

基于结构光的激光自动焊接跟踪研究

李淑军 田昌勇 周传扬

Research on automatic laser welding tracking based on structured light

LI Shujun, TIAN Changyong, ZHOU Chuanyang

引用本文:

李淑军, 田昌勇, 周传扬. 基于结构光的激光自动焊接跟踪研究[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1280–1285. DOI: 10.5768/JAO202344.0610016

LI Shujun, TIAN Changyong, ZHOU Chuanyang. Research on automatic laser welding tracking based on structured light[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1280–1285. DOI: 10.5768/JAO202344.0610016

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变焦结构光成像系统的光学设计

Optical design of zoom structured light imaging system

应用光学. 2018, 39(1): 22–27 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101004>

三维人脸测量与分割系统研究

Research on three-dimensional face measurement and segmentation system

应用光学. 2021, 42(4): 664–670 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402005>

多频光栅物体高精度廓形三维测量及重建研究

Research on 3D measurement and reconstruction of high-precision profile of multi-frequency grating object

应用光学. 2020, 41(3): 580–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303006>

基于结构光的植保无人机障碍物在线检测系统

Obstacle detection system of plant protection UAVs based on structural light

应用光学. 2018, 39(3): 343–348 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301008>

基于单目结构光的大物体三维测量关键方法的研究

Research on critical method of large objects three-dimensional measurement based on monocular structured light

应用光学. 2018, 39(2): 212–219 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0203001>

一种基于结构光条纹投影的微小物体测量系统

Micro-objects measurement system based on structured light fringe projection

应用光学. 2019, 40(6): 1120–1125 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1280-06

基于结构光的激光自动焊接跟踪研究

李淑军, 田昌勇, 周传扬

(中国科学院理化技术研究所 激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

摘要: 设计实现了一种激光加工过程中, 用于激光自动焊接焊道偏移跟踪识别的系统。该系统由结构光传感器、水平偏移识别算法和实时数据平滑算法组成, 在不同工况条件下实时自动提取多种形状的焊道特征点数据, 通过对特征点数据进行计算处理, 获得焊道实时偏移数据, 经过实时平滑算法进行滤波处理后输出给激光自动焊接装置, 最终实现对水平跟踪的自动控制。在现场实际焊接测试中, 该系统能够实时采集焊道偏移数据, 并准确指导焊接激光输出头对焊道进行水平跟踪, 为实现激光自动化焊接奠定了基础。

关键词: 结构光; 激光焊接; 特征识别; 偏移跟踪

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610016

Research on automatic laser welding tracking based on structured light

LI Shujun, TIAN Changyong, ZHOU Chuanyang

(Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This article presents the design and implementation of a system for laser automatic welding bead offset tracking and identification during laser processing. The system consists of a structured light sensor, a horizontal offset recognition algorithm and a real-time data smoothing algorithm. It can automatically extracts weld bead feature point data of various shapes in real time under different working conditions. By calculating and processing the feature point data, the weld bead is obtained. The real-time offset data is filtered by a real-time smoothing algorithm and then output to the laser automatic welding device, ultimately achieving automatic control of horizontal tracking. In actual on-site welding tests, the system can collect weld bead offset data in real time and accurately guide the welding laser output head to horizontally track the weld bead, laying the foundation for the realization of automated laser welding.

Key words: structured light; laser welding; feature recognition; offset tracking

引言

焊接是制造业中一项至关重要的工艺, 随着制造业的不断发展和创新, 焊接技术也在不断演进。在众多焊接方式中, 激光焊接具有能量密度高、焊接速度快等优点, 是一种高度精确的焊接方法, 已在众多工业应用中广泛使用。但激光焊接因激光聚焦后光斑直径小、焊缝较窄, 在焊接过程中定位易发生偏差, 造成焊接缺陷。因此, 在激光焊接过程中实现焊缝点的实时跟踪控制是保证焊

接质量的关键所在, 它可以帮助焊接工程师和操作人员监测和控制焊接过程, 确保焊接接头的质量和一致性。最早的焊接监测方法包括目视检查、探针式检测, 这些方法依赖于操作人员的经验和技能, 存在主观性和可操作性的限制, 同时弧光也会对人体造成生理伤害^[1-2]。随着传感器技术的发展, 焊接过程中的关键参数, 如温度、电流、电压、焊丝进给速度等, 可以通过传感器实时监测。这种方法提供了更准确的数据, 有助于实时调整

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-10-11

作者简介: 李淑军 (1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光测量和激光加工研究。E-mail: lishujun@mail.ipc.ac.cn

通信作者: 田昌勇 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光测量和激光加工研究。E-mail: tcy@mail.ipc.ac.cn

焊接参数以提高质量。电弧传感系统在 80 年代初开始出现并迅速发展, 由于它的多种优势, 很快超过了在它之前的电磁式、超声式等传感器。光学传感器分为点、线、面三种形式, 它以可见光、激光、红外线等作为光源, 以光电元件为接收单元, 利用光电元件提取反射回来的结构光, 从而得到焊缝的信息^[3-4]。

总体来说, 焊接跟踪技术分为接触式和非接触式测量两大类, 其中接触式测量, 尤其探针接触式, 由于其不怕电弧光、电磁、烟尘等干扰, 最早得到了应用。但是接触式测量由于操作复杂、易产生形变误差、耐久性差等原因, 无法满足一些测量场景的需求, 同时随着新材料的产生和加工精度的不断提高, 接触式测头很难对一些尺寸很小或脆性材料的工件进行测量。因此, 基于光学三角测量原理的非接触测量方法, 随着半导体激光器和光电探测器的长足发展, 越来越被人们所重视。其测量系统结构简单、体积小、重量轻、分辨率高, 受环境电磁场影响小, 工作距离大且测量准确度高, 并可在线进行测量, 弥补了接触式测量的许多不足之处, 故接触测量逐渐被非接触式测量方法替代。

结构光扫描技术使用激光束在焊接过程中扫描工件表面, 利用相机接收反射回来的光, 通过计算处理得到焊接路径的三维模型坐标。这种方法提供了对焊缝形状的高度精确的控制, 适用于复杂几何形状的焊接任务。2016 年, 卢荣华^[5]提出了基于图像处理的焊道初始点识别算法、图像视觉控制法, 实现了定位焊道的初始点。此种方法只是达到了定位初始点的目的, 不能有效指导焊接过程。2018 年, 张瑞雪^[6]实现了一种多线激光传感器 V 型焊道轨迹识别系统。该系统只能够有效提取 V 型浅层焊道的顶部及中心特征点, 无法对后续的焊接过程进行实时指导。2019 年, 张杰飞^[7]针对宽度和深度都在 1 cm 以内的单面焊接窄 V 型坡口焊道, 设计了一套基于 OpenCV 软件的焊道识别系统。该系统只适用于 V 型坡口的中间特征点识别, 对其他形貌坡口识别适应能力同样较差。综上所述, 目前关于焊道特征点识别的研究主要集中于标准坡口的中间特征点识别, 无法实现更进一步的焊接过程偏移跟踪。

本文将结构光传感器与焊道跟踪识别处理算法相集成, 先利用激光三角测量法获得焊道三维坐标值, 之后通过识别与处理算法获得焊道偏移

的实时数据, 从而实现对焊道偏移的实时自动跟踪。

1 测量原理

激光具有单向性好、亮度高、能量集中且稳定的特性, 被广泛应用于精密测量领域^[8]。基于激光的非接触测量方法有干涉法、脉冲法、相位法和三角法。结构光测量是一种机器视觉技术, 通过将激光光源与相机配对来捕获三维测量数据, 由于入射光和捕获装置构成一个三角形, 对位移的计算运用了几何三角定理, 故该测量法被称为激光三角测量法^[9]。相较而言, 三角法具有测量速度快、精度高、稳定性好、成本低的特点, 目前可以实现中、短距离的测量, 应用场景更为广泛。随着汽车工业、精密仪器制造、航空航天领域等相关技术的迅猛发展, 要求对于物体表面的检测实现高速度、高精度、高质量和低磨损的“三高一低”检测原则, 越来越多基于激光三角测量的方案在这一领域发挥重要作用^[10-11]。

激光结构光测量技术, 又称三维激光扫描(3D laser scanning)或激光三角测量(laser triangulation), 是一种用于测量物体表面形状和结构的高精度非接触式测量技术。其基本原理涉及激光发射、光斑投影、影像捕获以及三角测量原理^[12-13]。

1) 激光发射: 激光结构光测量技术的核心是激光器, 它会发射一束单色、相干性极高的激光光束。这种激光光束具有良好的定向性和空间一致性, 使其成为测量高精度表面的理想光源。

2) 光斑投影: 激光光束通过一个光学系统, 例如透镜或光纤, 被聚焦成一个小而明亮的光斑。这个光斑会被投射到待测物体的表面上, 其形状可以是圆形、线性或其他几何形状, 具体选择取决于应用需求。

3) 影像捕获: 在激光光斑照射到物体表面后, 一台相机或其他影像捕获设备会拍摄物体表面的图像。相机与激光光源之间的相对位置保持固定不变, 并且与激光光源之间有一个已知的角度关系。

4) 三角测量与计算: 在图像中, 激光光斑会出现在物体表面上的某个位置, 通常在图像中呈现为一个点。利用三角测量原理, 可以通过测量光斑在图像中的位置以及相机和激光光源之间的几何关系来计算出光斑在物体表面上的实际距离。如图 1 所示为激光三角法测量焊缝的原理图。

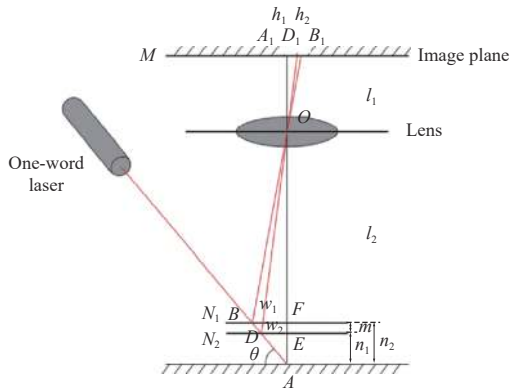


图1 激光三角测量原理图

Fig. 1 Principle of laser triangulation

图1中 l_1 和 l_2 分别为镜头中心到底面的距离和像平面到镜头中心的距离。 N_1 和 N_2 分别为工件母材和待焊的上表面, n_1 和 n_2 分别为 N_2 到底面的距离和 N_1 到底面的距离。 N_1 和 N_2 两平面距离即焊缝高度记为 m ,则 $m=n_2-n_1$ 。点 B 在像平面上对应点 B_1 ,点 D 在像平面上对应点 D_1 , w_1 与 w_2 分别为点 D 与点 B 到镜头中心的水平距离。令 h_1 为 A_1 与 D_1 之间距离, h_2 为 B_1 与 D_1 之间距离,则有:

$$\begin{cases} \frac{h_1}{l_1} = \frac{w_1}{l_2 - n_1} \\ w_1 = n_1 \cot \theta \end{cases} \quad (1)$$

进而可得:

$$n_1 = \frac{h_1 l_2}{l_1 \cot \theta + h_1} \quad (2)$$

同样方法可得:

$$n_2 = \frac{(h_1 + h_2) l_2}{l_1 \cot \theta + h_1 + h_2} \quad (3)$$

所以,最终可得:

$$m = \frac{l_1 l_2 h_2 \cot \theta}{(l_1 \cot \theta + h_1 + h_2)(l_1 \cot \theta + h_1)} \quad (4)$$

总之,激光结构光测量技术通过激光器发射激光光束,将光斑投影到待测物体表面,然后使用相机捕获图像并利用三角测量原理计算出光斑在物体表面上的三维坐标,从而实现对物体表面形状和结构的高精度测量^[14]。

2 系统设计与实现

2.1 特征识别与计算

图像特征提取是计算机视觉和图像处理领域中的重要任务,它涉及从图像数据中识别、捕获和提取有意义的特征,以便用于进一步的分析、识别、分类、检测或其他任务。特征点指的是图像灰

度值发生剧烈变化的点或者在图像边缘上曲率较大的点(即两个边缘的交点)。图像特征点在基于特征点的图像匹配算法中有着十分重要的作用。图像特征点能够反映图像本质特征,通过对特征点进行识别与定位,可以简化后续的处理过程。

在对激光焊接过程中的焊道进行自动跟踪时,水平偏移跟踪算法是基于焊道特征点识别的。在对石油管道进行激光焊接加工时,激光焊接小车攀附在固定于管道外壁的焊接轨道上,通过周向运动实现对管道连接坡口的焊接^[15-16]。为实现激光焊接过程中焊接激光输出头的准确调整,需要完成焊道特征点的实时识别。在一帧图像中,图像数据点集能够反映出该处焊道截面的深度信息和形貌特征,利用这些数据可以有效识别出焊道特征点。

经结构光扫描传感器回传的待识别深层焊道表面大致形貌如图2所示,其中特征点主要包括顶部左右特征点、底部左右特征点和底部最低点,具体分布如图3所示,其中1为顶部左侧特征点,2为顶部右侧特征点,3为底部左侧特征点,4为底部右侧特征点,5为底部最低点。

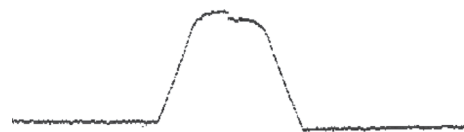


图2 焊道形貌图

Fig. 2 View of welding line appearance

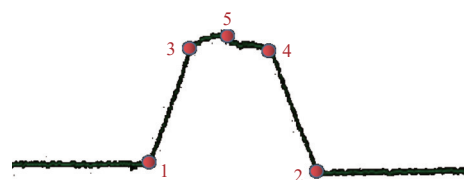


图3 焊道形貌特征点分布图

Fig. 3 Distribution diagram of feature points of weld morphology

焊道顶部特征点位于焊道顶部边缘,其深度数值与相邻的数据点相比存在一个较大的突变,利用识别深度坐标的突变可以有效识别出顶部边缘特征点,通过深度差值算法能够实现对焊道顶部边缘特征点的识别和坐标定位。

单一的深度差值判断算法的思想为遍历检测当前数据点与其下一相邻数据点之间的深度差值,当该差值满足阈值时即判断该点为特征点。这种判断方法最大的弊端是无法避免单一离群点对特征点的识别干扰,例如当焊道顶部边缘区域

在成像过程中受到干扰出现某一深度异常的数据点时, 单一深度差值判断算法有可能将该点判断为特征点。

为避免上述这一干扰, 识别算法设计为三重差值判断, 即: 系统从第 1 个数据点开始向后遍历, 循环判断当前点和其后第 20 个点和第 40 个点深度方向坐标的差值, 当差值均大于深度阈值时, 表示该点位于焊道顶部边缘临界处, 即可判断该点为顶部边缘特征点, 并记录该点坐标。

通过对已识别出的焊道表面左右特征点的水平坐标取平均, 得出焊道表面中点水平坐标, 基于该中点进行水平偏移判断。焊道表面中点示意图如图 4 所示, 图中 A、B 点为焊道表面左右特征点, C 点为表面中点。

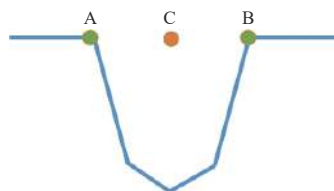


图 4 焊道表面中点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of middle point on weld surface

在实际应用中, 对焊道表面特征点进行识别, 通过固定在焊接激光输出头前端的结构光传感器实现。当焊接小车在行走过程中发生水平偏移时, 会带动传感器发生相同偏移, 此时焊道表面特征点水平坐标值发生变化。为实现对焊道的水平偏移跟踪, 首先会确定一个起始零点, 以该点为基准计算当前中点相对于该零点水平方向的偏移量, 从而实现对焊道水平偏移跟踪。实物装置如图 5。

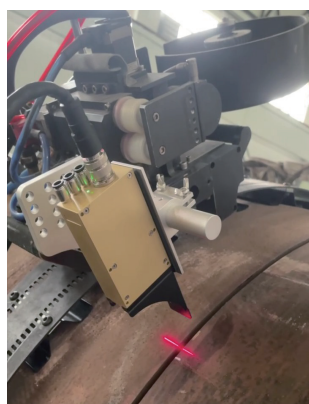


图 5 实物装置图

Fig. 5 Physical device diagram

算法具体实现流程如下: 在焊接激光输出头运动的起点位置, 算法以该位置作为水平跟踪的起始零点, 提取该位置的表面中点坐标并保存。在

移动过程中, 算法实时提取过程中所有位置的中点坐标, 并与上述零点坐标作比较, 得出实时水平偏移量。

2.2 数据处理

利用上述特征点识别与偏移计算算法对实际焊道进行扫描, 采集得到若干帧偏移数据如表 1 所示。可以看到数据精度较高、变化基本呈平滑上升趋势, 其中少数几帧数据波动性较大。经过分析, 认为在焊接过程中焊接抖动和焊接小车行走过程中的震动影响水平偏移数据的精度与稳定性。

表 1 焊道偏移量数据采集表

Table 1 Data collection table for weld bead offset

序号	偏移量/mm	序号	偏移量/mm
1	0.01	10	0.06
2	0.01	11	0.10
3	0.02	12	0.08
4	0.06	13	0.09
5	0.03	14	0.10
6	0.03	15	0.10
7	0.07	16	0.15
8	0.04	17	0.12
9	0.05	18	0.12

为了提高水平偏移数据的稳定性, 在识别系统中加入了基于队列的实时数据平滑算法。跟踪点检查算法流程图如图 6 所示。

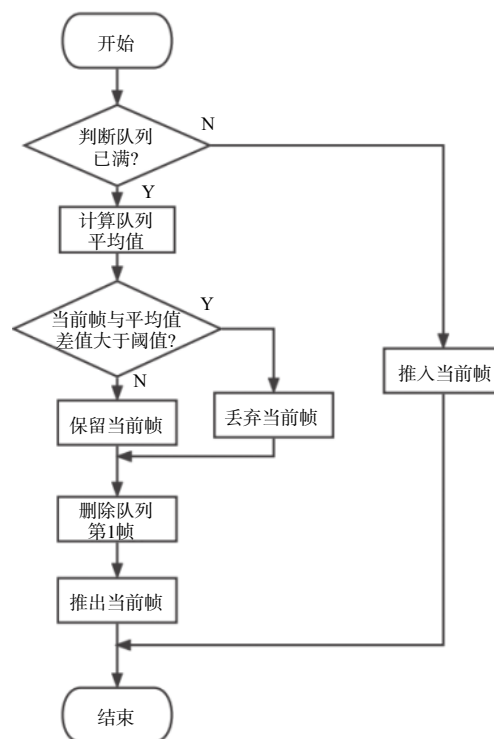


图 6 跟踪点检查算法流程图

Fig. 6 Flow chart of tracking point inspection algorithm

具体流程如下:系统对当前位置完成水平偏移识别后,会自动将当前帧中的水平偏移数据与之前5帧的水平偏移数据均值进行比较。若当前数据与前5帧数据均值的差值大于设定的阈值,则当前帧会被认定为异常帧;若当前帧底部数据与前5帧的底部数据均值的差值小于阈值,则当前帧被认为是正常帧并正常输出,系统会将队列中的末尾值推出,并将当前帧更新到5帧的队列中,为下一帧的处理做准备。

3 实验结果与分析

在将焊接轨道固定到待焊管道周壁上时,由于安装误差,焊接轨道与焊道之间的水平距离会存在差异,且在焊接小车从管道顶部沿着半圆周轨道行走至管道底部的过程中,该水平偏移误差绝大多数情况下呈现为逐渐增大或减小的平滑渐变式。在实际调试运行过程中,为了真实反映系统的有效性,在大行程条件下对系统进行测试,使焊接小车从管道顶部沿着轨道一直行走至管道底部。在行走过程中持续扫描并对水平偏移进行识别处理,共得到600余帧水平偏移数据,同时利用水平偏移数据对焊接激光输出头进行实时水平位移指导。系统处理并输出的水平偏移数据呈平滑渐变状,符合实际偏移规律,且经过指导后的焊接激光输出头能够实时对准焊道中心,水平偏移数据准确性较高。实时偏移识别轨迹效果图如图7所示。

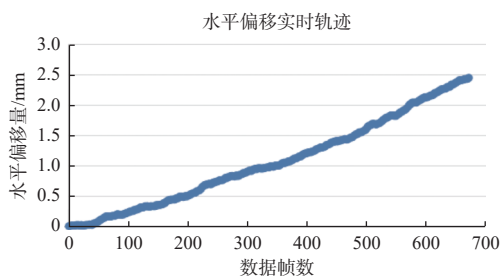


图7 实时偏移识别轨迹效果图

Fig. 7 Real-time offset recognition trajectory effect

综上所述,该系统在管道实际激光焊接测试中能够自动完成水平偏移数据的获取与处理,数据精度与平滑度较高,波动性较小,并能够根据当前焊道偏移量实时指导焊接激光输出头动作。

4 结论

本文提出了一种基于结构光的激光焊接自动

跟踪识别方法,在激光焊接过程中能够实现对水平跟踪的自动控制。在此基础上,建立了基于结构光的焊道特征点提取装置,采用特征点提取算法对焊道特征点实时提取,采用偏移实时跟踪算法对焊道偏移量进行实时识别,并利用数据处理算法对最终结果进行平滑滤波,在实际焊接过程中验证了系统的有效性。随着汽车工业、精密仪器制造、航空航天领域等相关技术的迅猛发展,该系统可以提高激光焊接效率、为工业生产、智能制造和高技术研究提供技术保障,具有广泛的使用价值。

参考文献:

- [1] 朱骏. 电焊工的工作生命质量及其影响因素[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
ZHU Jun. The work-life quality and its influencing factors of welders[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [2] 谢洁. 焊接作业的职业健康防护措施探讨[J]. 劳动保护, 2023(3): 102-104.
XIE Jie. Discussion on occupational health protection measures for welding operations[J]. Labor Protection, 2023(3): 102-104.
- [3] 刘嵩, 高波, 周大威, 等. 焊缝自动跟踪系统的发展综述[J]. 黑龙江自动化技术与应用, 1995(4): 3-6.
LIU Song, GAO Bo, ZHOU Dawei, et al. Development overview of automatic weld tracking system[J]. Heilongjiang Automation Technology and Application, 1995(4): 3-6.
- [4] 王仕仙. 深度视觉技术在焊接轨迹识别中的研究综述[J]. 装备制造技术, 2023(4): 309-312.
WANG Shixian. Review of deep vision technology in welding trajectory recognition[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(4): 309-312.
- [5] 卢荣华. 基于计算机图像的激光焊缝初始点识别及定位[J]. 铸造技术, 2016, 37(7): 1551-1554.
LU Ronghua. Initial point recognition and positioning of laser weld based on computer image[J]. Foundry Technology, 2016, 37(7): 1551-1554.
- [6] 张瑞雪. 多线激光传感器V型焊缝轨迹识别[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
ZHANG Ruixue. Multi-line laser sensor V-type weld track identification [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [7] 张杰飞. 基于OpenCV的焊缝图像处理研究[D]. 哈尔

- 滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- ZHANG Jiefei. Research on weld seam image processing based on OpenCV [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [8] 张琦, 张柯. 激光的特点及其在测距上的应用[J]. 办公自动化, 2011(16): 41.
- ZHANG Qi, ZHANG Ke. Characteristics of laser and its application in ranging[J]. Office Automation, 2011(16): 41.
- [9] 王晓嘉, 高隼, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004(增刊2): 601-604.
- WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Review of laser triangulation method[J]. Journal of Instrumentation, 2004(S2): 601-604.
- [10] 李晓宇, 何欢, 胡江碧. 基于结构光测量的三维沥青路面纹理研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 83-89.
- LI Xiaoyu, HE Huan, HU Jiangbi. Research on three-dimensional asphalt pavement texture based on structured light measurement[J]. China Highway, 2022, 42(2): 83-89.
- [11] 谢雷. 基于机器视觉的非接触测量方法及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- XIE Lei. Non-contact measurement method and application research based on machine vision [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [12] 王海. 基于线结构光三维测量方法的研究[D]. 南京: 东华大学, 2022.
- WANG Hai . Research on 3D measurement method based on line structured light [D]. Nanjing: Donghua University, 2022.
- [13] 南卓江, 陶卫, 赵辉. 激光三角测量技术的应用与前景[J]. 自动化仪表, 2019, 40(12): 1-5.
- NAN Zhuojia, TAO Wei, ZHAO Hui. Application and prospect of laser triangulation measurement technology[J]. Automation Instrumentation, 2019, 40(12): 1-5.
- [14] 洪华杰, 甘子豪, 何科延, 等. 用于曲面轮廓测量的结构光视觉技术研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7): 1-5.
- HONG Huajie, GAN Zihao, HE Keyan, et al. Study on structured light vision technology for curved surface profile measurement[J]. Automation Instrumentation, 2021, 42(7): 1-5.
- [15] 曾惠林, 杨明新, 桂汉杰, 等. 长输管道焊接与检测技术综述[J]. 石油工程建设, 2021, 47(增刊1): 107-112.
- ZENG Huilin, YANG Mingxin, GUI Hanjie, et al. Review of welding and inspection techniques for long-distance pipelines[J]. petroleum engineering construction, 2021, 47(S1): 107-112.
- [16] 郑喜军. 激光焊接技术综述[J]. 河南科技, 2013(7): 38-40.
- ZHENG Xijun. Laser welding technology overview[J]. Henan Science and Technology, 2013(7): 38-40.