

线结构光中心线提取算法研究与发展

赵文培^{1, 3}, 陆安江¹, 王梦莹^{1, 3}, 李宜峰^{2, 3}, 程进^{2, 3}

1. 贵州大学大数据与信息工程学院 贵州贵阳 550025

2. 西安工业大学光电工程学院 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: 在线结构光三维测量系统中, 准确提取光条中心线是实现三维测量的关键问题。首先, 从线结构光的工作原理及系统组成出发, 介绍了当前线结构光的发展历程。然后, 概述了现有的光条中心提取方法, 对其原理和关键技术进行了分析和对比。最后, 分析传统中心线提取算法的优缺点, 总结了深度学习的强适应性和高精度性能更适合工业检测中的应用。对线结构光光条纹中心线提取算法进行研究, 对现有的问题进行了深入分析, 并对未来的研究方向做出了展望。

关键词: 线结构光; 三维测量系统; 光条中心提取; 深度学习

Research and development of center line extraction algorithm for linear structured light

ZHAO Wenpei^{1, 3}, LU Anjiang¹, WANG Mengying^{1, 3}, LI Yifeng^{2, 3}, CHENG Jin^{2, 3}

1. School of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China

2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710016, Shaanxi, China

3. Wuxi V-Sensor Technology Co., Ltd., Wuxi 214192, Jiangsu, China

Abstract: The accurate extraction of the centerline of light stripes is a key issue in achieving three-dimensional measurement in line-structured light three-dimensional measurement systems. This paper starts from the working principle and system composition of line-structured light, introducing the development history of current line-structured light. Secondly, it outlines the existing methods for extracting the centerline of light stripes, and analyzes and compares their principles and key technologies. Finally, it analyzes the advantages and disadvantages of traditional centerline extraction algorithms, and concludes that deep learning is more suitable for industrial inspection applications due to its strong adaptability and high accuracy performance. This paper studies the centerline extraction algorithm of line-structured light stripes, conducts in-depth analysis of existing problems, and prospects for future research directions.

Keywords: line structured light; 3D measurement system; light stripe center extraction; deep learning

1 序言

随着工业制造和科学技术的快速发展, 现代工业对零件加工精度和复杂性的要求越来越高, 传统

的工作方式已经很难满足生产和测量复杂零件的需求。线结构测量技术与人工测量如图1所示。一方面, 人力资源成本不断上涨, 大规模使用人力成本

基金项目: 贵州省自然科学基金项目(黔科合基础-ZK[2023]一般055); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般465)。

过高，人力资源成本上升导致人力资源浪费严重。另一方面，质量检测和质量监测效率不高，影响产品生产精度和速度，是人工操作的主观性和局限性造成的。机器视觉^[1-4]技术的出现解决了这些问题，使电脑具有感知、了解外界的能力，并协助完成人工无法胜任的工作，利用相机和计算机来实现图像信息的实时处理。

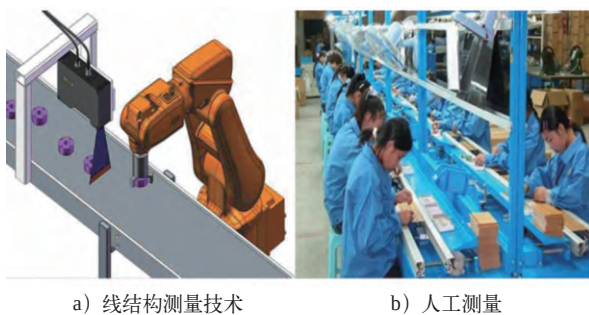


图1 线结构光测量技术与人工测量

在三维测量中，根据测量仪器与被测物体表面是否接触，将系统分为接触式和非接触式测量^[5-7]。传统的接触式测量工具在获取物体的三维坐标时，需要使用测量探头与物体表面进行接触。虽然这种方法具有较高的测量精度，但每次只能获取一个坐标点，导致测量效率较低。此外，长时间的接触也容易导致探头磨损，进而影响测量精度。而非接触式三维测量技术则具有快速、实时和易于实现的优势，被广泛应用于尺寸测量、三维形貌重构和表面缺陷检测等工业生产领域。线结构光三维测量^[8-13]是一种非接触、主动式测量系统，在进行三维测量时，需要向被测物体投射线结构光，然后利用相机或传感器来捕捉物体表面的结构光信息。相比被动式测量系统，主动式三维测量具有高测量精度、强鲁棒性和对环境影响较小的优势。

当前，线结构光测量技术已经得到商业应用，但在测量方面仍存在一定的局限性。其中，光条纹中心线的提取是一个具有挑战性的问题，特别是在被测物体处于复杂多变的环境下。本文通过对大量光条纹中心提取算法进行综合分析，提出了当前中心线提取面对的问题，并对未来的研究方向进行展望。

2 线结构光系统组成及发展

一种线结构光三维测量系统如图2所示。该系统由3个主要部分构成，包括激光器、3D相机和计算

机。线结构光三维测量^[14, 15]的基本原理是通过投射一系列平行而窄的光条在被测物表面，并通过光条纹的畸变程度来获取物体表面的形貌和高度信息。也就是通过3D相机捕捉到的光条纹图像，可以分析条纹的形状、畸变和位移，从而计算出每个像素点在物体表面上的深度信息，接着通过对物体进行间隔扫描，可以获取物体各个部分的深度信息，从而实现对整个物体的三维重构。由此可见，光条中心提取的准确度直接影响到整个测量系统的精度和可靠性。

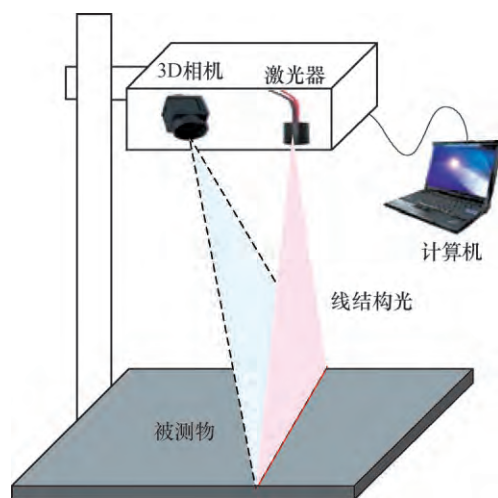


图2 线结构光三维测量系统

线结构光技术是一种较早应用于三维扫描领域的技术，经过多年发展，已经在市场上逐渐成熟，推出的产品越来越丰富^[16-21]。

3 线结构光中心线提取研究

目前，针对这一问题的研究主要有两大类：一是传统方法，二是基于深度学习^[22]。传统方法提取信号的速度快、原理简单、容易实现，但是其精度、稳定性差，易受噪声影响，自适应能力弱。而深度学习能够有效地学习图像的特征，能够任意近似非线性函数，并且可以在不需要人工设定的情况下，直接从训练样本中学习出模型的参数。该方法适用于野外复杂条件下实时获取的轮对光条纹图像数据，对复杂环境有较强的鲁棒性。下面将对各种算法进行详细的说明和对比。

3.1 传统的线结构光中心提取算法

传统的线结构光条纹中心提取算法都是采用自适应阈值法或者类间方差最大法获得原始图像的二值化图像，经过图像处理来提取中心线。

(1) 中心法 中心法^[23]是一种几何的光条纹中心提取方法，它在边缘法的基础上进行了改进。其基本原理是提取光条纹的内边缘线和外边缘线，并将其中心线作为光条纹的中心位置。中心法操作简单，处理速度较快，但需要准确的边缘检测，对图像质量要求较高，并且对噪声较为敏感。如果图像中存在噪声或干扰，则边缘线的提取精度会降低，影响中心法的效果。

(2) 极值法 极值法^[24]是一种用于提取光条纹中心点的方法，其基本原理是利用光条纹横截面的灰度分布函数执行梯度计算，并检测到梯度为零的像素点，这些点被视为光条纹横截面灰度的极大值点，即为选出的光条纹中心点。然而，极值法要求光条纹的灰度分布在接近理想情况下呈现高斯分布。然而，受环境噪声的影响，光条纹的灰度分布往往并不完全符合理想的高斯分布，这严重影响了提取结果的精准性。

为了提高极值法的提取精度，杨雪娇^[25]将极值法和遗传算法相结合，增强了极值法的抗噪声能力和提取精度。梅峻华等^[26]通过增强灰度对比度的手段，提升了极值法的提取速度和提取精度。程鑫等^[27]将极值法和Steger算法相结合，使得算法的抗干扰能力更强，提取速度更快。

(3) 灰度重心法 灰度重心法^[28]是一种适用于具有不均匀亮度分布的光条提取的算法。它通过分析光条横截面内选定区域的灰度值分布，计算每列横截面的灰度重心位置来确定光条的中心位置。该方法简单易实现，可以降低由于光条亮度不均匀而引起的误差，从而达到亚像素级的提取精度。但是对光照变化敏感，容易受到噪声干扰。

为了提高灰度重心法的抗干扰能力，李春明等^[29]利用边缘检测法提取出光条纹边缘，接着采用均方灰度梯度法确定光条纹的法线方向，在法线方向上使用灰度重心法提取光条纹中心。该算法抗干扰能力强，提取精度高。王文成等^[30]采用了平方加权的方式，增强灰度值较大的点对光条中心的影响，从而有效提高了测量的精度。王胜春等^[31]将深度学习与灰度重心法相结合，通过深度学习对光条纹图像进行分割，采用灰度重心法提取光条纹中心，有效提高了算法提取速度和提取精度，增强了算法的抗干扰能力。

(4) 曲线拟合法 曲线拟合法^[32]是一种用于实现亚像素级别光条中心提取的方法，其基本原理是根据曲线拟合得到精确的光条中心位置。该方法通过对光条纹的峰值点进行分析并进行数学拟合，得到了一条最佳曲线，从而精确地计算出光条中心的位置。

高斯函数表达式为

$$I_i = I_{\max} \exp \left[-\frac{(x_i - x_{\max})^2}{W} \right] \quad (1)$$

式中 I_i ——横截面上的灰度值；

$I_{\max}$ ——峰高位置；

x_i ——像素点坐标；

$x_{\max}$ ——峰高；

σ ——高斯曲线半峰宽度。

通过对曲线拟合后的函数进行对数转换，并用矩阵形式表示后，可以求出曲线的最大值点，即为中心坐标。该方法适用于不完整的线激光中心线，但其计算复杂度较高，稳定性较差。

为了提高曲线拟合法的稳定性，FASOGBON^[33]利用预处理获取感兴趣区域（ROI），设置合适的高斯模版对光条纹区域进行滤波，再结合曲线拟合法提取光条纹中心。该算法能够减弱光条横截面上光强分布的不规则性，进而提高了光条中心提取的精度。LIU等^[34]在使用曲线拟合法提取光条纹时，利用归一化相关系数和图像金字塔概念加速光条区域的定位和模板匹配过程。该算法提取速度快，有效解决了光条纹宽度变化大的问题。高世一等^[35]先是结合极值法和边缘几何中心法粗略求得中心点像素的位置，然后计算出光条纹宽度，根据光条纹宽度确定拟合范围，最后使用曲线拟合法提取中心。该方法提高了算法的提取精度和鲁棒性。

(5) 方向模板法 方向模板法是在灰度重心法的基础上发展而来的一种光条提取方法。相较于灰度重心法，方向模板法不仅能够有效消除噪声对光条提取精度的影响，同时对光条形状的要求也较低。方向模板法的原理是通过设置一个大小为 $M \times N$ 的方向模板，将其与图像进行相关运算，以确定光条的中心位置^[36]。

如图4所示，4块条纹方向模板分别对应着垂直、水平、左倾45°和右倾45°。该方法通过比较不同方向上的条纹模板与像素块的卷积响应，选

择最大响应值对应的中心点来确定光条纹的中心位置。方向模板法具有较好的鲁棒性，能够有效消除白噪声的影响，并具有修补断线的能力，但其计算量大，运行速度很慢。

$$K_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{00} & k_{01} & k_{02} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{40} & k_{41} & k_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{02} & k_{12} & k_{22} & k_{32} & k_{42} & 0 \\ 0 & k_{01} & k_{11} & k_{21} & k_{31} & k_{41} & 0 \\ 0 & k_{00} & k_{10} & k_{20} & k_{30} & k_{40} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_{00} & k_{01} & k_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{40} & k_{41} & k_{42} \end{bmatrix}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & k_{00} & k_{01} & k_{02} \\ 0 & 0 & 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 & 0 & 0 \\ k_{40} & k_{41} & k_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

图3 方向模板

为了提高方向模板法的时效性和精确度，雷海军等^[37]通过计算光条图像的灰度阈值和横截面像素点的灰度邻域属性，得到初始中心点，并利用可变方向模板法精确提取光条纹中心。该算法具有较快的提取速度和较强的稳定性，能够抗干扰并进行一定断线修复。吴庆阳等^[38]先对图像进行二值化处理，然后将可变方向模板法与灰度重心法相结合提取光条纹中心。这种方法提高了提取精确度和适应性。

(6) Steger 算法 Steger算法是一种基于Hessian矩阵进行特征提取的方法^[39]。该方法先是求得Hessian矩阵，获得图像中每个光条纹像素点的特征值和特征向量。利用这些特征值和特征向量，可以获取光条纹中心法线的方向。其次，在法线方向上使用泰勒展开，可以得到更加精确的亚像素坐标位置。

在光条图像中，Hessian矩阵 $H(x, y)$ 可表示为

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \otimes Z(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $G(x, y)$ ——二维高斯函数；

$Z(x, y)$ ——光条纹图像。

该方法具有稳定性好、精度高的优点，但是其计算复杂度较高，导致难以快速提取光条纹的中心位置，这使该算法在工业在线检测等实时应用中难以满足要求。

以满足要求。

为了提高Steger算法的提取速度，蔡怀宇等^[40]先是采用ROI分割出图像待处理区域面积，接着使用PCA方法替代Hessian矩阵来获取光条的法线方向。相较于传统的Steger算法，该方法大大降低了计算时间，速度提高了近3倍。杨尉^[41]通过选择可靠的初始跟踪点，利用Hessian矩阵计算光条中心坐标，然后按一定步长延伸获取下一个初始跟踪点，重复此过程，得到所有光条中心点，有效减少了光条中心提取的冗余计算。刘剑等^[42]采用自适应阈值法分割图像，使用极值法确定中心点，在初始点上的法线方向进行提取。这种方法能够提高中心线提取的精确性。

3.2 基于深度学习的光条中心提取算法

在深度学习领域，光条中心提取模型正处于起步阶段。深度学习的强大学习能力和自适应性为光条中心提取模型的发展提供了新的可能性。在图像分割领域，深度学习已经取得了显著的成果，为光条中心提取提供了可行的预分割模型的前景^[43]。通过在大规模数据集上进行训练，深度学习模型能够学习到光条中心线的复杂关系和特征表达，这使得深度学习模型能够更准确地提取出中心线，即使在复杂背景和噪声环境下也能表现出色^[44]。

深度学习的原理和流程^[45]如图4所示。

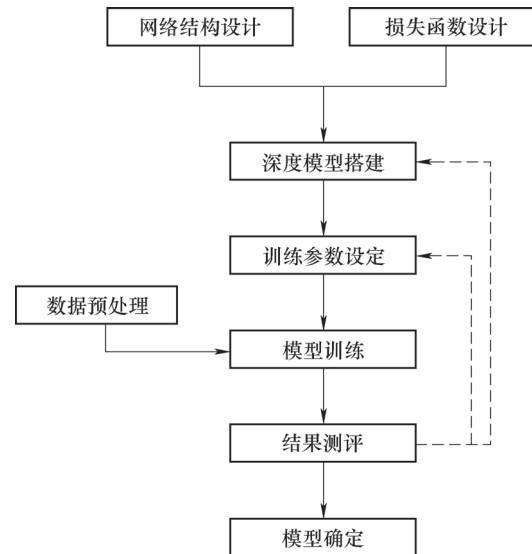


图4 深度学习的原理和流程

深度学习的基本思想是利用已有的数据，对神经网络进行训练，使其达到学习目的，并将所学到

的神经网络用于新的数据处理。深度学习提取中心线时，需要针对任务的具体要求，对网络结构、损耗函数等进行合理的设计，并采用合适的网络结构来构造整个网络。在建立好之后，就可以设定训练参数，再将其导入网络，进行测试，最后得到最优的模型^[46]。

张勇停等^[47]提出了基于改进UNet网络的线结构光光条中心提取方法，将RCNN单元引入到UNet网络模型中，并代替了原来的普通CNN单元，接着利用端与端深度学习提取中心线。该方法稳定性高，减轻了噪声对图像的影响。郭雁蓉等^[48]提出一种多尺度卷积并行的方式，利用端到端深度学习方法提取线结构光中心线。该方法提高了提取速度，并增强了适应性。HOU等^[49]采用RC-YOLOv5s算法提取光条的有效面积，然后采用改进的高斯曲线拟合算法对光条的亚像素中心线进行初始提取，并基于初始提取点计算法线方向。该方法改进了基于法向量的灰度重心法，利用该方法计算光条的亚像素中心。这种方法加快了光条纹中心的提取速度，并避免了背景噪声的影响。

4 算法总结与评估

在实际场景中，光条纹中心提取受到多种环境因素的干扰，这些因素会导致提取的结果不够精确，从而影响到三维测量的准确性。单一模型往往难以解决这些问题，因为环境因素的变化和复杂性使得模型的适应性受到挑战。因此，需要采用多种算法的协同作用，以综合克服不同的问题，从而提高光条纹中心提取的精度和效率。本文对各算法的性能进行分析，并作比较。试验处理配置：PC端配备了由Intel (R) Core (TM) i5-8300H CPU @ 2.30GHz处理器和NVIDIA GeForce GTX 1050Ti显卡组成的硬件配置，系统是Win10，使用的仿真软件是MATLAB2019。试验原图与试验效果图分别如图5、图6所示。

根据图5、图6所示，以上各种中心线提取算法在优势和劣势的对比见表1，各算法性能对比见表2。

当下的中心线提取算法以传统算法为主，这些传统算法存在一些问题，主要包括以下两个方面。

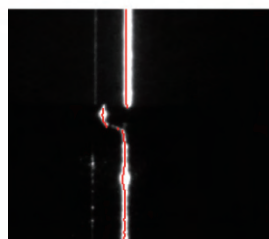
1) 满足适应性但不能满足实时性。适应性要求



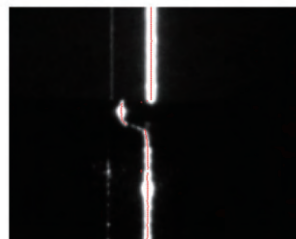
图5 试验原图



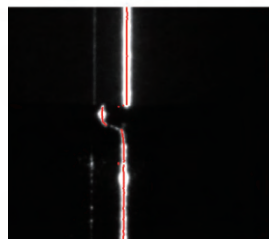
a) 中心法



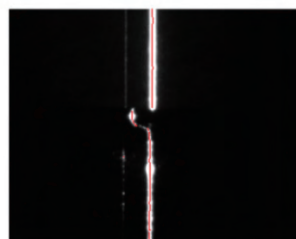
b) 极值法



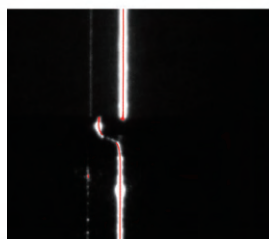
c) 灰度重心法



d) 曲线拟合法



e) 方向模板法



f) Steger算法

图6 试验效果图

算法能够灵活地适应各种复杂形状和具有噪声的数据，这通常需要一系列的计算和分析步骤，包括形状处理、几何分割和特征提取等。这些计算步骤可能需要更多的时间和计算资源，因此会牺牲实时性能。

2) 满足实时性但不能满足适应性。实时性要求算法能够在给定的时间范围内快速处理数据，以满足实时应用的需求。这种要求迫使我们寻找更快速的算法，通常需要进行优化和简化，从而降低计算

表1 中心线提取算法对比

算法名称	算法优势	算法劣势
中心法	算法结构简单，速度快	无法提取亚像素精度，抗噪能力差
极值法	操作简单，提取效果好、速度快	容易受噪声影响；精度不高
灰度重心法	减小了光条灰度不均引起的误差；计算复杂度低，运算速度快	易受噪声影响
曲线拟合法	适用于不完整的激光线	计算复杂度较高，稳定性差
方向模板法	能够克服白噪声干扰，具有修补断线的能力	计算复杂度高，耗时长；方向容易发生偏移
Steger算法	精度高，稳健性好	运算量巨大，效率低，无法达到实时效果，高斯核选取不当会导致图像失真
深度学习	适应性强，准确性高	训练成本较高，计算复杂度较高

表2 中心提取算法性能对比

算法名称	计算复杂度	提取速率	提取精度	适应性
中心法	低	快	较低	较差
极值法	低	快	较低	较差
灰度重心法	低	快	较低	较差
曲线拟合法	较高	慢	较高	较好
方向模板法	较高	慢	较高	适中
Steger算法	较高	慢	较高	较差
深度学习	高	快	较高	较高

的复杂度和成本。然而，这样的优化经常会限制算法的适应性，使其在处理复杂形状和噪声较多的数据时表现不佳。

为了解决这些问题，近年来基于深度学习的中心线提取算法逐渐兴起。通过利用深度神经网络的强大学习能力，这些算法能够更好地适应复杂形

状和噪声数据，并且在处理效果上有较大的提升。

此外，深度学习算法通常可以使用并行计算，加速计算过程，从而提升实时性。未来的光条纹中心线提取算法需要采用更加高效、准确的数学模型和算法，从而更好地处理数据噪声和异常，提高测量精度和鲁棒性。因此，线结构光中心线提取技术会朝深度学习领域发展，深度学习模型能够通过训练学习环境中的复杂特征和模式，从而提高光条纹中心线提取的准确度和速度。

5 结束语

本文从线结构光的工作原理出发，阐明了中心线提取在线结构光测量系统中的重要性。分别对传统算法和深度学习法进行阐述，总结了传统算法和深度学习的优缺点以及性能对比。通过综合对比分析发现，不同类型的传统算法在光线中心线提取方面，存在着对适用场景、噪声条件等不同的要求，这意味着针对不同的实际环境，很难找到一个传统算法能够完全满足需求。因此，未来光条纹中心线提取的研究方向将普遍聚焦于高效和具有泛化能力的深度学习领域。

参考文献：

[1] 汤勃，孔建益，伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报，2017，22（12）：1640-1663.

[2] 李玥华，周京博，刘利剑. 线结构光测量技术研究进展[J]. 河北科技大学学报，2018，39（2）：115-124.

[3] 韩晓辉. 青岛地铁11号线首车下线，激光焊接技术助推城轨车辆升级换代[J]. 金属加工（热加工），2017（4）：8-9.

[4] 王烁. 相机内参数精密校准技术的研究[D]. 天津：中国民航大学，2017.

[5] WEI W S. Precise measurement for line structure light vision sensor with large range[J]. Scientific Reports，2023，13（1）：7234-7234.

[6] 卞正岗. 机器视觉技术的发展[J]. 中国仪器仪表，2015（6）：40-42.

[7] 王泽浩，张中炜. 自适应方向模板线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光杂志，2017（38）：12-16.

[8] L CH W, F X, D F j, et al. A novel method to calibrate the rotation axis of a line-structured light

- 3-dimensional measurement system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164.
- [9] 吴燕城. 基于线结构光三维测量关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [10] 何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27 (1): 19-23.
- [11] 苏小勤, 熊显名. 快速线结构光中心提取算法[J]. 计算机应用, 2016, 36 (1): 238-242.
- [12] VALKENBURG R J, MCIVOR A M. Accurate 3D measurement using a structured light system[J]. Image and Vision Computing, 1998, 16 (2): 99-110.
- [13] 张旭, 周涛. 平顶线结构光的中心检测算法及光刀平面标定[J]. 光子学报, 2017, 46 (5): 0512001.
- [14] 宋少哲. 基于结构光的三维测量技术研究[J]. 河南科技, 2019 (22): 14-16.
- [15] P Y SH, L Y K. A calibration method for line-structured light system by using sinusoidal fringes and homography matrix[J]. Optik, 2022, 261. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169192.
- [16] 韩霜. 从显微镜到传感器, 基恩士先进产品服务高精度市场[J]. 世界电子元器件, 2011 (12): 72-74, 78.
- [17] 王军. 基于计算机视觉的三维测量仪研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [18] 陈建党. 基于3D激光轮廓传感器的制鞋喷胶关键技术研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2021.
- [19] 庞仕安. 基于ZYNQ的线结构光条纹中心提取技术研究及实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [20] 吴燕城. 基于线结构光三维测量关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [21] 边硕. 基于线结构光的手持式三维扫描系统[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2022.
- [22] 冀振燕, 宋晓军, 付文杰, 等. 激光光条中心线提取研究综述[J]. 测控技术, 2021, 40 (6): 1-8.
- [23] BIAO W, MA Y H, ZHANG Y X, et al. An affine transform center line extraction and discontinuity deviation correction method for non-orthogonal grid laser[J]. Physica Scripta, 2023, 98 (11): 115535.
- [24] 杨镇豪, 杨柳, 李辉, 等. 复杂环境下结构光中心线提取算法[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28 (9): 7-10.
- [25] 杨雪娇. 点云的边界提取及角点检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [26] 梅峻华, 赖磊捷. 结构光测量系统光条中心提取算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41 (21): 8-13.
- [27] 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.
- [28] 张雁鹏, 孟楠, 肖夏, 等. 融合可见光通信与双目立体视觉的地铁列车自主定位[J]. 光学学报, 2023, 43 (10): 17-28.
- [29] 李春明, 王萌萌, 刘海洋, 等. 精确的线结构光中心提取算法研究[J]. 机械与电子, 2017, 35 (6): 29-31.
- [30] 王文成, 徐建强, 司书春. 一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J]. 光电子·激光, 2005 (10): 104-107.
- [31] 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): 175-184.
- [32] 尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31 (1): 179-181.
- [33] FASOGBON O P. Depth from small motion using rank-1 initialization[J]. CoRR, 2019, abs/1907.04058.
- [34] LIU L, LI C, LEI Y, et al. Feature extraction for hyperspectral remote sensing image using weighted PCA-ICA[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10 (14): 78-84.
- [35] 高世一, 杨凯珍, 刘师田, 等. 基于数据拟合的激光焊接焊缝图像表面缺陷检测[J]. 现代电子技术, 2011, 34 (14): 188-190, 198. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2011.14.002.
- [36] 王泽浩, 张中炜. 自适应方向模板线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光杂志, 2017, 38 (1): 60-64.
- [37] 雷海军, 李德华, 王建永, 等. 一种结构光条纹中心快速检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003 (1): 74-76.
- [38] 吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. 四川大学学报(工程科学版) (下转第24页)

- (2) : 93-96.
- [4] 刚铁, 张九海, 吴常正, 等. 电站锅炉集箱机器人焊接工作站[J]. 焊接学报, 1998 (2) : 83-87.
- [5] 富历新, 樊滨温, 董春. 锅炉集箱管座焊接机器人控制系统设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999 (1) : 93-96.
- [6] 万军, 李宜男, 杨松, 等. 机器人在集箱管接头焊接制造中的应用[J]. 焊接, 2001 (11) : 30-32.
- [7] 杨松, 李宜男, 李世魁. 焊接机器人在集箱管接头焊接制造中的应用[J]. 机械工人(热加工), 2003 (5) : 40-41.
- [8] 盛仲曦, 陈弈, 杨霄, 等. 锅炉集箱短管接头机器人焊接系统[J]. 电焊机, 2017, 47 (7) : 43-46.
- [9] 胡泊. 电站锅炉集箱管座自动化焊接系统设计[J]. 东方电气评论, 2017, 31 (3) : 16-20.
- [10] 陈远强, 罗文国, 付俊, 等. 锅炉集箱管座机器人焊接试验工作站的设计与实现[J]. 电焊机, 2023, 53 (1) : 100-105.
- [11] 罗永飞, 李占雷. 电站锅炉智能化焊接现状和发展趋势[J]. 电焊机, 2016, 46 (3) : 7-10.
- [12] 钱月清, 任一平. 525t/h CFB锅炉旋风分离器制造工艺简介[J]. 锅炉制造, 2005, 36 (4) : 54-57.
- [13] 乐猛. 基于激光视觉传感膜式壁焊缝自动跟踪系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [14] 郭志恒. 机器人智能化自动螺柱焊接技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [15] 王冬平, 银润邦, 蒲贵明. 锅炉膜式壁管屏销钉自动焊工艺及系统开发[J]. 机械制造文摘——焊接分册, 2018 (3) : 31-36.
- [16] 陈弈, 付俊, 罗文国, 等. 蛇形管屏附件焊接机器人系统的设计与实现[J]. 电焊机, 2022, 52 (7) : 62-68.
- [17] 刁旺战, 徐祥久, 王萍, 等. 燃煤电站锅炉吊挂管自动化焊接生产线[J]. 电焊机, 2021, 51 (10) : 50-55.
- [18] 李飞. 锅炉吊杆组件弧焊机器人自动焊接工艺开发与应用[J]. 工业锅炉, 2022 (3) : 13-19.

MW 20240318

(上接第16页)

- 版), 2007 (4) : 151-155.
- [39] 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.
- [40] 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) : 278-283.
- [41] 杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [42] 刘剑, 刘丽华. 基于海森矩阵与区域增长的激光条纹中心提取[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (2) : 113-118.
- [43] HAYDER Y, ZAHRAA A. Fault detection from PV images using hybrid deep learning model[J]. Solar Energy, 2024, 267.
- [44] ADAM M H, SARA B, PEARSE A K, et al. Applications of interpretability in deep learning models for ophthalmology[J]. Current Opinion in Ophthalmology, 2021, 18 (4) : 144-146.
- [45] 崔奥宇, 许幸芬, 田苗, 等. 基于全卷积神经网络的冠状动脉中心线提取方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40 (4) : 429-435.
- [46] 王炬. 基于通量模型和深度网络的大脑神经元中心线提取研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [47] 张勇停, 李锋. 基于改进UNet网络的线结构光光条中心提取[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (9) : 2092-2097.
- [48] 郭雁蓉, 杨剑, 宋文爱, 等. 复杂环境中的线结构光中心提取方法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40 (4) : 1133-1138, 1144.
- [49] HOU W Q, JING H CH, GUO A, et al. Accurate laser centerline extraction algorithm used for 3D reconstruction of brake caliper surface[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 167.

MW 20240402