

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107063

# 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述<sup>\*</sup>

唐寒冰 巢渊 刘文汇 马成霞

(江苏理工学院 机械工程学院 常州 213001)

**摘要:** 随着工业化水平的不断提高,基于机器视觉的大尺寸零件测量技术成为研究的热点。首先阐述了机器视觉测量技术的研究背景以及国内外研究现状,指出目前视觉测量研究的难点,提倡通过研究图像处理算法来提高测量精度和效率。其次,对视觉测量中广泛运用的边缘检测技术进行了调研分析,其主要采用粗精定位相结合的边缘检测算法,并重点分析了精确边缘定位中的亚像素边缘检测算法。接着,对大尺寸零件测量中所用到的图像拼接技术进行了调研分析,该技术所应用的图像配准主要基于区域和特征两类方法,并分析了两类方法的优势与不足。最后,总结了大尺寸零件测量方法的特点与局限性,并指出未来进一步探索的方向。

**关键词:** 视觉测量;大尺寸零件;边缘检测;图像拼接

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Review of measurement methods of large-size parts based on machine vision

Tang Hanbing Chao Yuan Liu Wenhui Ma Chengxia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of the industrialization level, the measurement of large-size parts based on machine vision has been hot in research. Firstly, this paper explains the research background of machine vision measurement technology and the current research status at home and abroad, points out the difficulties of current vision measurement research, advocates to improve measurement accuracy and efficiency by studying image processing algorithms. Secondly, this paper researches the edge detection technology, which mainly uses the coarse and fine positioning edge detection algorithm in vision measurement. Sub-pixel edge detection algorithms in precise edge positioning are highlighted for analysis. Then, the image stitching techniques used in the measurement of large size parts are investigated and analyzed. The image registration applied by this technology is mainly based on two types of methods: region and feature. This paper also analyzes the advantages and disadvantages of these two types of methods. Finally, the characteristics and limitations of the measurement methods for large size parts are summarized, and future further exploring directions for improvement are pointed out.

**Keywords:** vision measurement; large-size parts; image stitching; edge detection

## 0 引言

目前,对于工业零件的尺寸测量主要采用游标卡尺、钢尺、螺旋测微仪以及专用辅助接触式测量工具等通用的测量工具,操作简单<sup>[1]</sup>。但传统人工检测存在效率低、可重复性差、测量种类单一等局限性,且无法针对测量结果进行快速分析与数据保存。三坐标测量机在工业检测中广泛应用,其测量精度高、效率高。然而三坐标测量机测量时需要

与被测对象直接接触,针对精密易损类零件,存在导致划伤其表面的可能。在非接触式测量方式与工具中,如三维激光扫描测量,利用物理量之间的转化关系,可间接获取待测零件几何尺寸<sup>[2]</sup>。其通过激光扫描测长,具有较高的相干性和平行度,且受环境影响小,因此测量精度较高。但其操作不易,成本高。

机器视觉技术已在工业零件尺寸测量应用中得到了广泛的应用,作为非接触式测量的一种典型方式,工件尺寸通

收稿日期:2021-06-25

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(51905235)、江苏省自然科学基金(BK20191037)、常州市科技计划项目(CJ20190069)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJ CX20\_1045)、江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJCX20\_32)资助

常可通过工件图像的边缘信息获取。但针对尺寸超过 50 mm 的大尺寸工件, 受限于摄像机分辨率、拍摄视场等因素, 单幅工件图像难以获取理想的测量精度, 需要多幅序列图像通过拼接以实现高分辨率工件信息的全覆盖。

因此, 为快速且高精度获取零件完整图像边缘信息, 本文针对基于机器视觉的大尺寸零件测量技术研究中的边缘检测与图像拼接这两个经典研究内容开展调研与总结分析, 对于提高大尺寸零件视觉测量精度与效率具有重要的现实意义。

## 1 国内外视觉测量技术研究

在机械自动化检测行业中, 应用视觉测量技术, 利用相机自动采集图像, 通过上位机开展待测工件基于机器视觉的实时非接触式测量, 可有效提高检测效率和精度。如图 1 所示, 为常见机器视觉测量系统示意图。

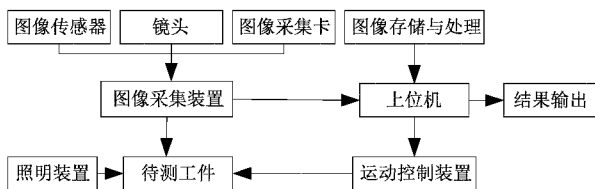


图 1 机器视觉测量系统示意图

国外的机器视觉测量技术发展较早, 1999 年 Angrisani 等<sup>[3]</sup>设计了一个计算汽车垫圈尺寸的视觉测量系统, 可以检测垫圈的长度、宽度、厚度以及面积, 总体尺寸约 90 mm<sup>2</sup>。通过实验验证其测量总时间约为 1 min, 比传统速度快 5~6 倍。Kosmopoulos 等<sup>[4]</sup>设计了一种基于机器视觉的自动间隙检查系统, 可准确测量车身面板之间横向尺寸和范围尺寸, 通过实验验证, 其测量均方误差小于 0.1 mm, 并且能够在 15 s 内检测到最重要的间隙。2016 年 Kovacevic 等<sup>[5]</sup>开发了一种基于激光的视觉测量系统, 对变形金属钢板(长 0.3 m, 宽 0.1 m, 厚 0.015 m)表面 3D 轮廓进行测量, 计算变形板的垂直位移并进行弯曲分析。在此测量系统中, 垂直位移测量精度达到 0.03 mm, 横向收缩在一次性扫描过程中自动确定, 其测量精度达到 0.012 5 mm。Primoz 等<sup>[6]</sup>提出一种基于机器视觉的电极位移测量算法, 并采用圆顶背向照明, 不仅能够二维跟踪掩模位移, 还可以确定掩模变形。Kavitha 等<sup>[7]</sup>提出一种机床主轴径向误差视觉评估算法, 利用圆检测 Hough 变换图像处理技术寻找圆心, 采用傅里叶级数曲线拟合法分析圆心的周期和非周期分量。可控制异步径向误差在 56.234~85.521 μm 范围内, 其方法可重复性达到亚微米级精度。

随着国内智能化产业以及机器视觉技术的快速发展, 越来越多的科研院所与企业, 开始研究基于机器视觉的尺寸测量方法。张亚军等<sup>[8]</sup>设计了一套基于机器视觉的枪弹弹头自动测量系统, 通过该测量系统对 1 万枚弹头尺寸进行测量, 共耗时 118 min, 检测成功率为 100%, 检测效率和

成功率远高于传统人工检测。徐兴波<sup>[9]</sup>设计了一种用于测量洗涤轴轴向长度和直径的视觉测量系统, 该轴长 110 mm, 直径为 15 mm, 通过该系统验证, 洗涤轴直径的测量公差达到 0.01 mm, 轴向长度的公差达到 0.05 mm。曹鹏勇等<sup>[10]</sup>提出一种基于机器视觉的齿廓偏差测量方法, 利用 Zernike 矩亚像素边缘检测算法获取亚像素级齿轮边缘并采集目标点云数据, 运用逆向工程法建立齿轮模型, 将采集配准后的数据进行拟合得出齿廓偏差, 其精度可达到 12.20 μm。在齿顶圆的视觉测量中, 孔盛杰等<sup>[11]</sup>采用自适应阈值曲率尺度空间技术对轮齿进行亚像素角点检测, 其次采用超最小二乘法将亚像素角点拟合成齿顶椭圆, 最后通过补偿准偏心误差优化椭圆参数。其齿顶圆圆心测量精度为 0.056 mm, 法向量测量精度为 0.068°, 实现了齿顶圆高精度测量。刘斌等<sup>[12]</sup>提出一种丝网印刷样板视觉测量方法, 利用感兴趣区域(region of interest, ROI)创建待测样板目标模板并进行粗定位, 再采用模板信息统计得出自适应梯度阈值参数进行边缘点定位, 建立局部测量坐标系实现高精度测量。该方法将测量相对误差从 4.02% 降至 1.47%。粟序明等<sup>[13]</sup>基于 MATLAB 设计了一套自动定位和测量的轴类零件系统, 系统实现了对多段轴的中心、倾斜角度以及关键尺寸的提取, 该轴总长 116 mm, 共分为 4 段, 通过实验获得的平均定位误差为 0.1 mm, 平均角度误差为 1°, 平均尺寸测量误差为 0.2 mm。郝建军等<sup>[14]</sup>提出一种弹体药室容积视觉测量方法, 该方法可精确提取药室的边缘轮廓, 通过实验验证其测量相对误差小于 0.5%, 满足企业测量误差需求。江磊等<sup>[15]</sup>设计一种基于机器视觉的汽车半轴花键检测实验平台。该实验平台可对花键的齿厚、大径、小径等多项参数同时进行测量, 同时保证平均测量误差控制在 0.2% 以内, 满足花键尺寸检测需求。

随着在工业检测中尺寸测量要求的不断提高, 基于机器视觉的尺寸测量将广泛应用。近年来, 视觉测量技术已取得了较大的发展, 但其在尺寸测量应用中仍是一个挑战性问题。其难点主要在于如何高精度、高效率且实时的完成尺寸的测量。为此可从硬件系统和软件系统两个方面进行研究与改进:

1) 对于硬件系统, 可研发一种高精密的运动平台, 选用高分辨率相机和畸变小的镜头, 但其研发成本相对较高。

2) 对于软件系统, 目前国内外学者致力于研究尺寸测量算法, 但部分仍处于试验性阶段。且大尺寸零件尺寸测量的实际应用复杂多变, 部分检测算法具有一定的局限性。而大尺寸零件视觉测量算法研究的难点主要体现在边缘检测算法和图像拼接算法两个方面, 改进图像边缘检测和图像拼接两大算法是提高大尺寸零件视觉测量精度与效率的关键。

因此, 综合考虑大尺寸零件视觉测量系统研发成本与测量实时性问题, 边缘检测技术与图像拼接技术对于提高视觉测量精度与效率具有重要的研究意义。

## 2 图像处理关键技术研究现状与应用

### 2.1 边缘检测技术

边缘检测技术的实质就是提取图像背景和前景目标的分界线,其分割边界则为图像边缘。经典的像素级边缘检测算法一般采用微分的方法进行计算,如 Sobel 算子检测方法<sup>[16]</sup>、Laplace 算子检测方法<sup>[17]</sup>、Canny 算子检测方法<sup>[18]</sup>。文献<sup>[16]</sup>中采用改进的四方向 Sobel 算子检测带钢表面缺陷边缘,该方法能够清晰地检测到划伤、孔洞缺陷的大体轮廓,此方法优于传统 Sobel 算法,但对划痕缺陷边缘定位正确率低于 90%。传统 Laplace 算法对噪声信息敏感,在处理图像后产生噪声冗余信息,对边缘检测产生干扰。文献<sup>[17]</sup>中提出一种 BRGB-Alaplace 算法,对获取的无人机图像进行边缘检测,该算法对图像边缘定位准确,能有效分割出有效信息和噪声信息,其定位精度高于传统 Laplace 算法。传统 Canny 算法需根据图像梯度分布信息提前人工设定高低阈值,对于边缘强度弱的图像,其分割效果不明显,自适应差。文献<sup>[18]</sup>中提出一种改进的自适应 Canny 检测算法,采用自适应中值滤波对图像进行预处理,用 8 领域模板计算梯度值,仿真结果表明其具有较好的抗噪性和自适应性,可有效提取图像边缘。

随着工业生产对加工零件尺寸精度要求越来越高,像素级的边缘检测算法已经无法满足实际测量的精度需求,越来越多的专家学者致力于亚像素边缘检测算法的研究。Ghosal 等<sup>[19]</sup>首先运用 Zernike 正交矩到亚像素边缘检测算法中,其二维阶梯边缘通过 4 个参数进行建模,亚像素边缘点采用参数定位方法获取,该算法抑噪能力强,检测精度较高,广泛应用于多领域。如图 2 所示,为 Zernike 矩理想边缘阶跃模型<sup>[20]</sup>。其中圆为单位圆,被单位圆包含直线部分则为理想的亚像素边缘,Zernike 矩具有旋转不变性,通过公式计算得出各参数值,实现对边缘的精确定位。张帆等<sup>[21]</sup>为精确获取血管边缘信息,提出一种基于数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)的影像血管狭窄的视觉检测方法。首先对图像进行腐蚀运算从而提取血管中轴线,其次采用 Zernike 矩对影像血管进行狭窄检测,最后对血管结构进行离散化检测,利用动态球测量算法获取血管直径。该算法平均误差为 1.47%,具有较高的精度。张晓林等<sup>[22]</sup>为实现圆形边缘亚像素检测,提出一种结合 Sobel 算子的 Zernike 矩方法,该方法主要适用于圆、椭圆等几何特征图形,算法运行时间约为传统 Zernike 矩方法的 1/4,且圆半径拟合精度相比传统算法提高了 1 倍,有效提高检测精度与效率。为提高微小零件精确定位,张亚军<sup>[23]</sup>提出一种调焦-Zernike 矩算法,建立粗调和精调相结合的调焦函数,实时选择调焦窗口并结合改进爬山算法获取最佳图像,利用归一化 Zernike 矩实现图像边缘精确定位。该方法可使非移动微型金属圆柱腔坐标定位精度达到 0.032 pixel,但该方法只适用于微型的圆柱形零件检测。

Yang 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于 Zernike 矩的玻璃瓶尺寸快速检测算法,用最大类间方差法对 Zernike 矩方法进行改进,有效克服了 Zernike 矩方法中人工选取阈值所导致边缘丢失的问题,可直接获得边缘提取的最佳阈值,应用最小二乘法拟合玻璃瓶口和玻璃瓶底形成的椭圆,快速获得玻璃瓶实际尺寸。通过实验验证,标定量块与实际尺寸之间的校准系数(像素当量)达到 0.248 2 mm/pixel,符合玻璃瓶尺寸检测的精度需求。程敏杰等<sup>[25]</sup>研究了基于 Zernike 矩的直齿轮在线测量方法,利用 Zernike 矩获取齿轮亚像素级精确轮廓,利用重心法获取齿轮中心并根据公式求取齿距偏差,最终可控制齿轮基本参数测量误差小于 0.02%,实现齿轮实时精准测量。为满足电荷耦合器件计量系统测量精度的要求,Wei 等<sup>[26]</sup>提出了一种结合改进形态学梯度算子和 Zernike 矩的边缘检测算法,并提出误差补偿公式对理想阶梯边缘模型的计算误差进行分析和修正,该方法可控制 X 方向定位精度达到 0.02 pixel, Y 方向定位精度达到 0.03 pixel,满足电荷耦合器件计量系统亚像素边缘检测需求。针对激光图像边缘易出现薄弱现象,陈黎艳等<sup>[27]</sup>提出一种高精度检测算法,先利用小波变换对图像边缘进行粗定位,再结合 Zernike 矩对边缘进行亚像素级定位,通过人工设定阈值保护图像弱边缘,其算法抑制噪声效果好,检测图像边缘准确率在 90%以上。但该算法前期设定低阈值需大量反复试验,适应能力较弱。

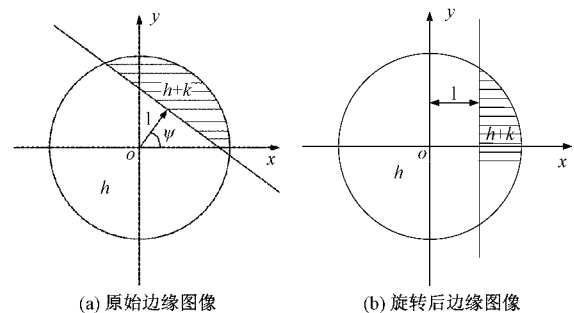


图 2 Zernike 矩理想边缘阶跃模型<sup>[20]</sup>

除 Zernike 矩方法外,还有较多亚像素级边缘检测方法被应用于特征点的高精度提取。艾裕丰等<sup>[28]</sup>提出一种高精度棋盘格角点检测算法,首先利用拟合法拟合出图像边缘,接着在  $5 \times 5$  领域内取两个最外点连线,其连线垂直方向即为边缘法线方向,然后在法线方向进行像素差值,利用反正切函数拟合亚像素灰度边缘,最后采用基于边缘的角点算法确定准确角点位置。通过实验验证,该算法测量精度达到 0.043 5 pixel,高出 Harris 角点检测算法 1 倍,可有效提高检测精度。为满足柴油机缸套尺寸测量的高精度要求,任永强等<sup>[29]</sup>提出了一种基于随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)拟合直线的检测算法,先利用最大类间方差法和 Canny 算法获取图像像素级坐标,再通过双线性插值算法获取亚像素边缘坐标,最后通

过 RANSAC 拟合算法对缸套内外径进行精确尺寸测量,通过实验其测量精度可达到 0.1 mm。罗根等<sup>[30]</sup>提出了一种手机屏幕玻璃尺寸和崩边检测方法,利用最小二乘法结合图像分段二次拟合的方法实现了目标边界的高精度定位。通过实验验证,尺寸检测误差小于 0.04 mm,误差率小于 0.05%。刘屿等<sup>[31]</sup>提出一种工件轮廓视觉检测算法,可实现不规则形状工件轮廓边缘高精度的提取。首先利用邻域面积法获取亚像素边缘,接着采用形状上下文描述子特征<sup>[32]</sup>结合迭代最近点算法进行特征匹配,最后利用邻域法计算工件轮廓偏差。经过实验验证,该算法测量精度达到 0.5 pixel。张永宏等<sup>[33]</sup>提出一种基于前三阶灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法,利用灰度矩的运算获取亚像素边缘,通过实验验证,该算法测得工件的尺寸精度比传统 Canny 算法提高了 5 倍,且实时测量系统的精度达到 0.25 pixel。为测量精密刀具尺寸,吴一全等<sup>[34]</sup>提出一种基于 Franklin 正交矩的亚像素边缘检测方法,利用 Franklin 矩获取图像边缘点特征,并将该算法与另外 4 种亚像素级边缘检测算法相对比,结果如图 3 所示。从图 3(d)中可以看出,该算法得出图像边缘相比其他方法更细腻,边缘信息更完整。

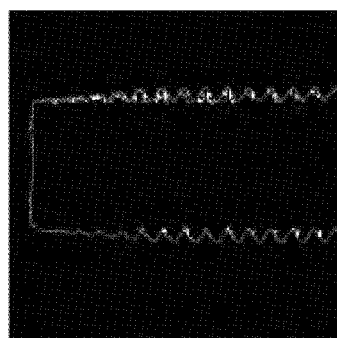
综上所述,本文对边缘检测技术当前研究进展进行总结如表 1 所示。传统像素级边缘检测技术已经无法满足现代工业高精度检测需求。在基于机器视觉的高精度测量中,大多学者采用粗精定位相结合的算法,先利用像素级边缘检测算法对图像边缘进行粗定位,再利用亚像素级边缘检测算法对粗边缘进一步细分,进行精确定位,从而实现高精度尺寸测量。此外,当前矩方法在亚像素级边缘检测中较为热门,例如灰度矩、Zernike 正交矩、Franklin 正交矩,其中 Zernike 正交矩被广泛应用。数学矩具有旋转不变性,对噪声敏感度低,通过计算各参数值可获得精确的图像边缘信息,但矩方法计算量大,图像处理时间长。目前,大多数亚像素边缘检测技术的研究主要致力于精度的提高,对于算法处理速度的提高研究较少。工业场景下的大尺寸零件尺寸实时测量对算法速度也提出了较高的要求,因此,高精度、高速度的边缘检测算法是进一步深入研究的方向。

## 2.2 图像拼接技术

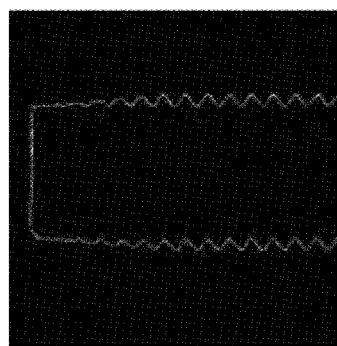
图像拼接技术是指将数张含有重叠部分的图像,通过图像配准和图像融合两项关键技术,拼接成一幅具有高分辨率且包含完整信息的图像的技术,该技术广泛地应用在医学成像<sup>[35]</sup>、遥感技术<sup>[36]</sup>、尺寸测量<sup>[37-38]</sup>等方面。

在视觉测量中,尺寸超过 50 mm 的工件称之为大尺寸工件。由于摄像机分辨率低、拍摄视场不足等因素的影响,单幅图像无法获取符合实际生产需求的测量精度,因此需要将拍摄的存在一定重叠区域的多幅图像进行拼接融合,从而获得一幅高分辨率且包含工件完整信息的图像。

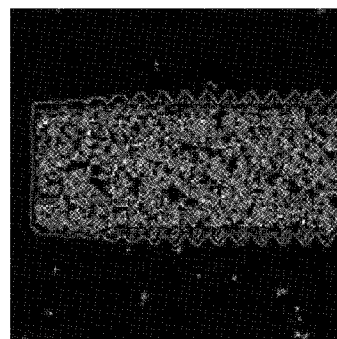
图像拼接技术的核心是图像配准,其主要内容主要包



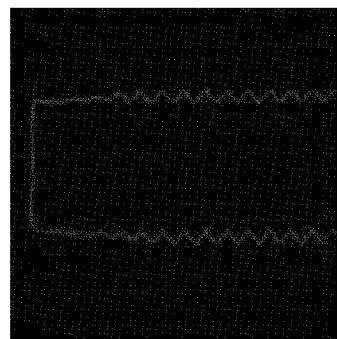
(a) Zernike矩



(b) 小波变换+Zernike矩



(c) Roberts + Zernike矩



(d) Franklin矩

图 3 4 种算法边缘检测结果<sup>[34]</sup>

括区域图像配准法和特征图像配准法两个方面。一方面是区域图像配准。早期主要采用模板匹配法,此类算法复杂度低,易于实现。Toyama 等<sup>[39]</sup>利用矩形区域作为模板在配准图像中寻找相似区域,完成图像拼接。但该方法运算量较大,且只能解决平移问题。Reddy 等<sup>[40]</sup>于 1996

表 1 边缘检测技术总结

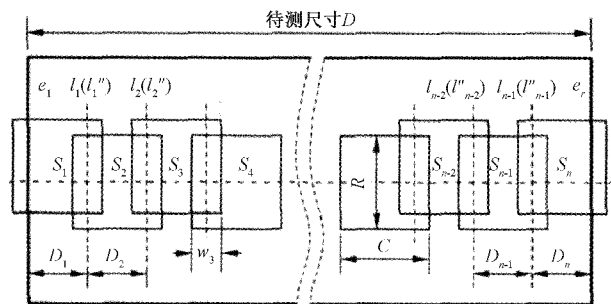
算法级别	方法分类	典型算法	优势	局限性
像素级		Sobel 算子 <sup>[16]</sup>	抑噪能力较强,对灰度渐变图像的处理效果较好	容易丢失图像边缘细节信息
边缘检测算法	微分法	Canny 算子 <sup>[18]</sup>	抗干扰性强,计算复杂度低	对于边缘强度弱的图像,分割效果不明显
		Laplace 算子 <sup>[17]</sup>	具有各向同性,可对任意方向的线条进行锐化,无方向性	对噪声信息敏感,图像处理后可产生噪声冗余信息
亚像素级边缘检测算法	矩方法	Zernike 矩 <sup>[19]</sup>	具有旋转不变性,对噪声敏感度低	计算复杂度高,会弱化图像部分边缘
		Franklin 矩 <sup>[34]</sup>	具有旋转不变性,鲁棒性较强,抑噪能力强	计算复杂度高
	插值法	双线性插值 <sup>[29]</sup>	计算复杂度低,计算量小	对噪声敏感,会使图像轮廓模糊
	拟合法	反正切函数拟合 <sup>[28]</sup>	可有效减小灰度误差,对噪声不敏感	模型复杂,计算量大

年提出一种基于快速傅里叶变换的匹配算法,将扩展相位相关法<sup>[41-42]</sup>和对数极坐标变换相结合,利用傅里叶的缩放和旋转性质寻找旋转和尺度缩放运动。该算法抗噪性强,鲁棒性高,但该方法计算复杂度较高。Samritjarapon 等<sup>[43]</sup>提出一种傅里叶变换和最佳优先搜索算法相结合的图像配准技术,利用傅里叶变换减少搜索空间,再结合最佳优先搜索算法进一步优化搜索,实验结果表明该方法平均误差为 9.5 pixel。赵婷等<sup>[44]</sup>提出一种结合区域分块的快速二进制鲁棒不变可伸缩关键点<sup>[45]</sup>(binary robust invariant scalable keypoints, BRISK)图像拼接算法,采用频域相位相关法寻找配准图像相似部分,并利用 BRISK 算法进行特征匹配,该算法保证图像拼接正确率超过 90%。

另一方面是基于特征的图像配准。牛小兵等<sup>[46]</sup>采用一点一线二维图像拼接法对薄片形样板进行拼接测量,其中一点一线是人为加入的特征标志位,将多幅图像的公共特征数据经过缩放、旋转和平移运算统一到同一坐标系下,实现图像拼接。该方法对圆直径测量精度较高,图像测量值与实际直径误差小于 0.1 mm。全燕鸣等<sup>[47]</sup>提出一种最优模板匹配法与角点特征提取相结合的图像拼接算法,采用高斯多尺度 Harris 算子<sup>[48]</sup>并结合邻近剔除法提取合适角点,利用模板匹配法在第一幅图像重叠区域中确定模板大小,且在第二幅图像限定位置寻找最优匹配块,最后采用归一化互相关法(normal cross correlation, NCC)和 RANSAC 算法进行特征点精确匹配,实现多幅图像的拼接。通过实验验证 500 mm 边长的金属工件测量精度可达到 0.02 mm。沈文扬<sup>[49]</sup>提出了一种基于轴向定位的图像拼接算法,把多幅工位图像统一到同一轴线上,从而完成图像拼接。该方法可计算轴螺纹、直径等参数,其测量平均偏差达到 0.000 2 mm。何博侠等<sup>[50]</sup>提出一种基于序列局部图像尺寸特征拼接的测量方法。该方法先采集小区域的高分辨率序列图像,然后利用各序列局部图像在空间上的连续性,建立各局部图像特征之间的关系,最后通过对各序列图像的尺寸求和得到零件总体尺寸<sup>[51]</sup>。通过实验验证,该算法处理速度快,且对于表面粗糙度

$Ra = 0.63 \mu\text{m}$  的 300 mm 以内的直边机械零件,其相对测量误差在 0.012% 以内<sup>[52]</sup>。如图 4 所示,为序列图像测量方法示意图。沿尺寸方向采集待测零件的序列局部图像  $S_i$ , 保证每幅序列图像具有重叠区域,并在重叠区域建立垂直于尺寸方向的特征线  $l_i$ , 从而获得各局部图像的尺寸

$D_i$ , 其待测尺寸总和  $D = \sum_{i=1}^n D_i$ 。

图 4 序列图像测量方法示意图<sup>[51]</sup>

为改进和优化图像拼接技术中的配准问题,Guo 等<sup>[53]</sup>提出了一种基于改进尺度不变特征转换(scale invariant feature transform, SIFT)的图像配准算法,减小特征点领域搜索范围,将连续的两个最近邻 Euclidean 距离的比值作为配准模板进行图像配准,并且通过缩小 SIFT 特征向量的维数以减少运算量。该算法能够保证较好的运算效率,且对噪声抑制、仿射变换有较好的稳定性。杨晓等<sup>[54]</sup>提出一种基于 SIFT 的敏捷方法,利用 SIFT 对获取的航空压力容器红外重构图像进行特征点匹配,再采用 RANSAC 算法减少误匹配点,最后通过亮度调整完成图像的融合。通过实验验证,该方法完整的反映了压力容器的缺陷信息。张忠民等<sup>[55]</sup>提出一种基于圆心定位的全景图像拼接,通过找图像圆边缘距离最远的两点的中心坐标获得圆心,以圆心作为基准进行剪切定位实现图像拼接,利用改进分块查表法<sup>[56]</sup>对拼接后的图像进行展开运算。该算法速度快可靠性强,但仅适用于圆形图像,且展开后的图像存在失真问题。黄康等<sup>[57]</sup>以 FPGA (field-programmable gate

array)为平台,采用 SURF(speeded up robust feature)图像拼接算法对射线底片图像进行拼接,通过实验验证,含有缺陷和不含缺陷的射线底片都可达到 100% 拼接效果,拼接图像分辨率高。其运行速度相较传统 SIFT 算法快了 1.5 倍,并克服了 SIFT 算法丢失边界数据的问题。薛真等<sup>[58]</sup>提出一种基于 HALCON 软件的图像拼接方法,利用 Harris 角点检测算法获取冲压工件图像的角点,再通过重叠区域的一致性求取变换矩阵,利用 RANSAC 算法剔除错误匹配点,最后完成图像配准。但该算法缺少一定的自适应性,对人工选取的梯度平滑值影响较大。为测量火车外轮廓尺寸,孔月萍等<sup>[59]</sup>提出了一种基于快速特征点提取和描述(oriented FAST and rotated BRIEF, ORB)算法的图像拼接方法,利用 ORB 算法<sup>[60]</sup>快速提取货车图像的特征点,采用汉明距离法<sup>[61]</sup>进行特征点匹配,并在低动态范围(low dynamic range, LDR)图像序列中提取每个像素值最佳成像信息进行图像融合<sup>[62-63]</sup>,以消除环境因素对拼接图像造成的接缝灰度不均匀的影响。该方法可控制测量误差在 2% 以内,满足货车外轮廓尺寸测量的要求。Liu 等<sup>[64]</sup>针对水下地形声纳扫描图像没有明显特征点的问题,提出了一种基于线段特征提取和三角形匹配的图像拼接算法。该方法利用最小二乘法检测图像线特征,然后对线进行相似性处理,形成三角形。结合相对角度、线段长度和相对位置得到图像变换矩阵,最后利用该矩阵对图像进行拼接和融合。该方法利用水下地形突出的线性特征,提高图像配准精度。但由于使用线特征进行筛选,无法满足实时处理要求,算法运行时间需要进一步提高。

综上所述,本文对图像拼接技术当前研究进展进行总结如表 2 所示。图像拼接算法大致可分为 2 类:基于区域的图像拼接和基于特征的图像拼接。基于区域的图像拼接主要是利用配准图像之间的灰度关系进行图像配准,主

表 2 图像拼接技术总结

方法分类	典型方法	优势	局限性
区域图像配准法	矩形块模板匹配 <sup>[39]</sup>	计算复杂度低	运算量较大,且只能解决平移问题
	相位相关法 <sup>[41-42]</sup>	抗噪性强,鲁棒性高	计算复杂高
特征图像配准法	Harris 角点匹配 <sup>[38]</sup>	计算复杂度低,鲁棒性较高,抗干扰性强	定位性能不高,对角点位置变化信息敏感
	SIFT 特征变换 <sup>[53-54]</sup>	具有图像缩放、旋转和仿射不变性,抗噪性好	特征向量维数高,运算量大
	序列图像尺寸特征 <sup>[50]</sup>	拼接速度快,精度较高	只适用于直边零件和直线型几何特征测量

要包括模板匹配法和相位相关法。此类方法算法简单,易于理解,但其计算量大,且配准图像灰度易受光照影响,会导致误匹配。基于特征的图像拼接主要利用图像角点、边缘轮廓等特征信息进行图像配准,主要包括经典的 Harris 角点检测法, SIFT 特征配准法以及序列特征匹配法。此类方法柔性较高,理论上适合任意尺寸零件的测量,其拼接速度快,效率高。但此类方法依赖特征信息的精确提取,当图像特征不明显或误判特征点时,会因特征信息的叠加导致图像配准错误,影响拼接精度。因此,探索一种不依赖于模板匹配和特征检索的图像拼接方法尤为重要。

### 3 结 论

边缘检测技术与图像拼接技术在视觉测量技术的研究与发展中,有着重要的研究意义与价值,其发展为大尺寸零件视觉测量提供了参考和技术支持。本文调研了国内外视觉测量技术及大尺寸零件视觉测量所必要的边缘检测与图像拼接两大关键图像处理技术。通过分析总结,得出以下结论:

1) 在边缘检测技术中,当前多数研究主要致力于精度的提高,亚像素边缘检测算法已成为研究的热门,其大致可分为矩方法、插值法和拟合法 3 种类型。矩方法和拟合法数学模型复杂,计算复杂度高,计算量大,而插值法抑噪能力较低,且边缘定位能力较前两类方法相对较低。因此,如何进一步优化算法、减少运算量是提高边缘检测算法运行效率和检测精度的关键。

2) 在图像拼接技术中,基于区域的图像配准法计算量较大,且依赖于卷积模板的构建与选取。基于特征的图像配准法对特征点的位置信息敏感,稳定性差。因此,进一步提高配准精度以及减少算法运算量是未来改进图像拼接技术的重要方向。

综上所述,仍需进一步研究边缘检测技术和图像拼接技术,从而满足工业场景下大尺寸零件视觉测量对精度与效率的要求。

### 参考文献

- [1] 李淑萍, 岳玉梅, 闻璋正, 等. 基于接触式测量的逆向工程研究[J]. 现代制造工程, 2006(12): 89-90, 132.
- [2] 李晓冰, 杨荣芳, 段一萍. 红外测量图像判读精度检测方法[J]. 红外, 2008(1): 20-23.
- [3] ANGRISANI L, DAPONTE P, PIETROSANTO A, et al. An image-based measurement system for the characterisation of automotive gaskets[J]. Measurement, 1999, 25(3): 169-181.
- [4] KOSMOPOULOS D, VARVARIGOU T. Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection [J]. Computers in Industry, 2001, 46(1): 49-63.
- [5] KOVACEVIC R, DING Y Y, ZHANG X B. A laser-

- based machine vision measurement system for laser forming[J]. *Measurement*, 2016, 82: 345-354.
- [6] PRIMOZ P, SAMO S. A machine visionbased electrode displacement measurement[J]. *Welding in the World: Journal of the International Institute of Welding*, 2014(1): 93-99.
- [7] KAVITHA C, ASHOK S D. A new approach to spindle radial error evaluation using a machine vision system[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, 24(1): 201-219.
- [8] 张亚军, 齐杏林. 枪弹弹头无接触自动检测系统设计[J]. *四川兵工学报*, 2012, 33(5): 6-10.
- [9] 徐兴波. 基于机器视觉的轴类零件尺寸测量系统的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [10] 曹鹏勇, 王建文, 程敏杰. 基于机器视觉的齿廓偏差测量方法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(7): 2677-2681.
- [11] 孔盛杰, 黄翔, 周崩, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 247-255.
- [12] 刘斌, 董正天, 胡春海, 等. 基于机器视觉的丝网印刷样板尺寸测量方法[J]. *计量学报*, 2021, 42(2): 150-156.
- [13] 栗序明, 方成刚, 洪荣晶, 等. 基于机器视觉的轴类零件定位与测量系统[J]. *机械设计与制造*, 2020(7): 250-254.
- [14] 郝建军, 刘子涛, 蒋强. 基于机器视觉的弹体药室容积测量[J]. *四川兵工学报*, 2011, 32(6): 74-76.
- [15] 江磊, 朱华炳, 王烽, 等. 基于机器视觉的汽车半轴花键参数检测[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(11): 119-122.
- [16] 刘源, 夏春蕾. 一种基于 Sobel 算子的带钢表面缺陷图像边缘检测算法[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(3): 138-143.
- [17] 陈思吉, 王晓红, 李运川. 改进 Laplace 的无人机图像边缘检测算法研究[J]. *测绘工程*, 2021, 30(2): 36-44.
- [18] 段锁林, 殷聪聪, 李大伟. 改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(6): 1645-1652.
- [19] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. *Pattern recognition*, 1993, 26(2): 295-306.
- [20] 欧阳, 罗建桥, 熊鹰, 等. 基于自适应阈值 Zernike 矩的铆钉尺寸检测[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(3): 139-142, 152.
- [21] 张帆, 陈相廷, 张新红. 数字减影血管造影的影像血管狭窄亚像素级自动检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 206-212.
- [22] 张晓林, 周哲海, 王晓玲, 等. 基于改进 Zernike 方法实现圆形边缘亚像素检测[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(20): 157-161.
- [23] 张亚军. 基于调焦-Zernike 矩算法的微小零件精确定位研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 87-92, 109.
- [24] YANG H, PEI L. Subpixel edge detection algorithm of the glass bottle based on zernike moments [C]. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 80: 1345-1349.
- [25] 程敏杰, 王建文. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. *机械设计*, 2020, 37(3): 19-22.
- [26] WEI B Z, ZHAO Z M. A sub-pixel edge detection algorithm based on Zernike moments[J]. *The Imaging Science Journal*, 2013, 61(5): 436-446.
- [27] 陈黎艳, 熊强强. 光图像亚像素边缘高精度自适应检测研究[J]. *激光杂志*, 2020, 41(11): 86-90.
- [28] 艾裕丰, 赵敏, 张琪, 等. 基于亚像素边缘的棋盘格的角点检测[J]. *西安理工大学学报*, 2019, 35(3): 333-337.
- [29] 任永强, 涂德江, 韩暑. 基于机器视觉的柴油机缸套尺寸测量[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020(9): 151-153.
- [30] 罗根, 倪军. 基于机器视觉的手机屏幕玻璃尺寸检测及崩边评价[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(2): 92-96.
- [31] 刘屿, 孙坤, 谢宏威. 基于形状上下文特征和 ICP 的高精度轮廓视觉检测算法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(1): 131-138, 144.
- [32] JONKER R, VOLGENANT A. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems[J]. *Computing*, 1987, 38(4): 325-340.
- [33] 张永宏, 胡德金, 张凯, 等. 基于灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法研究[J]. *光学技术*, 2004(6): 693-695, 698.
- [34] 吴一全, 邹宁, 刘忠林. 基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(5): 221-229.
- [35] GUPTA V, BUSTAMANTE M, FREDRIKSSON A, et al. Improving left ventricular segmentation in four-dimensional flow MRI using intramodality image registration for cardiac blood flow analysis [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2018, 79(1): 554-560.
- [36] 詹斌. 遥感图像拼接系统[J]. *计算机系统应用*, 2014, 23(5): 31-36.
- [37] 冯文倩, 李新荣, 杨帅. 人体轮廓机器视觉检测算法的研究进展[J]. *纺织学报*, 2021, 42(3): 190-196.

- [38] 方志强,熊禾根,肖书浩,等. 基于单目视觉多种平面尺寸的规则工件测量系统[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 241-245,249.
- [39] TOYAMA F, SHOJI K. Image mosaicing from a set of images without configuration information[C]. The 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, 2004: 899-902.
- [40] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [41] 邹进贵,杨义辉,李琴,等. 局部相位相关法在密集匹配中的应用及精度分[J]. 测绘通报, 2018, 1(5): 25-28.
- [42] RENUKA D. Image mosaicing using phase correlation and feature based approach: A review[J]. International Journal of Engineering Research, 2016, 4(1): 270-275.
- [43] SAMRITJIARAPON O, CHITSOBHUK O. An FFT-Based technique and best-first search for image registration [C]. 2008 International Symposium on Communications and Information Technologies, IEEE, 2008: 364-367.
- [44] 赵婷,康海林,张正平. 结合区域分块的快速 BRISK 图像拼接算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 210-215.
- [45] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints[C]. 2011 International Conference on Computer Vision, IEEE, 2011: 2548-2555.
- [46] 牛小兵,林玉池,赵美蓉,等. 基于特征的二维图像拼接法测量几何量[J]. 天津大学学报, 2001(3): 396-399.
- [47] 全燕鸣,黎淑梅. 大型工件测量系统中的快速图像拼接方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 60-65.
- [48] 叶鹏,王琰. 一种改进的 Harris 多尺度角点检测[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(4): 58-60,64.
- [49] 沈文扬. 基于机器视觉的轴类零件检测系统研究与设计[D]. 武汉:武汉纺织大学, 2019.
- [50] 何博侠,何勇,薛蓉,等. 二维几何特征的机器视觉高精度自动测量(英文)[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2012, 28(4): 428-433.
- [51] 何博侠,张志胜,戴敏,等. 基于序列局部图像的高精度测量[J]. 光学精密工程, 2008(2): 367-373.
- [52] 何博侠,张志胜,徐孙浩,等. 大尺寸机械零件的机器视觉高精度测量方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 5-10.
- [53] GUO X K, YANG J, LIN H. Image registration method based on improved SIFT algorithm and essential matrix estimation [C]. 2017 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), IEEE, 2017: 814-815.
- [54] 杨晓,黎琼炜,殷春,等. 应用于压力容器红外无损检测的 SIFT 图像拼接方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 31-40.
- [55] 张忠民,张磊. 基于圆心定位的全景图像拼接与展开[J]. 电子科技, 2012, 25(7): 24-26,30.
- [56] 马颂德,张正友. 计算机视觉:计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [57] 黄康,王明泉,张俊生,等. 基于 SURF 算法的射线底片拼接技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 93-97.
- [58] 薛真,项辉宇. 一种用于工件视觉测量的图像拼接方法的研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(2): 45-47.
- [59] 孔月萍,赵天悦,王佳婧. 动态无接触的货车尺寸测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 173-178.
- [60] JING J F, XIE J, LI P F. Application of SURB combined with random sample consensus algorithm in shoe uppers matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, DOI: 10.3788/LOP55.011005.
- [61] AMAN M, HASSANPOUR H, TAYYEBI J. Inverse matroid optimization problem under the weighted hamming distances [J]. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series III: Mathematics, Informatics, Physics, 2016, 9(2): 85-98.
- [62] 张军,戴霞,孙德全,等. 不同曝光值图像的直接融合方法[J]. 软件学报, 2011, 22(4): 813-825.
- [63] YU L, HOLDEN E J, DENTITH M C, et al. Towards the automatic selection of optimal seam line locations when merging optical remote-sensing images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(4): 1000-1014.
- [64] LIU T, ZHANG X, WANG Y, et al. Sonar image registration and mosaic based on line detection and triangle matching[J]. Instrumentation, 2020, 7(2): 20-35.

### 作者简介

唐寒冰,硕士研究生,主要研究方向为机电产品检测与智能控制。

E-mail: chaoyuan@jsut.edu.cn