

激光与光电子学进展

时间连续帧信息复用条纹中心快速提取方法

易京亚^{1*}, 赵天光¹, 吴雨祥², 马章宇¹, 苏金字¹¹季华实验室智能机器人工程研究中心, 广东 佛山 538000;²西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710000

摘要 线结构光三维测量技术通过逐行扫描工件, 计算工件连续轮廓线三维坐标, 最终拼接各轮廓线形成完整的三维形貌。为了研究扫描过程中图像连续帧之间的相似性关系, 提出一种时间连续帧信息复用的条纹中心快速提取方法, 进一步提升线激光光条中心线提取速度。首先, 采用自适应光条分割重心提取算法对首帧激光光条进行中心线坐标计算; 然后, 在时间连续帧中心线坐标信息的基础上, 对当前帧光条图案进行快速光条粗定位; 最后, 对光条中心线进行亚像素精度计算。该方法根据时间连续帧图像的相似性, 进行连续帧光条中心线坐标信息复用, 减小重复计算, 提高算法速度。实验结果表明, 该方法可实现高达 133 frame/s 的中心线计算速度, 大幅提高了结构光三维扫描速度, 可应用于其他大型工件的三维重建。

关键词 仪器, 测量与计量; 三维测量; 线结构光; 中心线; 时间连续帧

中图分类号 Tp391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1912001

Fast Extraction Method of Stripe Center Based on Time-Continuous Frame Information Multiplexing

Yi Jingya^{1*}, Zhao Tianguang¹, Wu Yuxiang², Ma Zhangyu¹, Su Jinyu¹¹The Engineering Research Center for Intelligent Robotics, Jihua Laboratory, Foshan 538000, Guangdong, China;²School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710000, Shaanxi, China

Abstract Using three-dimensional (3D) measurement technology with linear structured light, the total 3D morphology of a workpiece can be reconstructed with continuous multi-frame contours that are adjacent. To improve the extraction speed of the centerline, a fast extraction method of stripe center based on time-continuous frame information multiplexing is proposed in this paper, which is in view of the similarity between continuous frame images. First, the centerline coordinates of the first frame laser stripe are calculated using the adaptive gravity-center extraction algorithm using stripe segmentation. Second, based on the centerline coordinate information of the previous frame, the rough location of stripe in the current frame image can be calculated quickly. Finally, the sub-pixel calculation on the centerline of the stripe is performed. According to the image similarity of time-continuous frames, the method multiplexes the centerline coordinate information to reduce repeated calculation, which can improve the algorithm speed effectively. The experimental results show that the method can achieve the centerline calculation with a higher speed of up to 133 frame/s, which greatly improves the 3D scanning speed with linear structured light and can be applied to other 3D reconstructions of large workpieces.

Key words instruments, measurement and metrology; three-dimensional measurement; linear structured light; center line; time-continuous frame

1 引言

线结构光三维(3D)测量技术是一种非接触式的3D测量技术, 具有设备简单、精度高、抗干扰性强等特

点, 近年来在3D建模、表面质量检测、机器人视觉技术等领域被广泛应用^[1]。其基本原理^[2]是将线激光投射到待测物体表面, 根据线激光在相机成像上像素偏差来计算轮廓点的3D坐标。实际使用中受各种因素影

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-12; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 季华实验室基于电弧焊的标准化机器人单元项目(X190041TB190)、国家自然科学基金(61805188)

通信作者: *yijy@jihualab.com

响^[3],相机拍摄到的激光条纹具有一定宽度,难以准确获取线激光像素位置,从而影响计算精度,因此,准确地提取激光条纹中心位置对计算轮廓真实坐标具有重要意义^[4]。传统的线激光条纹中心线提取方法主要有几何法^[5]、极值法^[6]、灰度重心法^[7]、Steger法^[8]等,在此基础上研究者们提出各种改进算法,包括光条图像去噪技术、阈值分割技术以及对传统算法精度提升方法等^[9],另外在抗干扰方面,周渊等^[10]将密度聚类算法与图像接缝算法进行结合实现复杂情况中心线有效提取;吴庆华等^[11]采用双频曲线拟合方法消除高频噪声对精度的影响;李叶萌等^[12]提出一种基于双高斯拟合光条的方法来抑制金属表面强反射光。

除精度外,测量速度也是研究重点,在船舶、桥梁、轨道交通等传统领域,单个工件尺寸巨大,3D重构速度往往成为评估实施方案的首要因素^[13-14]。线结构光技术中,对提高中心线计算速度也有大量研究,蔡怀宇等^[15]采用感兴趣区域(ROI)和高斯卷积方法来改进Steger算法,通过减少非光条区域计算提高Steger算法速度;李伟明等^[16]结合轮廓跟踪算法和重心提取算法,避免对非光条区域扫描,实现光条中心线快速提取,但该算法对背景光要求较高。王胜春等^[17]采用

ENet深度学习模板对激光条纹进行快速分割,再对子区域求取法线主方向,避免全局复杂模板匹配和梯度计算,提高算法时效性。

结合当前研究方向可知,目前对中心线提取算法改进主要局限于对单幅光条图像的研究,未结合扫描过程来进行算法优化。线结构光在形貌测量过程中采用连续多帧扫描、逐轮廓线计算,依次拼接最终形成完整的3D形貌。由于时间连续帧之间位移间隔一般在毫米量级,可认为连续帧之间具备一定程度的相似性,合理利用连续帧之间的相似信息能够极大节约计算资源,进一步提升测量速度。为此,本文首先研究基于自适应光条分割中心提取算法,以提高算法对背景光和杂散光的抗干扰性,确保连续帧之间的相似性;其次,提出基于时间连续帧信息复用的光条快速定位算法,减少重复计算,提升激光条纹中心线提取速度。

2 自适应光条分割中心提取算法

激光条纹中心线提取流程一般分3个步骤:图像预处理、图像光条定位、光条中心亚像素精度坐标提取^[9],基本流程如图1所示。

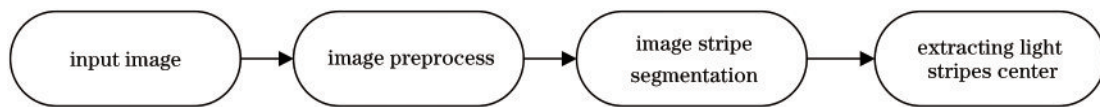


图1 激光条纹中心线提取流程

Fig. 1 Extraction process of laser fringe centerline

2.1 图像自适应预处理

随着线结构光应用场景的扩大,中心线提取算法对环境越来越复杂,为确保光条中心坐标提取稳定性,一般采用滤光片移除大部分环境光干扰^[3]。在制造业场景中往往需要对金属工件进行3D重构,由于储存和运输的不规范导致工件表面状态不一,过度的磨损导致金属表面平滑。在采用线结构光3D测量过程中,金属表面平滑区域将造成投影激光的类镜面反射,从而在金属表面形成多次反射杂散光,因其波长与原激光相近滤光片难以滤除。

多次反射光的存在不利于光条中心的准确提取,需要予以移除。在直射式激光扫描系统中相机接受的光线为漫反射光,激光经金属表面镜面或类镜面反射后光强存在衰减,多反光形成的漫反射光斑往往弱于主光条,因此本文提出自适应伽马变换算法将原激光和多反射光进行分离。伽马变换的基本公式为

$$I_o/I_{\max} = (I_i/I_{\max})^\gamma, \quad (1)$$

$$\gamma = \bar{I}/k, \quad (2)$$

式中: I_i 为输入的图像光强灰度值; I_o 为变换输出光强灰度值; I_{\max} 为图像所能表征的灰度最大值,对于8位相机而言,最大灰度值为255。为增强算法的自适应

能力,式(1)中的 γ 值由输入图像光强决定^[18],如式(2)所示,其中 k 为光强比例系数, \bar{I} 为图像像素的平均强度, $\bar{I} \in [0, I_{\max}]$ 。考虑到常见焊接金属钢、铝等板材表面粗糙度及实际激光入射角度等因素,637 nm激光在其表面多次反射的反射率难以超过80%^[19-20],当相机捕获主光线灰度值为255时,多次反射光线被相机捕获形成的杂光区域灰度值将小于204,因此当 γ 取值在2~5范围时,能够较好地保留灰度值大于230像素值光条区域的亮度。为确保 γ 取值合理且避免额外计算量, k 的取值与激光光条带宽在整幅图像的占比相关。对 k 的取值做简单分析如下,光条图像中激光像素宽度约20 pixel,取亮度均值为230灰度级,除光条外其他像素灰度级取0,则单行总亮度为4600灰度级,当光条图像单行宽度为1024 pixel到500 pixel时,激光像素宽度保持不变, \bar{I} 的值为4.49~9.20。若 γ 取2时,反推 k 的理论取值为2.24~4.60;若 γ 取4时,反推 k 的理论取值为1.12~2.55。因此, k 的取值由具体硬件配置和使用场景进行确定,并能够在该系统下对 γ 值进行较好的调节。图2为自适应伽马变换算法处理效果图。

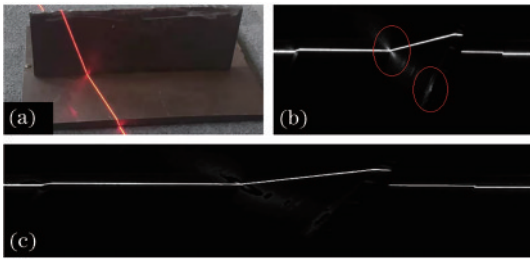


图 2 扫描工件图和线激光。(a)扫描工件;(b)线激光原图;
(c)自适应伽马变换算法处理所得图像

Fig. 2 Workpiece and line laser image. (a) Workpiece; (b) line laser image; (c) image processed by adaptive gamma transform algorithm

2.2 图像光条分割定位

在原始激光图中,激光条纹仅占图像很少一部分,为避免非光条数据的运算,本文对光条区域进行了双阈值化分割^[11],首先,通过二值化提取光条最大外接矩形,其次,对最大外接矩形区域内灰度值大于阈值 g_T 的像素添入光条模板,该模板区域内的像素值参与后续的光条中心提取计算。如图 3 所示,矩形框为第一次阈值提取所得的最大外接矩形,白色区域光条区域为参与中心线计算的光条模板。经过双阈值分割后,光条中心线计算的数据范围大大缩小。

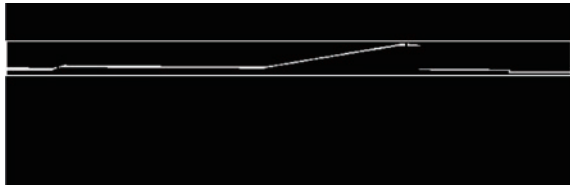


图 3 双阈值光条分割

Fig. 3 Double threshold optical strip segmentation

2.3 中心线亚像素坐标提取

灰度重心法将光条纹截面灰度分布的质心作为光条纹中心,能够快速实现中心线亚像素精度提取。为确保精度和速度,本文采取二次灰度重心法提取中心线。第一次对光条模板内的原图上像素值逐行求取灰度重心,获得粗中心线。由于逐行重心法未考虑光条法线方向光强的变化因素,第二次执行灰度重心法是沿着粗中心线的法向方向取 n 个点进行计算。光条法线方向的计算,采用 Bazen 方法^[21]计算所得,结果如图 4 所示。

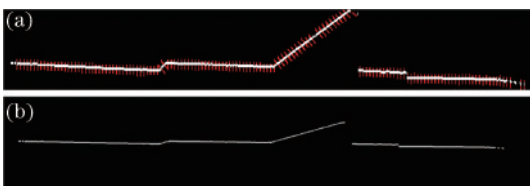


图 4 亚像素坐标提取。(a)中心线法向方向图;
(b)亚像素精度中心线

Fig. 4 Subpixel coordinate extraction. (a) Normal direction of centerline; (b) subpixel precision centerline

3 时间连续帧信息复用算法

线结构光技术进行 3D 测量时,采用逐行扫描物体轮廓线的方式。扫描过程中不难发现,大部分时间连续的激光条纹图具有极强的相似性,相似性表现为两个方面:第一,激光条纹在图片中的位置相近;第二,原始图片各区域光强相近。位置相近原因在于当扫描方向精度控制在毫米量级时,物体相邻轮廓线变化较小,时间连续帧之间光条位置变化小;光强相近原因在于相机采集速度快,连续帧之间环境光强变化小,且连续帧之间物体表面反射特性变化小。由于光条位置和整体光强具有相似性,前一帧中心线坐标信息,对后一帧具有极大复用价值,因此,时间连续帧信息复用算法能够减小冗余计算,提高中心线提取效率。

3.1 算法流程

传统中心线提取算法只考虑单幅图像内部特征,中心线提取流程一般采用预处理、分割、中心线提取 3 个步骤。时间连续帧信息复用算法则考虑连续帧之间的关联,在原有基础上增加时间连续帧中心线坐标信息,并把光条分割步骤替换为中心线近邻搜索,通过中心线的近邻搜索,能快速定位光条位置,避免冗余计算。

该方法基本流程如下,基本算法示意图如图 5 所示:

- 1) 输入相机采集激光条纹图;
- 2) 对图片进行自适应预处理,提高光条图像相似性;

3) 判断是否存在时间连续帧中心线坐标信息。若变量 A 值为 true,则采用中心线近邻搜索算法快速定位光条模板;若变量 A 值为 false,则采用图像光条分割定位方法找到光条模板;

4) 对光条模板进行二次灰度重心计算精确提取光条中心坐标;

5) 保存当前帧计算所得光条中心坐标。保存成功,则将 A 赋值为 true;保存失败则将 A 赋值为 false。对连续帧坐标信息进行更新,为下一帧光条中心线提取做准备。

3.2 中心线近邻搜索算法

中心线邻近搜索方法,以时间连续帧中心线坐标为原点,在当前中心点所在行(或列)内展开 k 邻域内符合阈值要求的搜索,该方法比传统算法,对整行(列)计算或整幅图进行分割具备明显的计算优势,能够大大提高光条粗定位的速度。中心线近邻搜索算法基本流程如图 6 所示,搜索算法表述如下。

令线激光图片 M 尺寸为 $R \times C$,且光条方向为竖直方向时,每行最多有一个中心点。令第 r 行中心点坐标为 $P_r(r, C_r)$,其中 $1 \leq r \leq R, 1 \leq C_r \leq C, r, C_r$ 均为整数,中心坐标点储存于向量 U_p ,共 R 个点。每帧

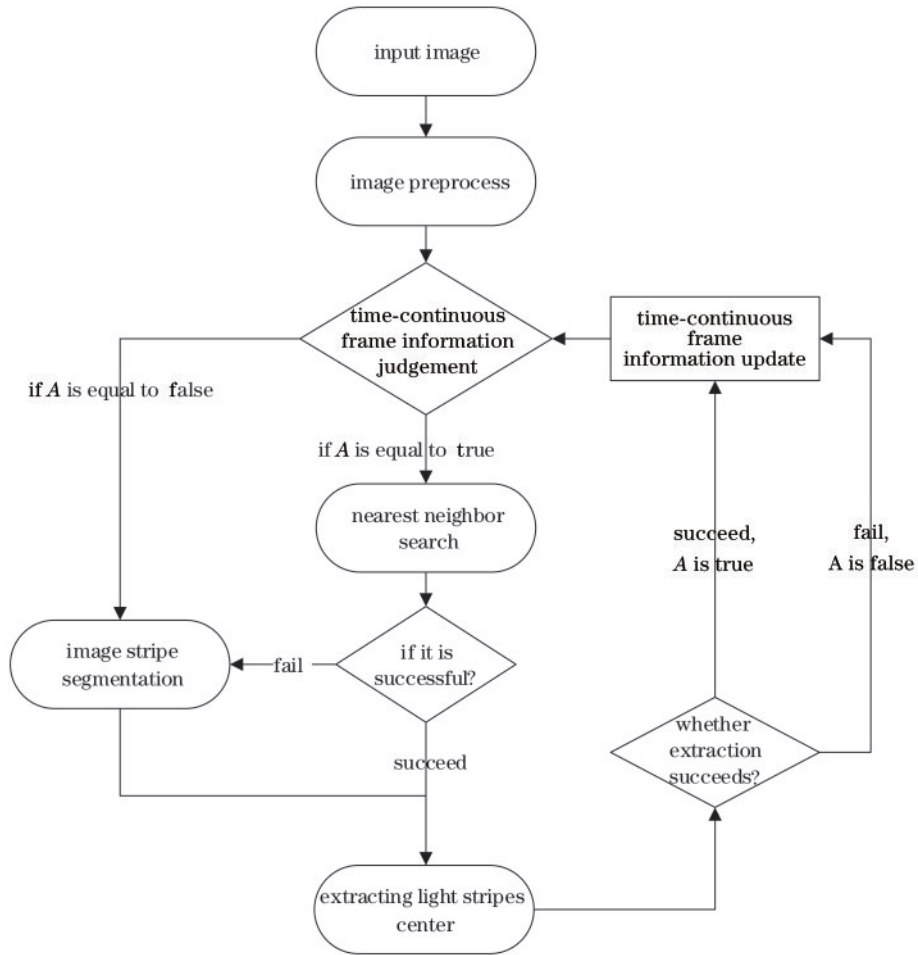


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of algorithm

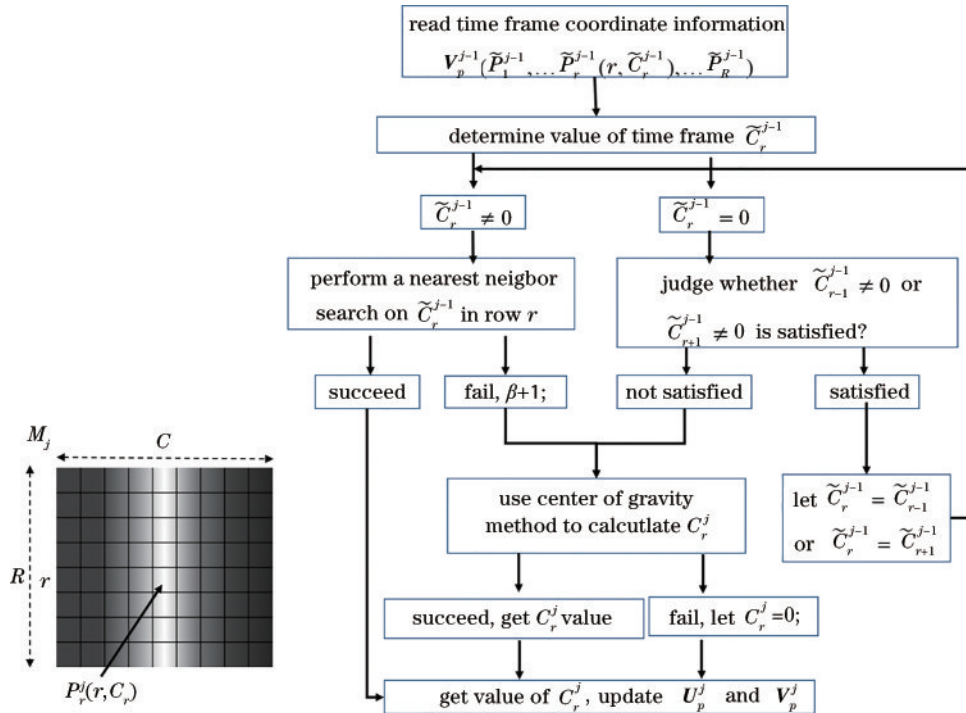


图 6 近邻搜索算法流程图

Fig. 6 Flow chart of nearest neighbor search algorithm

图像的时间连续帧信息由向量 \mathbf{V}_p 储存, 包含 $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_r(r, \tilde{C}_r), \dots, \tilde{P}_R$, 共 R 个点。 \mathbf{V}_p^j 表示第 j 帧 ($j > 1$) 图像中心线提取后所获取的时间连续帧信息向量, 为了合理利用连续帧之间的相似性, 连续帧中心线信息采用滑动平均进行计算。 $\tilde{P}_r^j(r, \tilde{C}_r^j)$ 中 \tilde{C}_r^j 的更新公式为

$$\tilde{C}_r^j = \begin{cases} 0 & C_r^j = 0 \\ \theta \times \tilde{C}_r^{j-1} + (1 - \theta) \times C_r^j & C_r^j \neq 0 \\ C_r^j & j = 1 \text{ or } \tilde{C}_r^{j-1} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 θ 为滤波系数, $\theta \in (0, 1)$ 。

当第 $j - 1$ 帧 ($j > 1$) 图像 M_{j-1} 中心点信息 \mathbf{V}_p^{j-1} 存在, A^{j-1} 为 true; 第 j 帧图像 M_j 中心线坐标 \mathbf{U}_p^j 的计算, 依赖于 \mathbf{V}_p^{j-1} 的信息。 对第 r 行中心 $P_r^j(r, C_r)$ 计算时, 根据检索 \mathbf{V}_p^{j-1} 第 r 行中心点 $\tilde{P}_r^{j-1}(r, \tilde{C}_r^{j-1})$ 的位置 \tilde{C}_r^{j-1} 是否为 0, 分别进行如下计算:

1) $\tilde{C}_r^{j-1} \neq 0$ 时, 表示连续帧的 r 行存在中心点。

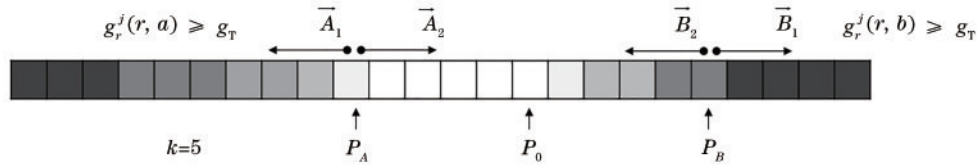


图 7 近邻搜索示意图

Fig. 7 Diagram of nearest neighbor search

b) 当确定 P_A 和 P_B 搜索方向后, 分别对搜索方向上点的灰度值与阈值比较, 确定 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 的值, 不同搜

根据时间连续帧相似性原则, 第 j 帧图像 M_j 在第 \tilde{C}_r^{j-1} 列附近也存在中心点 C_r^{j-1} 。 则对 M_j 图在 r 行以 \tilde{C}_r^{j-1} 列为中心, 进行半径为 k_s 的近邻搜索, 即搜索变量 x 范围为 $[a, b]$, 取 $a = \tilde{C}_r^{j-1} - k_s, b = \tilde{C}_r^{j-1} + k_s$, 搜索目的是为确定 M_j 在第 r 行光条模板范围 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 其中, 当像素点 $p_r^j(r, x)$ 的灰度值 $g_r^j(r, x) > g_T$ 时, 该点为光条模板内点, g_T 为激光条纹阈值。 为了提高搜索效率, 搜索原则如下。

a) 先计算边界值是否为光条模板内点, 并确定边界点搜索方向。

为简化表述, 令 $P_A = P_r^j(r, a), P_0 = P_r^j(r, \tilde{C}_r^{j-1}), P_B = P_r^j(r, b)$;

当 P_A 点灰度值 $g_A \geq g_T$ 时, 如图 7 所示, P_A 点搜索方向为 \bar{A}_1 , 否则为 \bar{A}_2 ;

当 P_B 点灰度值 $g_B \geq g_T$ 时, P_B 点搜索方向为 \bar{B}_1 , 否则为 \bar{B}_2 ;

索组合对应结果如表 1 所示, 为避免局部噪声对搜索结果产生影响, 在图像预处理阶段可引入高斯滤波处理。

表 1 不同搜索组合对应的 $[X_{\min}, X_{\max}]$

Table 1 Corresponding $[X_{\min}, X_{\max}]$ value for different search combinations

Search combination	P_A search abort condition	P_B search abort condition	X_{\min} value	X_{\max} value
\bar{A}_1, \bar{B}_1	$g_r^j(r, a - \delta_1) < g_T$	$g_r^j(r, a + \delta_2) < g_T$	$a - \delta_1 + 1$	$a + \delta_2 - 1$
\bar{A}_1, \bar{B}_2	$g_r^j(r, a - \delta_1) < g_T$	$g_r^j(r, a - \delta_2) \geq g_T$	$a - \delta_1 + 1$	$a - \delta_2$
\bar{A}_2, \bar{B}_1	$g_r^j(r, a + \delta_1) \geq g_T$	$g_r^j(r, a + \delta_2) < g_T$	$a + \delta_1$	$a + \delta_2 - 1$
\bar{A}_2, \bar{B}_2	$g_r^j(r, a + \delta_1) \geq g_T \cap a + \delta_1 < b$ $bg_r^j(r, a + \delta_1) \geq g_T \cap a + \delta_1 < b$	$g_r^j(r, a + \delta_2) < g_T \cap a + \delta_2 > a + \delta_1$ $\delta_1 g_r^j(r, a + \delta_2) < g_T \cap a + \delta_2 > a + \delta_1$	$a + \delta_1$	$a - \delta_2$
\bar{A}_2, \bar{B}_2	$a + \delta_1 = b$	$a + \delta_2 \leq a + \delta_1$	-1	-1

表 1 中 δ_1 为以 P_A 点为起点搜索的长度, $\delta_1 > 0$; δ_2 为以 P_B 点为起点搜索的长度, $\delta_2 > 0$;

根据第 r 行光条边界值 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 采用灰度重心法计算该行中心 $P_r^j(r, C_r)$; 当 $X_{\min} = -1 \cup X_{\max} = -1$ 时, 对该行灰度值大于 g_T 的点采用灰度重心法求取中心, 存在中心点则并记入 $P_r^j(r, C_r)$ 值, 否则令 $C_r = 0$; 同时, 对错误计数变量 β 进行 +1 操作, 当变量 β 大于阈值 β_T 时, 判定该帧的连续帧相似性条件不成立, 中心线近邻搜索失败, 转为图像光条分割定位方法提取

光条中心。 β_T 由 \mathbf{V}_p^{j-1} 中 $C_r^{j-1} \neq 0$ 的总数 N_β 来确定, $\beta_T = \eta * N_\beta, \eta \in (0, 1)$ 。 β_T 的值表示对连续帧间差异的容忍度, $\beta > \beta_T$ 时表示上一帧中心坐标对当前帧不具备参考意义, 反应实际测量中待测物形貌发生急剧变化或外界光线收到剧烈干扰, 破坏了当前帧之间的相似性, 需采用图像光条分割定位方法重新建立新的连续帧相似性关系。

2) 当 $\tilde{C}_r^{j-1} = 0$ 时: 表示第 $j - 1$ 帧的 r 行无中心点。 判断相邻行是否存在可用中心点信息, 即

$\tilde{C}_{r-1}^j \neq 0$ (或 $\tilde{C}_{r+1}^j \neq 0$)。当条件满足时,令 $\tilde{C}_r^{j-1} = \tilde{C}_{r-1}^j$ (或 $\tilde{C}_r^{j-1} = \tilde{C}_{r+1}^j$),并执行 $\tilde{C}_r^{j-1} \neq 0$ 情况下的同等操作。当条件不满足时,对 M_j 图第 r 行灰度值大于 g_r 的点采用灰度重心法求取中心,存在中心点则并记入 $P_r^j(r, C_r)$ 值,否则令 $C_r = 0$ 。

依照以上算法流程,逐行对 M_j 进行中心坐标搜索将中心坐标储存在 U_p^j 中,同时更新连续帧中心坐标信息 V_p^j ,用于下一帧的计算。

4 实验与分析

对算法进行实验验证,采用 Basler 500 万像素相机采集图像,图像尺寸 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$;线激光

波长为 637 nm ,功率为 50 mW ;计算机 CPU 为酷睿 i5,内存 8 G ;系统环境为 win10 系统,编程环境为 visual studio 2017, x64Debug 模式,图像库采用 opencv4.2.0;实验系统如图 8(a)所示,采用机器人搭载线结构光测量系统沿固定方向扫描工件,扫描速率为 20 mm/s ,相机帧率为 20 frame/s ;测量工件如图 8(b)所示,为待焊接的金属工件。

4.1 速度评估

实验过程采集 10 帧时间连续的激光条纹图,如图 9 所示。分别采用 Steger 算法、传统灰度重心法、自适应光条分割提取算法、时间连续帧信息复用算法进行中心线提取,比较 4 种算法处理 10 帧图片的平均耗时,结果如表 2 所示。

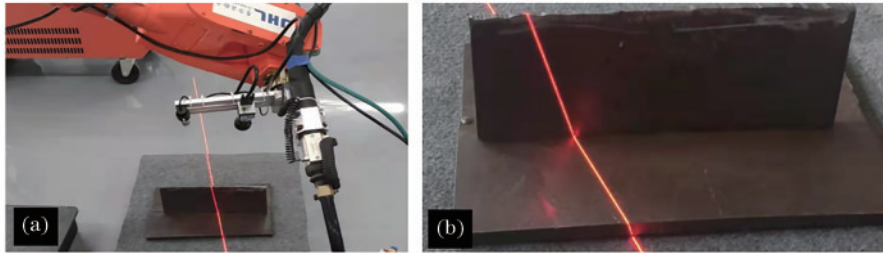


图 8 实验图。(a)测量系统;(b)扫描金属工件

Fig. 8 Experimental system image. (a) Measuring system; (b) scanning metal workpiece

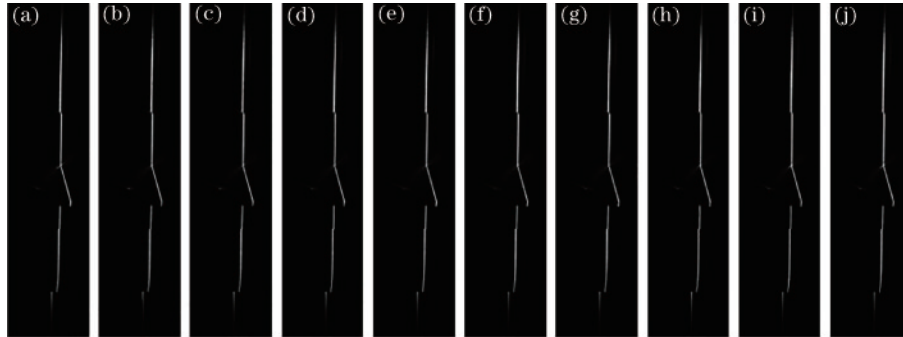


图 9 10 帧连续的光条图案局部。(a)第 1 帧;(b)第 2 帧;(c)第 3 帧;(d)第 4 帧;(e)第 5 帧;(f)第 6 帧;(g)第 7 帧;(h)第 8 帧;(i)第 9 帧;(j)第 10 帧

Fig. 9 Ten frames of continuous stripe pattern. (a) Frame 1; (b) frame 2; (c) frame 3; (d) frame 4; (e) frame 5; (f) frame 6; (g) frame 7; (h) frame 8; (i) frame 9; (j) frame 10

表 2 各方法平均耗时

Table 2 Running time of different methods

Number	Method	Average time /ms
1	Steger	127.39
2	Gray centroid method	28.75
3	Adaptive segmentation method	33.51
4	Proposed method	18.78

从实验结果可知,采用时间连续帧信息复用算法,比自适应光条分割重心速度提升近 1 倍,是传统 Steger 算法的约 11 倍。从数据上看,提出算法可支持 50 frame/s 的实时测量。当考虑到测量景深限制,将

相机采集原图压缩为 $500 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 时,提出算法平均耗时为 7.49 ms ,支持高达 133 frame/s 的实时处理。由实验结果可知,时间连续帧信息复用算法能够大幅度提升设备的实时性,提高测量效率。

4.2 精度评估

为评估算法中心线提取精度,本文对各算法提取中心线的标准差进行比较,测量过程标准差 σ 由贝塞尔公式^[22]求得

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}{N-1}}, \quad (4)$$

式中: u_i 为第 i 次测量所得中心点坐标; \bar{u} 为 N 次测量所

得中心点坐标的均值。

采用上述实验系统对标准平面工件同一位置重复拍摄 200 张光条图像,对光条每行求取中心点,并计算对应 200 组数据的中心点位置标准差,取其中 300 行数

据进行分析,获得图 10 所示各算法逐行标准差分布图。分别对 300 行均方根误差求均值得到各算法的平均均方根值如表 3 所示。

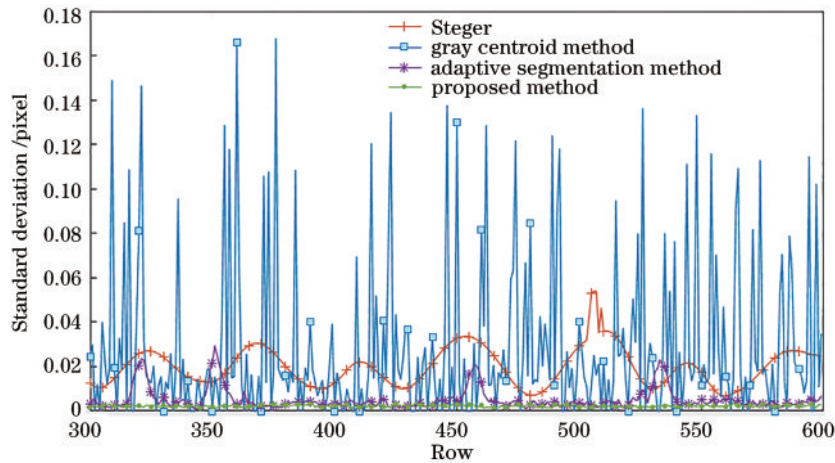


图 10 各方法的均方根误差分布图

Fig. 10 Root mean square error distribution of each method

表 3 误差分析

Table 3 Error analysis

Number	Method	Standard deviation mean $\bar{\sigma}$ / pixel
1	Steger	0.01981
2	Gray centroid method	0.02825
3	Adaptive segmentation method	0.00506
4	Proposed method	0.00235

从实验结果可知,Steger 算法中涉及到行和列方向的二阶偏导,因此行之间的误差过度较为平滑;灰度重心法中心坐标采用单行数据独立计算,导致行之间误差跃变明显,呈弱相关性;自适应分割算法通过二次

重心法求取亚像素中心坐标,将平均像素误差减小到 0.00506 pixel,由于光强阈值分割的差异导致部分行中心坐标的均方根误差较大;提出算法采用相邻时间帧的中心坐标作为参考,因此抑制了光强阈值分割带来的偏差,平均像素重复精度可达 0.00235 pixel。

最后,采用本文方法对焊接金属工件进行 3D 重构,相机曝光值设置为 8 ms,受限于相机采集帧率 80 frame/s,实际 3D 重构帧率为 80 frame/s,如图 11 所示。图 11(a)为原始工件图,激光照射到钢材表面时,由于存在局部类镜面区域,激光形成多次反射杂散光;图 11(b)为当前算法所重构 3D 点云图,由图可知,计算所得 3D 点云平坦、规则,并未受到杂散光的干扰。

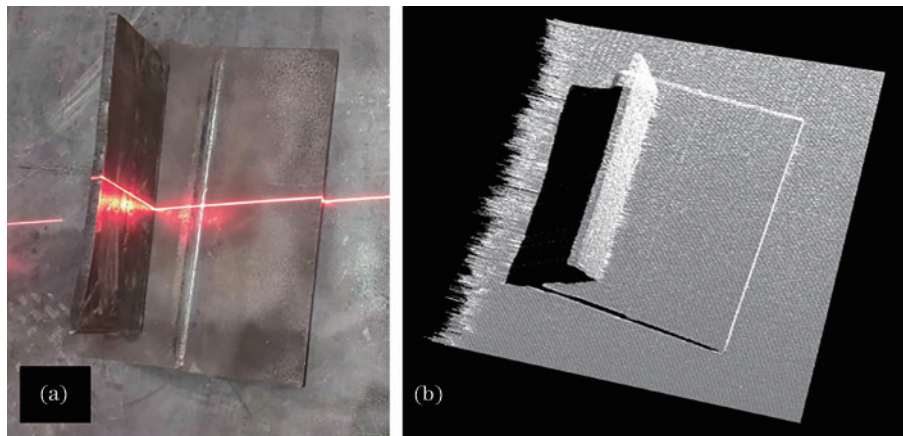


图 11 焊接工件 3D 重构。(a)金属工件;(b) 3D 点云

Fig. 11 3D reconstruction of welding workpiece. (a) Metal workpiece; (b) 3D point cloud

图 12 为大型工字钢增加多条肋板后的 3D 重构效果图,由于相机拍摄方向垂直于工字钢腰板方向,受限

于拍摄角度,从图 12(b)的点云数据中肋板侧面数据量较为稀疏,但工字钢腰板及 4 条肋板截面均实现了

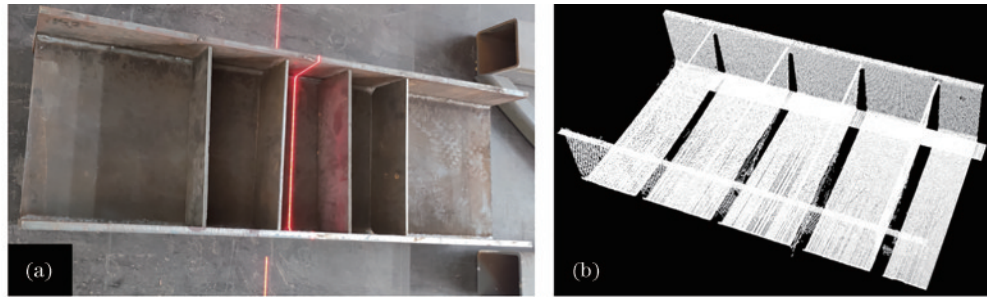


图 12 复杂工件 3D 重构。(a)金属工件;(b) 3D 点云

Fig. 12 3D reconstruction of complex workpiece. (a) Metal workpiece; (b) 3D point cloud

3D 重构。该工件肋板的高度约为 145 mm,腰板和肋板截面间存在较大高度跃变,从实验结果可知,提出算法能够对复杂工件实现稳定的 3D 重构。

5 结 论

提出一种时间连续帧信息复用中心线快速提取方法,利用线结构光扫描仪扫描物体表面过程中时间连续帧之间的相似性,提出复用前一帧中心坐标点信息,指导后一帧进行光条定位,该方法从扫描系统角度避免连续帧之间的重复计算,进一步提升速度。为保障时间连续帧的相似性,还提出自适应伽马变换算法,算法根据图像整体光强自适应调节变换因子,能够消除滤光片无法移除的杂散光干扰,增强光条识别度,提高算法整体抗干扰性。经实验验证,该方法速度上优于 Steger 算法和灰度重心法,对比改进的光条分割提取算法提升了近 1 倍;精度上也优于灰度重心法和光条分割提取算法。

参 考 文 献

- [1] 余凌波. 基于线结构光的单目 3D 视觉机器人制鞋喷胶技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 1-5.
Yu L B. Research on robot shoe gluing technology of monocular 3D vision based on line structure light[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 1-5.
- [2] 王鹏, 付鲁华, 孙长库. 激光测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Wang P, Fu L H, Sun C K. Laser measurement technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [3] 任福元, 许增朴, 于德敏, 等. 光三维测量中影响光条中心提取的因素及对策[J]. 微计算机信息, 2006, 22(32): 259-261, 279.
Ren F Y, Xu Z P, Yu D M, et al. Several factors that affect detecting laser strip center and methods accordingly in three-dimensional measurement using structured laser light[J]. Microcomputer Information, 2006, 22(32): 259-261, 279.
- [4] 詹坤烽, 陈文建, 李武森, 等. 线激光三维场景重建系统及误差分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204004.
Zhan K F, Chen W J, Li W S, et al. Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204004.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Zhou P, Xu K, Wang D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision[J]. IEEE Access, 2018, 6: 16423-16431.
- [8] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [9] 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): 100002.
Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.
- [10] 周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204004.
Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204004.
- [11] 吴庆华, 周阳, 李子奇, 等. 双频曲线拟合线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141502.
Wu Q H, Zhou Y, Li Z Q, et al. Extracting method for light strip center of linear structural light based on dual frequency curve fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141502.
- [12] 李叶萌, 詹军. 基于双高斯拟合的金属表面光条提取算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171204.
Li Y M, Zhan J. Extraction algorithm of laser stripe on metallic surface based on double-Gaussian fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171204.
- [13] 易宗超. 基于线激光的列车外轮廓三维测量和限界检测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 1-7.
Yi Z C. The 3D measurement and limit detection for the train body based on line laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 1-7.

- [14] 陈思豪, 王中任, 肖光润, 等. 大型工件单目结构光三维扫描方法[J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1358-1362.
Chen S H, Wang Z R, Xiao G R, et al. A three-dimensional scanning method for large workpiece by monocular structure light[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(11): 1358-1362.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王胜春, 韩强, 王昊, 等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212004.
Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212004.
- [18] 杨先凤, 李小兰, 贵红军. 改进的自适应伽马变换图像增强算法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 241-245.
Yang X F, Li X L, Gui H J. Image enhancement algorithm simulation based on improved adaptive gamma transformation[J]. Computer Simulation, 2020, 37(5): 241-245.
- [19] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Determining shape and reflectance of hybrid surfaces by photometric sampling [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(4): 418-431.
- [20] 徐长林, 任延同. 金属表面粗糙度与光学反射率[J]. 光机情报, 1990(10): 33-36.
Xu C L, Ren Y T. Metal surface roughness and optical reflectivity[J]. Optoelectronic Information, 1990(10): 33-36.
- [21] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1057-1062.
Xiong H Y, Zong Z J, Chen C H. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1057-1062.
- [22] 钱政, 王中宇, 刘桂礼. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
Qian Z, Wang Z Y, Liu G L. Measurement error analysis and data process[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2008.