条纹中心提取效率,为实时进行三维重建与测量打下了基础。

关键词: 线激光;Steger;中心提取;感兴趣区域

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Line laser center extraction based on improved Steger algorithm

Wang Zhiyong^{1,2} Yu Yu^{1,2} Wang Wuyue^{1,2} Song Changyu^{1,2}

(1. Advanced Laser Technology Center of Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China)

Abstract: In the process of three-dimensional measurement and reconstruction, the extraction of the center of line laser stripe is particularly important. Steger algorithm can not meet the real-time requirements of industry due to its huge amount of calculation. In order to solve the problem that Steger algorithm has a large amount of computation and low extraction efficiency, a line laser center extraction method based on the improved Steger algorithm flow is proposed in this paper, which is mainly used to improve the extraction efficiency of light bar center. Firstly, the image is preprocessed by filtering and morphological methods to remove noise. Secondly, the gray image is thresholded to reduce the complexity of the image. Finally, the redundancy of the algorithm is reduced by extracting the region of interest, roughly estimating the width of the light bar, and then the Steger algorithm is used to extract the center of the light bar in the region of interest. Through the analysis of experimental data, compared with the traditional Steger algorithm, the improved Steger algorithm not only inherits the excellent stability of the traditional Steger algorithm, but also effectively improves the efficiency of light stripe center extraction, laying a foundation for real-time 3D reconstruction and measurement.

Keywords: linear structured light; Steger; center extraction; region of interest

0 引言

当今社会,三维重建技术越来越成熟,逐渐被应用在各行各业中。线激光三维重建技术是以三角法为原理,高精度、高效率、高速度、非接触、实时性强为特点,在零件缺陷识别检测、逆向工程、古文物恢复重建、视觉导航^[1-2]等众多领域有着广泛应用。由于线激光可以有效的增加物体表面的纹理特性,所以双目立体视觉与线激光的结合让弱纹理

物体识别难的问题得到有效解决^[3]。在三维重建过程中,线激光条纹中心线的提取质量至关重要,而影响光条中心提取的因素主要包括线激光光束的质量、被测物体的特性、外部测量环境等^[4]。因此如何高精度、快速地提取光条纹中心线是整个三维重建中关键指标。

常见的光条中心提取算法,例如灰度重心法、极值法、方向模板法,算法简单,提取效率高,但是由于极易受到噪声影响导致光条中心提取精度低。而传统 Steger 算法提

收稿日期:2022-06-17

取精度高,稳定性强,可以实现亚像素提取,但由于在 Steger 算法中每个像素点都要进行 5 次二维高斯卷积,导致运算量巨大^[5],实时性测量无法保障。虽然基于光条区域光条提取精度的算法上,研究学者做出了许多改进,但是在提高实时性方面的算法并不多。

针对上述问题,本文给出了一个通过改进 Steger 算法流程的线激光中心提取方法,来提高光条中心提取效率。当前,在提高 Steger 算法,国内外普遍的方式有两类:第 1 种是修改 Steger 算法中的卷积核,从而增加提取效率。第 2 种是提取线激光条纹的感兴趣区域(region of interest),再利用 Steger 算法进一步获取光条中心,降低运算量,提升提取效率。虽然第一种算法能有效提高 Steger 算法效率,但提取精度会降低^[6]。考虑到测量精度问题,本文采用上述第 2 种方法来实现 Steger 算法流程的改进,该方法的具体步骤分为:1)将带激光条纹的彩色图片进行单通道灰度化处理,用来增强对比度,降低运算量。2)通过中值滤波和形态学方法对图片进行预处理,去除噪声。3)采用大津法自动阈值分割将光条 ROI 分割出来。4)对含光条纹的 ROI 进行提取,进一步降低运算量。5)运用灰度重心法提取光条中心线,点斜式求取法线,进而获取光条宽度。6)运用 Steger 算法提取光条中心,最终实现亚像素坐标的提取。

1 算法原理

1.1 Steger 算法原理

在线激光条纹中心提取过程中,Steger 算法以 Hessian 矩阵为基础,实现对光条纹中心亚像素坐标的提取。该算法的基本步骤是^[7-9]:1)从 Hessian 矩阵中求解出线激光条纹的法线方向。2)在光条纹法线方向上将其灰度分布按照泰勒多项式展开,求取到的极大值即为光条在该法线方向上的亚像素坐标。对于二维离散图像 $I(u, v)$ 来说, Hessian 矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H}(u, v) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uu} & \mathbf{I}_{uv} \\ \mathbf{I}_{uv} & \mathbf{I}_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, u, v 分别代表像素的行坐标和列坐标; $I(u, v)$ 代表像素 (u, v) 的灰度也可以称为灰度分布函数 $\mathbf{I}_{uu}, \mathbf{I}_{uv}$ 和 \mathbf{I}_{vv} 均为 $I(u, v)$ 和二维高斯函数 $G(u, v)$ 卷积计算得到的。其计算过程如下所示:

$$\mathbf{I}_{uu} = \frac{\partial^2}{\partial u \partial u} G(u, v) \otimes I(u, v) \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_{uv} = \frac{\partial^2}{\partial u \partial v} G(u, v) \otimes I(u, v) \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_{vv} = \frac{\partial^2}{\partial v \partial v} G(u, v) \otimes I(u, v) \quad (4)$$

其中, $G(u, v) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \left(-\frac{u^2 + v^2}{2 \cdot \sigma^2} \right)$ 为二维高斯

函数,其主要作用是为了让光条灰度分布特性更加明显,

\otimes 代表卷积。在 $G(u, v)$ 表达式中, σ 为高斯函数的标准差,一般取 $\sigma \geq \frac{w}{\sqrt{3}}$, w 代表光条宽度。在像素 (u, v) 处的

Hessian 矩阵有两个特征向量,其中一个绝对值较大,为该像素处的法线方向向量,而另外一个则是切向方向向量。因此可以通过求取 Hessian 矩阵的特征向量来计算出法线方向。某一像素点 (u_0, v_0) , 在二阶泰勒展开式 Hessian 矩阵为:

$$\mathbf{H}(u_0, v_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uu} & \mathbf{I}_{uv} \\ \mathbf{I}_{uv} & \mathbf{I}_{vv} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由该点的 Hessian 矩阵所求出的特征值和特征向量分别与该点的法线方向和该方向上的二阶方向导数相对应。其中法线方向的单位向量为: $\mathbf{e} = [\mathbf{e}_u, \mathbf{e}_v]$, 并且在光条纹法线方向上的像素点 $(u_0 + t \cdot \mathbf{e}_u, v_0 + t \cdot \mathbf{e}_v)$, 此时该像素点的灰度值 $I = (u_0 + t \cdot \mathbf{e}_u, v_0 + t \cdot \mathbf{e}_v)$ 可以由像素 (u_0, v_0) 的灰度 $I(u_0, v_0)$ 和二阶泰勒展开多项式表示为:

$$I(u_0 + t \cdot \mathbf{e}_u, v_0 + t \cdot \mathbf{e}_v) = I(u_0, v_0) + t \cdot \mathbf{e} [I_u, I_v]^T + t \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{H}(u, v) \cdot \mathbf{e}^T \quad (6)$$

其中, $t = -\frac{\mathbf{e}_u \cdot I_u + \mathbf{e}_v \cdot I_v}{\mathbf{e}_{uu}^2 \cdot I_u + 2\mathbf{e}_u \cdot \mathbf{e}_v \cdot I_{uv} + \mathbf{e}_{vv}^2 \cdot I_{vv}}$, 再将 t

代入其中即可求出光条纹中心的亚像素坐标。

1.2 图像灰度化

由于本文选用的是彩色相机,拍到的图像为彩色三通道图像,选用通道分离的方法将带有线激光的图片进行灰度化处理,选用三通道中对比度最高灰度图,用来提高算法的精度和处理速度。如图 1 所示为直接灰度化和单通道处理效果图。通过对彩色图像分离通道可以看出,如图 1(a) 所示经过直接灰度化处理后,图像较为清晰,但光条附近存在明显的毛刺噪声,为提高光条中心提取精度,进行单通道灰度化处理。如图 1(b) 所示为蓝色通道灰度化,其处理效果差,图像对比度较低,光条边缘毛刺噪声较多。图 1(c) 所示为绿色通道灰度化处理,该法虽然对比度较高,但是光条纹呈现效果极差,无法满足光条中心提取要求。如图 1(d) 所示,经过红色通道灰度化后的激光条纹的对比度最高,边缘毛刺噪声最少,效果最好。因此,为了让提取到的光条中心坐标更加精确,本文选用红色通道处理后的图像作为灰度图像。

2 图像的预处理

在实际图像采集过程中,许多都带有严重的噪声,其中一小部分是设备本身产生的高斯噪声,另一大部分则来源于原图像。对于设备产生的高斯噪声,运用传统的去噪方法即可以有效去除,但是对于去除原图本身存在的噪声则效果不理想。本文采用传统去噪方法和形态学方法处理相结合来去除图像中存在的噪声。

2.1 传统方法去噪

在三维重建与测量过程中,为了避免噪音对结果的负

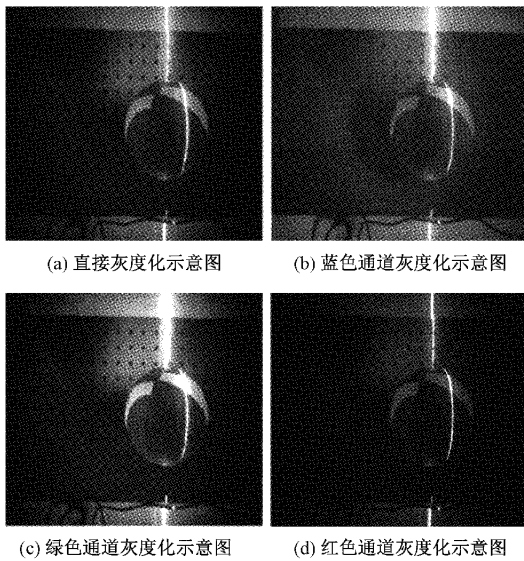


图 1 直接灰度化和单通道处理效果图

面影响,选择光条中心前要对图片经过过滤处理过程。常见的滤波器方式一般包括:高斯滤波、中值滤波、平均滤波、双边滤波等^[10]。在消除高斯噪声和毛刺噪音方面,中值滤波即可达到很好的功效,所以本文选取的是中值滤波处理灰度化后的图片。如图 2(a)所示为灰度化原图,图 2(b)为中值滤波后的效果图。通过对比两图可以看出中值滤波后,光条纹边缘噪声明显减少。由此可见,在保留图像有效信息的前提下对光条纹图像进行中值滤波,可以有效去除边缘噪声、平滑图像。

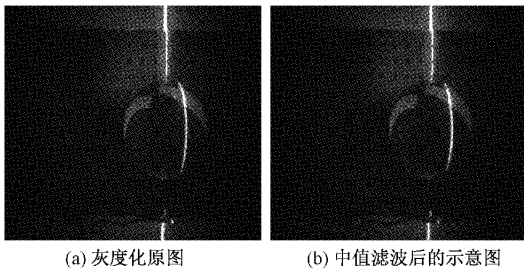


图 2 中值滤波前后对比

2.2 形态学方法去噪

虽然上述中值滤波在去除高斯噪声效果比较好,也可以去除一些孤立噪点,但是去除较大像素的孤立噪点十分不理想,考虑到实际处理过程中存在这两类噪声,本文采用中值滤波和腐蚀法相结合来去除噪声。腐蚀法在收缩光条边缘上效果较好,实际操作过程中要选出合适的结构元,要保证原图有效边缘信息不缺失的情况下腐蚀掉更多的噪声,然后再进行膨胀操作,使图像有用信息尽可能的接近原图效果^[11],图 3 即为腐蚀膨胀后的效果图。如图 3 所示,经过形态学方法腐蚀膨胀后,进一步有效去除了图像中的噪声。

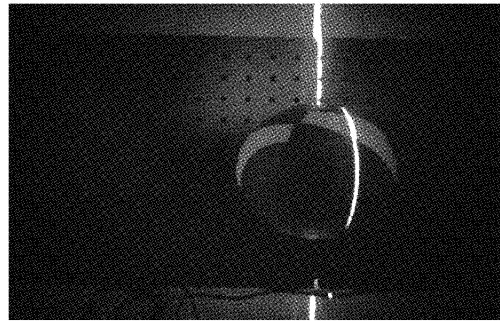


图 3 腐蚀膨胀效果图

3 改进 Steger 算法流程

Steger 算法是以 Hessian 为基础来对光条纹中心进行提取,但是 Hessian 矩阵运算量巨大,每个像素点都要进行 5 次的高斯卷积,从而使 Steger 算法的提取效率大幅度降低^[12],实时性测量很难实现。本文提出的改进算法流程如图 4 所示,主要通过缩小光条中心有效区域减少计算量、估算光条宽度降低算法冗余度来提高算法的提取效率。具体处理流程步骤为:首先通过单通道灰度处理,自适应阈值分割降低计算量,再运用形态学处理进行边缘去噪、修补光条缺陷,然后自适应估算光条纹宽度,设置合适的均方差 σ 。再进行提取有效的 ROI,进一步提升处理速度,最后运用 Steger 算法提取光条纹中心。

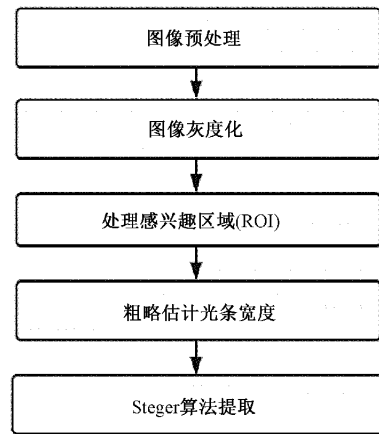


图 4 改进算法流程

3.1 处理感兴趣区域 (ROI)

1) 大津法 (OTSU) 阈值分割

在所采集的图片中,往往含有丰富的信息,光条纹和背景一般都在其中。将目标图像进行阈值分割,可以把目标图像中的光条区域和背景区域分割开来,从而有效降低图像的复杂程度、减少运算量、提高运算速度^[13]。

大津法又被称作最大类间阈值法^[14],在图像分割领域被认为是阈值选取的最佳算法,它的基本思想是最大化类间方差,此法不受图像对比度和亮度的影响,并且计算相对简单,因此被广泛应用在图像处理领域。其基本原理可以

大致概括为:对于图 $I(x, y)$,前景点(即目标)与背景之间的分离阈值记作 T ,属于前景的像素点数占到整个图象点数的百分比记作 ω_0 ,其平均灰度为 μ_0 。背景像素点数所占到的占全部图片像素数的平均比例约为 ω_1 ,其平均灰度为 μ_1 。图像的总像素的加权平均灰度记作为 μ ,类间方差记为 g 。例如某灰度图的背景较暗,并且其大小为 $M \cdot N$,该灰度图象像素中的图像灰度小于阈值 T 的数量设为 N_0 ,其像素灰度大于阈值 T 的像素数量记作 N_1 ,则有:

$$\omega_0 = N_0/M \cdot N \quad (7)$$

$$\omega_1 = N_1/M \cdot N \quad (8)$$

$$M_0 + N_1 = M \cdot N \quad (9)$$

$$\omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (10)$$

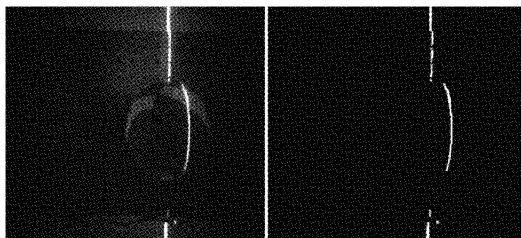
$$\mu = \omega_0 \cdot \mu_0 + \omega_1 \cdot \mu_1 \quad (11)$$

$$g = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (12)$$

再把式(11)代入式(12)中,可以得到式(13):

$$g = \omega_0\omega_1(\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (13)$$

这就是类间方差,再运用遍历法即可获得使类间方差 g 和最大的阈值 T 。图 5 为阈值分割前后的效果对比图。如图 5(a)所示为阈值前的图像。如图 5(b)所示为阈值分割后的图像,阈值分割不仅可以背景和光条区域清晰的分割开,更方便的提取光条信息,从而增加识别效率。还可以降低图像数据维度,使图像简单化,进而提高算法的运算速度。



(a) 阈值分割前的原图 (b) 阈值分割后示意图

图 5 阈值分割前后效果对比图

2) 提取有效 ROI

在采集到的图片中,只有含有线激光的区域称之为有效区域,但是线激光在整幅图中所占的比例十分小,为了达到提高提取速度和提取精度的目的,需要缩小 ROI,提取光条的有效区域。如图 6 所示为提取到的有效 ROI。由该图可以看出,经过提取后的图像,其有效 ROI 所占全图比例大幅度增加,算法对像素的运算由全图转换为 ROI,使算法的计算量大幅度降低,从而有效的提高算法提取效率,为实时测量打下坚实基础。

3.2 粗略估算光条宽度

在光条中心提取过程中,找到合适的光条宽度 W 至关重要。估算有效的光条宽度有两个方面的作用:1)减少计算量提高计算效率。2)通过 W 计算出最佳高斯核 $\sigma(=\sqrt{3}W)$ 的大小^[15]。本文在运用 Steger 算法提取光条纹中心之前,

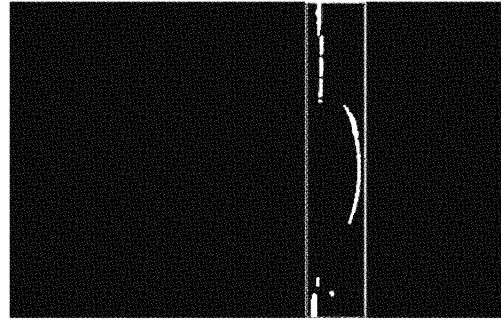


图 6 提取 ROI 区域

先对光条纹宽度进行了估算,从而降低算法的冗余度,提高光条中心提取效率。具体步骤为:

- 1) 灰度重心法快速提取光条纹中心。
- 2) 遍历中心线,每隔一定间隔求取一次切线的斜率,并根据点斜式求取法中心点的法线方向。
- 3) 将法线沿法线方向像两端延伸,直至达到两端设定的最低阈值后判定为光条边界点。
- 4) 计算边界点的所有宽度,再求取其平均值,最终得到光条的粗略宽度 W 。如图 7 所示为光条宽度估算的局部放大示意图。

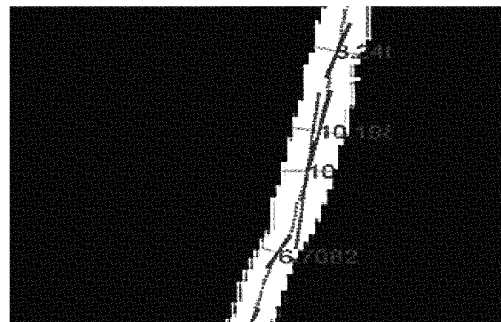


图 7 光条宽度测量局部放大示意图

4 实验结果与分析

根据上述实验步骤,进行实验分析与验证。本文所用的采集系统是 usb3.0 高帧率相机,所用环境为 Windows 10,编写软件为 MATLAB R2020a。实验中通过采集多组图像分别对光条中心提取时间和提取精度进行对比。

4.1 中心提取速度对比

在相同的光照环境下,本文分别采集了 5 组不同宽度的含有线激光条纹的图片,其编号分别为 1、2、3、4、5。分别用灰度重心法、传统 Steger 算法和本文改进后的 Steger 算法流程进行光条纹中心提取并统计每次光条纹中心提取的时间,如表 1 所示为 3 种算法在相同实验环境下的光条中心提取时间。由表 1 可以看出,相同的实验条件下,本文算法提取速度最快,灰度重心法的提取速度略高于本文算法,而传统 Steger 算法由于其复杂的计算量,导致其提取速度最慢。

表 1 提取光条中心时间

图像 (组)	各算法所用时间/s		
	灰度重心法	传统 Steger	本文算法
1	0.258 6	0.773 5	0.203 3
2	0.252 0	0.738 6	0.198 4
3	0.244 1	0.725 8	0.199 6
4	0.230 4	0.714 7	0.198 8
5	0.247 5	0.715 7	0.198 9

4.2 中心提取准确性对比

在相同的实验环境下,本文采用如图 8~10 所示的灰度重心法、传统 Steger 算法、改进后的 Steger 算法分别进行了光条中心提取实验来比较提取的准确度。当采用如图 8 所示的灰度重心法时,提取速度较快,但极易受噪声影响,光条中心提取有较大误差。采用如图 9 所示的传统 Steger 算法提取光条中心,抗噪性能好,可以准确提取光条中心,但算法运算量巨大,导致提取速度慢。采用如图 10



图 8 灰度重心提取法

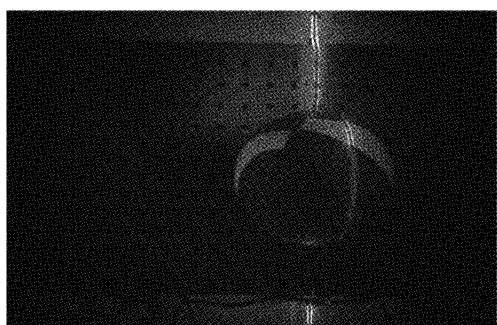


图 9 传统 Steger 算法

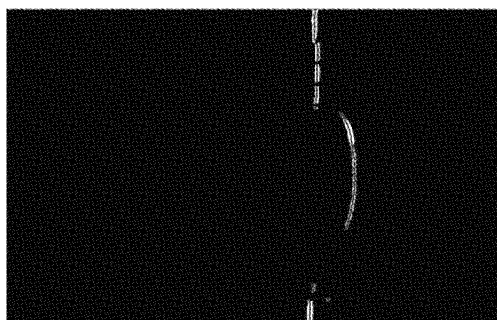


图 10 本文算法流程

所示的本文改进后的算法,不仅继承了传统 Steger 算法优良的抗噪性能、提取精度,并且大幅度的提升了算法提取效率。

5 结 论

本文提出了一种基于改进 Steger 算法流程的光条中心亚像素坐标的提取方法,在传统 Steger 算法流程上进行了改进,首先用灰度化处理和自适应阈值分割相结合,降低图像的复杂程度,提高提取效率。其次,通过提取有效 ROI,增大 ROI 在全图中所占比例,有效解决了 Steger 算法遍历整幅图耗时长的弊端。最后,通过粗略估算光条宽度来降低算法的冗余计算,降低算法运算量,提高提取效率。结合上述算法流程,改进后的算法在抗噪性能方面较大幅度优于灰度重心法,且在继承传统 Steger 算法稳定性强等优势的前提下,光条中心提取效率较传统 Steger 算法提高了近 4 倍,为线激光三维测量和重建在各个不同领域能实时应用提供的基础。

参考文献

- [1] GILLIES D. Close range photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 2015, 30(151): 318-322.
- [2] BÁSACA-PRECIADO L C, SERGIYENKO O Y, RODRÍGUEZ-QUINONEZ J C, et al. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 159-169.
- [3] ZHANG K, YAN M, HUANG T, et al. 3D reconstruction of complex spatial weld seam for autonomous welding by laser structured light scanning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 200-207.
- [4] 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.
- [5] 杨镇豪,杨柳,李辉,等. 复杂环境下结构光中心线提取算法 [J]. 计算机技术与展, 2018, 28(9): 7-10.
- [6] 卫晓鑫. 基于线激光的多视角三维重建与拼接方法研究 [D]. 天津:天津工业大学, 2021.
- [7] 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.
- [8] 毕超,周鹏,郝雪. 十字线结构光的光条中心线提取算法研究 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(6): 15-18.
- [9] 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.
- [10] 陈妍,徐海黎,邢强,等. 结合小波变换和双边滤波的 SICM 图像降噪算法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 114-119.
- [11] 高薪,胡月,杜威,等. 腐蚀膨胀算法对灰度图像去噪

- 的应用[J]. 北京印刷学院学报, 2014, 22(4): 63-65.
- [12] 曾凯,刘贺飞,何茜,等. 基于改进 Steger 算法的线结构光中心提取[J]. 河北联合大学学报, 2021, 43(1): 101-107.
- [13] 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.
- [14] 陈志伟,李世峰,刘锋. 基于改进 Otsu 算法的芯片识别分类系统[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(4): 6-10.
- [15] 徐静珠. 结构光三维测量中光条中心提取方法及其评价的研究[D]. 南京:南京大学, 2012.

作者简介

王志永, 硕士研究生, 主要研究方向为双目视觉线激光扫描。

E-mail:1808008216@qq.com

于宇(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为结构光三维重构算法研究。

E-mail:yuyu1990@hebut.edu.cn

王武越, 硕士研究生, 主要研究方向为结构光三维重建技术。

E-mail:wwy97929@163.com

宋长禹, 硕士研究生, 主要研究方向为高重频大能量短脉冲激光技术。

E-mail:1083835373@qq.com