

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005587

基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析

宋帅帅^{1,2} 黄 锋² 江燕斌¹

(1. 华南理工大学 广州 510641; 2. 广州计量检测技术研究院 广州 510030)

摘 要: 基于机器视觉技术检测机械产品是测量领域的发展趋势,用机器视觉检查产品质量精度和效率具有良好的保障。通过查阅国内外机器视觉尺寸测量技术相关研究文献,综述目前关于基于机器视觉几何量测量技术的研究进展情况。经分析总结出目前检测技术中存在缺少对通用几何量测量系统的研究与开发、图像处理系统带有明显的时滞性、基于机器视觉几何量测量的精度还不是很高等不足之处。提出了机器视觉机械产品几何量测量技术的发展策略;后续研究相应增加开发零件图像识别和分类模块,进行算法优化,实现更高水平的自动化、智能化机器视觉测量;有效地结合其它传感器之间性能互补的优势,通过融合多传感器建立更加稳定的传递模型消除不确定性;利用主动视觉的成果等发展策略。为基于机器视觉产品检测技术相关研究提供理论参考。

关键词: 机器视觉;几何量;测量;研究进展

中图分类号: TB92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Analysis on the research progress of geometric measurement technology based on machine vision

Song Shuaishuai^{1,2} Huang Feng² Jiang Yanbin¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Institute of Measurement and Testing Technology, Guangzhou 510030, China)

Abstract: The detection of mechanical products based on machine vision technology is a development trend in the measurement field. By consulting domestic and foreign machine vision dimensional measurement technology related research literature, review the current research progress on machine vision-based geometric measurement technology. After analysis, it is concluded that the current detection technology lacks the research and development of general geometric measurement systems, the image processing system has obvious time lag, and the accuracy of geometric measurement based on machine vision is not very high. The development strategy of geometric measurement technology for machine vision mechanical products is proposed: follow-up research will increase the development of parts image recognition and classification modules, optimize algorithms, and achieve a higher level of automation and intelligent machine vision measurement, effectively combine other sensors. The advantages of complementary performance, through the fusion of multi-sensor to establish a more stable transfer model to eliminate uncertainty, use the results of active vision and other development strategies. Provide a theoretical reference for related research on machine vision mechanical product inspection technology.

Keywords: machine vision; geometric quantities; measurement; research progress

0 引 言

机械产品几何量测量是质量管理的必要手段^[1-3]。传统人工测量使用专门定制的零件尺寸标准模板来进行对比,或者借助千分尺、游标卡尺、量规等工具进行尺寸或形位误差的测量。这种方法比较直观,但存在人工劳动成本高、测量精度稳定性差、在线检测实时性不高,由于人工测

量方法大多数属于接触式测量,因此还存在容易造成被测部件划伤、损坏等缺点^[4]。

近年来,机器视觉技术快速发展,逐渐成为测量领域中重要发展的一个分支。机械零部件高精度加工的要求越来越高,基于机器视觉测量技术已然成为现代测量和自动检测技术领域不可或缺的手段之一,同时在机械产品几何量测量、农业、军事和医学等方面也有广泛的应用和研

收稿日期:2020-12-22

究^[5-7]。通过搭建机器视觉系统可有效提高生产自动化程度,有效的减轻了工人劳动强度,也降低了企业的人力成本;而且在一些不适合于人工作业危险场所或人工视觉难以满足要求的工作场合,通常可采用机器视觉代替,可相对容易的完成测量任务,且与测量零件间不存在接触,不会产生划伤零件的任何损伤;在大批量工业生产过程中,用机器视觉检查产品质量精度和效率具有良好的保障,更有利于实现信息集成,自动化、智能化程度更高^[8-10]。

本文通过查阅国内外机器视觉尺寸测量技术相关研究文献,综述目前关于基于机器视觉几何量测量技术的研究进展情况。分析总结出目前几何量测量检测技术中存在哪些不足,并就不足之处提出相应的发展策略。通过对基于机器视觉的几何量测量技术动态研究进展分析为测量领域的相关研究提供参考。

1 机器视觉技术

机器视觉原理简单来说就是用摄像头代替人眼对要检测的目标物体来进行识别与判断,即先通过视觉传感器(相机、镜头、光源等)获取目标图像,然后将光信号转换成图像信号并传送至上位机,进行数字化图像处理技术及分析算法一系列分析,最后根据像素点的分布或者图像颜色、亮度等信息,完成产品质量判断、尺寸测量等的检测,还可将结果信号传送给相应的显示装置或执行机构完成输出动作。

机器视觉技术率先在国外开始研究和应用,国内起步虽然较晚,但随着自动化、信息化及多源信息融合的产业和人工智能技术的快速发展,其在产品几何量测量、缺陷检查、图像识别领域、机器人研究与应用等方面都表现出^[11-12]。图1所示为机器视觉技能树。



图1 机器视觉树

其中产品几何量测量方面,机器视觉可代替人工视觉对零件的尺寸和形位误差进行测量,为智能制造的实现奠定基础;产品缺陷检测方面,城市轨道裂缝缺陷检测、农业领域水果质量检测以及医药制造产线的药品包装检测等方面都可以应用机器视觉技术来进行产品缺陷检测,其生产效率和检测准确率相比人工视觉检测明显提高;图像识别领域方面,现阶段图像识别技术一般分为产品识别与人脸识别,图像识别技术也可以完成军事目标的侦察和定位,医

疗的临床诊断和病理研究等,人脸识别主要运用在安全检查、身份核验与移动支付等;机器人领域方面,机器视觉技术相当于机器人的大脑和眼睛,通过对周围环境的检测和识别,将目标位置和状态信息反馈给中心控制系统,由运动控制系统引导和控制机器人完成相应的动作。酒店或商场中的服务机器人、工厂AGV小车中都均涉及到机器视觉技术。

2 研究进展

2.1 国外研究现状

机器视觉几何量测量技术的研究最早是从国外开始的,主要集中在美国、日本、加拿大等发达国家。其中,文献[13]在1991年就成功设计了一种用于材料微力学研究的图像处理系统,用于确定裂纹尖端周围的位移和应变。文献[14]在2001年开发了一种基于机器视觉的间隙自动检测系统,系统采集设备主要包括有两个立体摄像机和两个红外LED灯,可实现车身与面板间隙的横向和范围尺寸的测量,且效果良好。文献[15]在2008年针对基于视觉技术三维直径小于1cm的物体三维重建尚未实现的问题,开发介绍了一种使用双目机器视觉系统的新型小体积重建测量方法,标准偏差为0.04mm,其实现的测量精度较高。文献[16]在2010年首先使用相机进行测量电触头相关尺寸,通过摄像机采集电触头图像,采用数字图像处理技术提取电触头顶部和底部的特征,最后使用粒子群算法实现电触头顶部和底部尺寸测量,其误差分别为0.112和0.497mm。文献[17]在2011年时提出了一种基于视觉的圆柱件圆度误差测量系统,评估采用最小区域圆法,符合Y14.5M-1994给出的圆度误差定义,并根据ISO1001进行了系统设置和图像捕获技术的新方法,以符合该形状公差的要求。结果表明,该系统可用于评估圆度误差圆柱形零件。文献[18]在2013年设计了一种可实现对复杂环境下管道内径测量的机器人,通过装载的CCD相机获取图像并进行处理,平均测量误差为0.5mm,解决了管道内径难以测量的问题,但其测量精度可进一步提高。文献[19]在2014年提出了一种用于电极尖端位移测量的新颖方法,它基于使用定制照明系统,CCD相机和图像分析算法的数字图像分析,结果显示了精确的位移测量以及机械部件的热膨胀对其他位移测量方法的影响。文献[20]在2015年介绍了一种新的方法来分析和测量固体材料(如机械工具和砖)中的裂缝尺寸。由于裂缝的形状不规则或无法预测,因此为了获得此类裂缝的准确尺寸,提出了一种利用机器视觉,图像捕获和图像处理来测量固体物体中裂纹尺寸的方法,获得测量值后,借助某些预定义的算法来优化结果。文献[21]在2017年采用机器视觉技术通过测量算法和透视变换构建了三维测量系统,将来自双互补金属氧化物半导体的图像数据传输到笔记本以计算测量参数,三维测量系统中使用世界坐标系中获取的特征点进行计算和测量数

据。并与自动变压器观测系统进行了对比分析实验,效果良好,满足设计要求。文献[22]在 2019 年时提出了一种基于机器视觉技术的在线尺寸测量方法,实现被纺工件直线度和圆度的实时测量,可实现旋转工件的直线度和圆度自动测量,并验证了在线尺寸测量系统精度的稳定性和可靠性。文献[23]在 2020 年通过使用软件、传感器、摄像头和机器人引导,实现轮工业制造检验过程的集成系统,通过部署改进的亚像素级机器视觉算法程序来精确测量齿轮,有效改善质量控制,减少停机时间并优化检查过程。该校准后获得 0.06 pixel 的极小校准误差,校准的视觉系统通过测量样本齿轮进行了验证。同年文献[24]结合干涉仪和机器视觉原理实现对条纹的数量进行计数,以确定在微米和纳米范围内的锥角和平行度误差。

20 世纪 80~90 年代,国外机器视觉技术迎来了蓬勃发展,不仅出现了基于感知特征群的物体识别理论框架、主动视觉理论框架、视觉集成理论框架等概念,而且产生了很多新的研究方法和理论,无论是对一般二维信息的处理,还是针对三维图像的模型及算法研究都有了很大地提高。早期的目标检测算法大多针对某个具体的目标类别,21 世纪之后,机器视觉技术才步入成熟期,机器视觉理论得到进一步的发展,同时开始在工业领域得到应用。同时,机器视觉理论在多视几何领域的应用得到快速的发展,基于可变形部件多目标检测方法出现。

2.2 国内研究现状

我国在机器视觉技术领域的研究起步较晚,20 世纪 80 年代改革开放从国外引进才开始接触和研究,随着我国经济社会的高速发展,到 21 世纪初期机器视觉研究在我国进入了加速发展阶段,掀起了机器视觉的研究热潮,涌现出了很多机器视觉领域的研究成果,也加速推动了机器视觉技术在我国的制药、交通、农业、物流、包装和汽车制造等众多行业的应用^[25-27]。

在机器视觉几何量测量领域,也取得了丰硕的研究成果,其中文献[28]在 1998 年通过分析在机器视觉检测中采用线结构光作为三角形测量光源时的图像特征,提出了用线光源实现快速尺寸测量的图像处理策略。该策略利用产品的已知几何模型制定检测索引表,通过检测索引表引导计算机进行图像处理,以提高机器视觉的智能程度和图像处理速度,从而实现对零件尺寸的快速在线测量。文献[29]在 2002 年采用改进的 Canny 边缘的梯度图像上进行二次曲面拟合,获取零件轮廓精确边缘的方法,实现了对其相关几何量的精密测量,达到了微米级的测量精度。文献[30]在 2004 年以图像为基础,深入研究了基于计算机视觉图像实现精密测量的系统方案、软硬件设计,特别是以软件为主要手段解决视觉测量中精度、速度和稳定性三大问题的关键技术。文献[31]在 2005 年结合机器视觉技术提出了两套车辆几何尺寸参数测量系统,即基于立体视觉的照相机阵列系统方案和基于视觉伺服的大型视觉坐标测

量机方案,两套系统都完全可以达到对车辆几何尺寸测量的精度指标要求。文献[32]在 2007 年以机器视觉技术为基础,以数字图像处理技术为方法,针对渐开线小模数齿轮的特点,开发了用于渐开线小模数直齿圆柱齿轮的机器视觉测量系统。通过对标准渐开线小模数直齿圆柱齿轮试件在万能工具显微镜和机器视觉测量系统上的测量对比分析,验证了机器视觉测量方法的可行性,并且其在提高测量效率、减小人工误差等方面存在优势。文献[33]在 2008 年针对传统接触式尺寸测量方法的缺点,利用单目视觉测量系统对被测工件进行尺寸测量,为产品的尺寸测量提供实时、快速、有效、经济的测量途径。与传统测量方法相比提高了检测零件的效率和精度,大大扩展了测量范围。文献[34]在 2009 年以双目立体视觉技术在工业检测中的应用为研究对象,针对双目立体视觉在管口测量系统中的一些关键性问题进行了研究与探讨。讨论了圆孔几何尺寸及其中心的空间坐标的视觉测量可行方案,利用极线约束求出圆边缘的空间三维坐标采用基于空间 3D 圆拟合求取圆几何参数。针对圆几何参数的测量精度总结了基于立体视觉的二次曲线空间圆提取方法。文献[35]在 2010 年基于图像拼接的图像测量,开发一套基于图像测量技术的小轴类零件二维尺寸测量系统,实现非接触测量。文献[36]在 2012 年针对如何在大量测量尺度的前提下提高测量精度这一研究难点,开发了立体视觉的大尺度三维几何尺寸测量技术。分析了影响系统精度的各种因素,将相位一致性变换与极线约束条件引入结构光光条中心提取之中,显著提高了图像分析的精度。文献[37]在 2013 年基于轴类零件的几何特征与 CCD 获取的零件图像,利用数字图像处理技术对轴类零件进行边缘检测,提出了一种自适应开关中值滤波算法,该方法滤除噪声效果明显,开发了轴类零件尺寸测量系统,实现了轴的尺寸及其参数的测量。文献[38]在 2014 年针对轴套零件的几何尺寸测量提出了一种基于机器视觉的检测方法。分析及试验表明,用该方法对轴套的几何尺寸及圆度误差进行测量及分析评定在实际应用中是可行的,并具有高效性和实用性。文献[39]在 2016 年针对常见的圆孔目标检测,设计了一套基于机器视觉的尺寸测量系统。通过仿真与实验验证计,测量和计算出圆孔零件的尺寸信息。其测量误差小于 0.2 mm,可有效解决一般圆形零件的非接触式检测。文献[40]在 2019 年针对生产线上对冲压件尺寸的高精度测量要求,利用机器视觉技术,设计了对冲压件中感兴趣区域(region of interest, ROI)尺寸的在线测量系统,实现了自动化在线尺寸测量。实验结果表明,这里算法能精确地测量出冲压件的 ROI 尺寸,达到精度要求,能够满足实际生产的需要。文献[41]在 2020 年采用工业相机对不同尺寸的黑晶面板进行图像采集,然后通过图像预处理、霍夫直线检测及参数校准等步骤对采集到的黑晶面板图像进行处理。最后根据处理结果进行计算出黑晶面板几何参数。测量设备能实现对产品 100% 测量,并在

检测精度上满足工厂测量要求。

纵观我国机器视觉检测研究发展,2008年左右属于尝试探索阶段,国内只有较少的相关研究;2010~2012年得到了长足的发展,机器视觉开始应用到各个方面,但硬件设备仍以国外品牌为主;2012~2018年,国内研发技术与产品趋于成熟,机器视觉设备的应用研究引起大众重视;2018年至今,机器视觉自动检测技术的发展,已然成为国内各大高校和厂商关注的焦点,已经应用到各行各业,主要以物理的测量、计算方面为主。就目前国内形势来看,基于机器视觉机械产品检测技术未来发展空间仍然很大。

3 不足和展望

3.1 不足之处

随着基于机器视觉技术几何量测量相关研究越来越多,可预见它将在未来的各个领域中得到更加广泛的应用。但是现阶段的研究中也存在一定的问题,主要可分为3个方面。

1)大部分测量系统都是对于某一特定的测量对象,缺少对通用或较多几何特征的机械产品几何量测量系统的研究与开发。另外,软件在使用过程中仍然存在不智能化的问题,不能实现图像的获取和测量的一体化。

2)图像处理系统带有明显的时滞性,这与图像采集速度较低及图像处理需要较长时间有很大关系。同时,视觉信息的引入一定程度上增加了系统计算的难度,整体的实时性难以得到有效保证。则图像处理速度是影响视觉系统实时性的主要瓶颈之一。

3)基于机器视觉系统几何量测量的精度还不是很高等,相对来说只适用于一般的场景,总体上缺少对影响机器视觉测量系统精度因素的分析 and 优化。

3.2 展望

1)后续研究中,可相应开发零件图像识别和分类模块,进行算法优化,实现更高水平的自动化、智能化机器视觉测量。有效地构造和组织出机器视觉核心算法,且顺利地实现机械产品自动识别与分类,实现对复杂零件所有特征的一键测量等。同时突破高速的处理算法(如小波变换、神经网络法等),用极少的计算量高速地、准确地、实时地识别出目标,同时结合计算机视觉及图像处理的研究成果,建立机械产品视觉检测系统的专用软件库。

2)通常视觉传感器具有一定的使用范围,有效地结合其它传感器之间性能互补的优势,取得更加可靠、准确的结果,消除不确定性,通过融合多传感器建立更加稳定的传递模型。再者影响测量系统精度的因素还有很多,比如图像的获取质量受光源选择、光照强度和照明方式的不同而影响系统的测量精度,后续可更深入的开展光源对系统测量精度的影响规律等方面的研究;此外 CCD 光学检测设备、视觉检测设备、非标自动化设备、机器视觉定位检测、视觉方案定制和研发及系统稳定性是所有控制系统首先考虑的

问题。

3)利用主动视觉的成果。主动视觉是当今计算机视觉和机器人视觉研究领域中的一个热门课题,强调视觉系统与其所处环境之间的交互作用能力。相比较于传统通用视觉强调主动感知能力和应基于一定的任务或目的,主动视觉认为在视觉信息获取过程中,应主动调整摄像机方向、焦距、孔径等参数使摄像机迅速对准感兴趣的物体。

4 结论

通过对国内外基于机器视觉技术几何量测量相关研究的现状分析,总结目前检测技术中存在缺少对通用几何量测量系统的研究与开发、图像处理系统带有明显的时滞性、基于机器视觉几何量测量的精度还不是很高等不足之处。提出相应发展策略:后续研究相应增加开发零件图像识别和分类模块,进行算法优化,实现更高水平的自动化、智能化机器视觉测量;有效地结合其它传感器之间性能互补的优势,通过融合多传感器建立更加稳定的传递模型消除不确定性;利用主动视觉的成果等发展策略。

从产品检测、外观尺寸量测到机械手臂、传动设备等的定位,均是机器视觉技术发挥重要作用的舞台,机器视觉技术的应用会越来越普遍,是未来工业智能化发展不可或缺的一部分。而为了满足层出不穷的新应用需求,机器视觉的应用也将出现新的发展方向。

为进一步增强研究结论的说服力,可以 Web of Science 核心数据库为数据源,采用文献计量学方法对 2000~2020 年间全球机器视觉技术几何量测量相关研究的文献进行分析。可进一步对机器视觉技术几何量测量相关研究发文数量、关键词、研究热点进行统计,对其深入分析,利于快速、准确查找对该领域有重要影响和价值的文献。同时,对机器视觉技术几何量测量相关研究的发文地区、发文机构分布情况进行统计分析,有利于指引不同地区、领域进行跨区域合作。

参考文献

- [1] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚.三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):43-50.
- [2] 刘明,杨胜寒,高诚辉.基于水平集方法的划痕形状表面视觉测量[J].仪器仪表学报,2020,41(2):184-194.
- [3] 王希波,李爱娟,高金胜,等.基于机器视觉的轮胎花纹深度测量系统研究[J].国外电子测量技术,2019,38(4):66-70.
- [4] 王纯武.传统与现代测量技术在城市规划测量中的应用框架思路构建[J].绿色环保建材,2019(4):99.
- [5] 王亚鹏,许玮,丁辰龙.共话机器视觉技术发展[J].自动化博览,2009,26(8):40-42.
- [6] 薛峰,陈川.机器视觉技术发展及其工业应用[J].无线互联科技,2016(13):137-144.

- [7] 高峰,王富东. 浅谈机器视觉技术发展及应用[J]. 山东工业技术, 2019(5):142.
- [8] 卢军党,刘东琴,田智辉. 机器视觉技术在核桃分级检测中的应用[J]. 农产品加工, 2020(20):106-107.
- [9] 金怀国,夏荒生,曾雄伟. 基于机器视觉技术的雪茄烟质量检测装置设计[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2020,19(4):7-11.
- [10] 孙郑芬,吴韶波. 机器视觉技术在工业智能化生产中的应用[J]. 物联网技术, 2020,10(8):103-105.
- [11] 曹诚诚. 基于机器视觉的工业机器人定位系统研究[J]. 科技与创新, 2020(14):69-70.
- [12] 黄涛. 基于机器视觉的产品检测技术研究[J]. 信息记录材料, 2020,21(7):87-88.
- [13] FRANKE E A, WENZEL D J, DAVIDSON D L. Measurement of microdisplacements by machine vision photogrammetry(DISMAP)[J]. Review of Scientific Instruments, 1991,62(5):1270-1279.
- [14] KOSMOPOULOS D, VARVARIGOU T. Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular re-fection [J]. Computers in Industry, 2001,46(1):49-63.
- [15] GORPAS D, POLITOPOULOS K, YOVA D. A binocular machine vision system for three-dimensional surface measurement of small objects[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2007,31(8):625-637.
- [16] SUN T H, TSENG C C, CHEN M S. Electric contacts inspection using machine vision[J]. Image and Vision Computing, 2010,28(6):890-901.
- [17] MOHAMED A, ESA A H, AYUB M A. Roundness measurement of cylindrical part by machine vision, 2011[C]. IEEE, 2011, DOI:10.1109/INECCE.2011.5953931.
- [18] KAWASUE K, KOMATSU T. Shape measurement of a sewer pipe using a mobile robot with computer vision[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013,10(1):52.
- [19] PODRŽAJ P, SIMONČIĆ S. A machine vision-based electrode displacement measurement[J]. Welding in the World, 2014,58(1):93-99.
- [20] KHALILI K, VAHIDNIA M. Improving the accuracy of crack length measurement using machine vision[J]. Procedia Technology, 2015,19:48-55.
- [21] NGO N V, HSU Q C, HSIAO W L, et al. Development of a simple three-dimensional machine-vision measurement system for in-process mechanical parts[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10):1-11.
- [22] GANGFENG X, XINGWEI Z, WEIXIAN S, et al. Research on the dimensional accuracy measurement method of cylindrical spun parts based on machine vision[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 167: 3010, DOI: 10.1051/mateconf/201816703010.
- [23] MORU D K, BORRO D. A machine vision algorithm for quality control inspection of gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1/2):105-123.
- [24] DABREO P W, JOSHI K N, PATIL B T, et al. Machine vision based interferometry for measurement of flatness error in micro and nano manufacturing[J]. IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 2020, 872: 12066, DOI: 10.1088/1757-899X/872/1/012066.
- [25] 田如安,李筠,杨海马,等. 基于机器视觉的汽车减震杆检测系统[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22): 103-106.
- [26] 胡媛敏,张寿明. 基于机器视觉的奶牛体尺测量[J]. 电子测量技术, 2020,43(20):115-120.
- [27] 李镇锋,陈晓荣,管婷欣,等. 基于机器视觉的断裂字符识别研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10): 131-134.
- [28] 周会成,陈吉红,王平江,等. 用激光光源实现快速测量[J]. 计量技术, 1998(7):3-5.
- [29] 廖强,米林,周忆,等. 微尺寸视觉精密检测系统设计[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002(12): 21-23.
- [30] 朱铮涛. 基于计算机视觉图像精密测量的关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2004.
- [31] 卞晓东. 基于机器视觉的车辆几何尺寸测量系统研究[D]. 南京:东南大学, 2005.
- [32] 郭晓然. 基于机器视觉的渐开线小模数齿轮测量方法的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- [33] 严慧敏,何炳蔚. 机械零件二维几何尺寸和形状检测系统研究与开发[J]. 机械, 2008(10):70-72.
- [34] 张浩鹏. 双目立体视觉及管口视觉测量系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [35] 张晓明. 基于 CCD 的小轴径零件全自动测量系统研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [36] 张旭莘,汪家其,张益昕,等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012,32(3): 148-155.
- [37] 祁晓玲,赵霞霞,靳伍银. 基于机器视觉的轴类零件几何尺寸测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(1): 65-67.
- [38] 陈向伟,王海月. 基于计算机视觉的轴套零件尺寸测量[J]. 制造技术与机床, 2014(10):85-88.
- [39] 谢红,廖志杰,邢廷文. 一种非接触式的圆孔形零件尺寸检测[J]. 电子设计工程, 2016,24(19):155-158.
- [40] 杨延竹,路枚,韩阜益. 基于机器视觉的冲压件感兴趣区域尺寸测量[J]. 机械设计与制造, 2019(10):150-153.
- [41] 李民,周亚同,张忠伟,等. 基于机器视觉的黑晶面板几何参数测量方法[J]. 仪表技术与传感器, 2020(5): 102-106.

作者简介

宋帅帅,博士,主要研究方向为计量检测关键技术研究、图像处理与识别等。

E-mail:5402146672@qq.com