

光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展

吕虹毓 李茂月 蔡东辰 赵伟翔

Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology

LV Hong-yu, LI Mao-yue, CAI Dong-chen, ZHAO Wei-xiang

引用本文:

吕虹毓, 李茂月, 蔡东辰, 赵伟翔. 光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展[J]. *中国光学*, 2023, 16(3): 500–513. doi: 10.37188/CO.2022–0083

LV Hong-yu, LI Mao-yue, CAI Dong-chen, ZHAO Wei-xiang. Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 500–513. doi: 10.37188/CO.2022–0083

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0083>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展

Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface
中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 214 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0214>

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system
中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

太赫兹波三维成像技术研究进展

Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques
中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0001>

无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析

Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar
中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 711 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0711>

基于改进的局部表面凸性算法三维点云分割

Improved local convexity algorithm of segmentation for 3D point cloud
中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 348 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0348>

基于彩色编码光栅投影的双N步相移轮廓术

Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection
中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 616 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0616>

文章编号 2097-1842(2023)03-0500-14

光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展

吕虹毓, 李茂月*, 蔡东辰, 赵伟翔

(哈尔滨理工大学 先进制造智能化技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:基于视觉的测量方式对航天、军工以及电子芯片等先进制造领域具有良好应用前景以及深远的发展意义,而基于结构光的在机三维视觉检测技术,是目前精密加工领域的热点与难点之一。本文以结构光在机三维测量流程为主线,将其中的关键技术,包括测量标定、相位优化求解、在机三维点云处理及不同特征曲面重构中的技术要求、涉及的方法和原理、相关研究现状及目前存在的问题,进行论述与总结。最后,根据未来相关技术的实际需求,在加工现场标定、动态实时三维重构、亚微米及纳米级测量、测量-加工一体化数据传输技术等方面进行了展望,并提出了相应的研究思路。

关键词:光栅投影; 三维形貌; 在机检测; 机器视觉; 表面重构

中图分类号: TH741

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0083

Research progress of grating projection on machine 3D topography inspection technology

LV Hong-yu, LI Mao-yue*, CAI Dong-chen, ZHAO Wei-xiang

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: lmy0500@163.com

Abstract: Vision-based measurement has good application prospects and far-reaching development significance for advanced manufacturing fields such as aerospace, the military industry and electronic chips. Among them, on-machine 3D vision detection technology based on structured light is one of the hotspots and challenges in the field of precision machining. Based on the on-machine 3D measurement process of structured light, we discuss and summarize the key technologies, including its technical requirements, methods and principles involved, related research status and existing problems in the measurement calibration, phase optimization solution, on-machine 3D point cloud processing and reconstruction of different feature surfaces. Finally, according to the actual needs of relevant technologies in the future, prospects are made with regard to processing field calibration, dynamic real-time 3D reconstruction, sub-micron and nano measurement, and measurement processing integrated data transmission technology, with the corresponding research ideas put forward.

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51975169); 黑龙江省普通高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2019-KYYWF-0204)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51975169); the Fundamental Research Foundation for Universities of Heilongjiang Province (No. 2019-KYYWF-0204)

Key words: grating projection; three-dimensional morphology; on machine inspection; computer vision; surface reconstruction

1 引言

近年来,随着航空航天、精密制造等高科技领域的迅速发展,使得制造业相关技术不断革新,同时复杂曲面零件的需求量逐年攀升,而形貌测量技术是保证产品精度的决定性因素。目前,三维形貌测量参数已取代传统的二维几何参数,更具有完整性及真实性,同时在工业 4.0 背景下的超精密加工与检测领域具有广阔的应用前景与研究价值。国际上对三维形貌标准制定了相应规范,ISO 25178 规定了相应的三维表面形貌表征参数^[1]。我国也于 2017 年颁布了产品几何技术系列规范 GB/T 33 523^[2],后文所述的方法属于以上标准所规定的区域形貌测量法。

目前,大尺寸航空零件存在加工及安装精度要求较高等特点。因此,利用传统的检测方法实现高精度及实时叶片形貌测量较为困难^[3]。另外,对于微小尺寸零件,国内外仅针对某些特殊元件进行过研究,尚未有普适的微型元件精度检测平台,这对其加工质量的控制与评价造成了一定障碍^[4-5]。对于复杂曲面的结合体等,检测过程若依赖人工则费时费力,而传统方法也不能满足特

定需求^[6]。因此,研究普适性与智能化的检测手段具有重要意义。

2 三维测量技术及系统发展现状

零件检测技术的发展趋势,如图 1 所示。目前,传统的测量方案及装置已无法满足先进制造的技术需求,在先进智能加工中需要将机检测(On Machine Inspection, OMI)系统的设计、加工、测量功能集成到机床的生产过程中。对高成本、难加工、易变形且难重复定位工件(如薄壁、特殊复杂曲面工件),大尺寸高精等级零件(航空航天类零件)有较高的合格率要求,考虑到其复杂的加工动力学特点,利用在机检测使数控系统根据采集的传感信息,为各种驱动元件提供准确反馈,进行智能监测与加工反馈控制,实现加工参数动态优化,显著提高加工精度,并有效节约时间及生产成本^[7-9]。而光学三维测量技术综合了视觉传感与图像处理技术,可对待加工零件进行非接触式测量,具有测量迅速、灵敏度高、测量时不损坏工件、测量数据丰富等优点,具有实现在机检测的应用前景^[10]。基于结构光的在机检测系统架构,如图 2 所示。

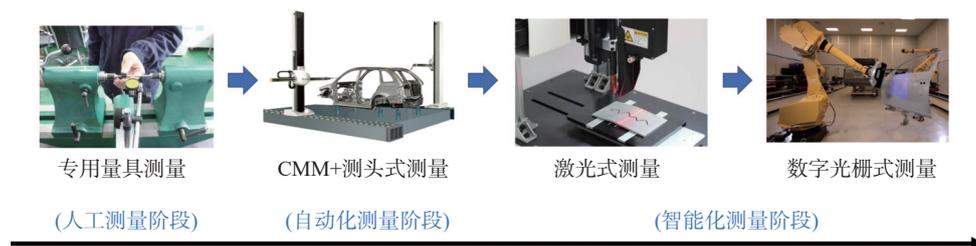


图 1 零件测量技术发展趋势

Fig. 1 Development trend of part measurement technology

在工业与科研领域,应用最为广泛的视觉测量系统平台,如基于结构光的测量平台以及其他各光学测量系统等的性能及特点总结,如表 1 所示。

目前,在机检测平台多以接触式为主,而基于光学的在机检测系统较少。针对传统测量平台及方案的局限,国内外研究机构开发了相应的新型

测量系统,对实现加工曲面的三维形貌高精度及高效率测量,具有十分重要的研究意义。

如德国 SICK 公司研发的 RulerX 及 RulerXC 系列三维结构光测量系统,测量精度范围为 0.4~0.9 μm 。ZEISS 公司开发的 COMET 三维扫描仪,其创新性地采用照明补偿技术,针对复杂光照下的产品检测具有良好效果,可有效节约工业测

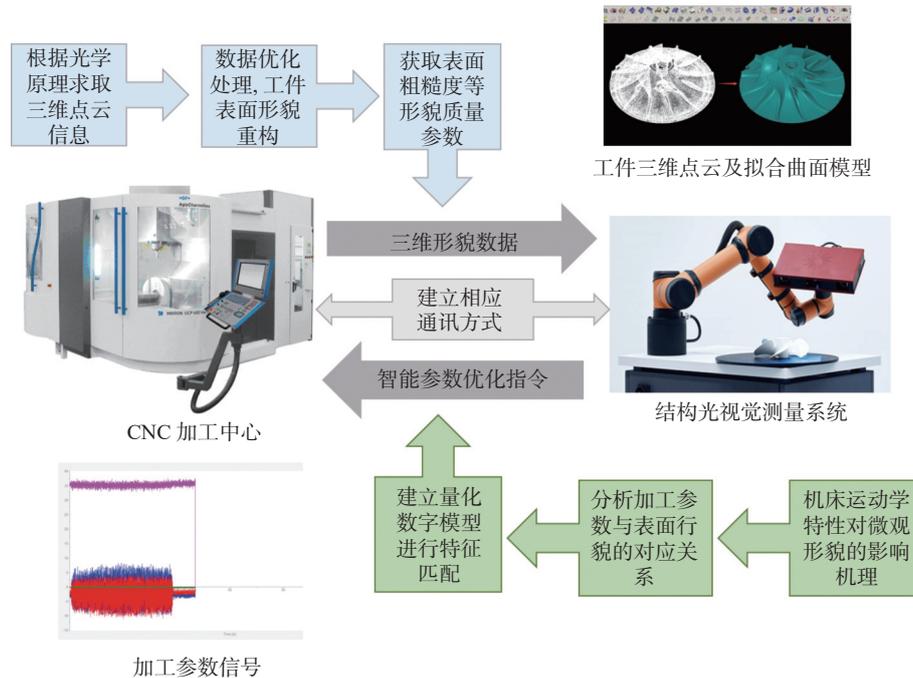


图 2 基于结构光的在机检测系统架构

Fig. 2 Architecture of an on-machine detection system based on structured light

表 1 光学测量系统平台性能及特点

Tab. 1 Performance and characteristics of the optical measurement system platform

测量系统平台	测量精度	距离量程	优点	缺点	适用场景
电子经纬仪	10 μm	0~150 m	具有误差自修正功能, 抗干扰性强	内部元器件制造误差制约测量精度	大尺寸零件装配及尺寸检测
结构光投影测量系统	0.1~20 μm	0.1~10 m	非逐点检测, 测量效率高	测量过程受反光影响	复杂形貌零件, 高效测量
激光扫描仪	0.1~10 μm	0~80 m	测量精度高, 便携性好	测量效率较低	小尺寸零件, 动态测量
机械臂测量系统	50 μm	0~5 m	自动化程度高	场景约束性强, 便携性较差	全自动化加工检测场景
白光干涉仪	纳米级或亚纳米级	150 μm ~20 mm	测量精度较高	使用条件及要求较苛刻, 测量效率低	超精密加工及3C电子检测

量成本。另外, Hexagon 所研制的 PartInspect L 型全自动 3D 测量系统, 可对航空发动机叶片、叶轮等超精加工零件进行实时精度分析, 可实现在线检测。德国 GOM 公司研发的 ATOS ScanBox 8360 三维测量系统, 对于表面孔、槽等复杂曲面以及反光表面, 可有效提高测量范围和数据质量, 实现了从自动化装载到测量的完整监测过程, 如图 3 所示。

国内在此方面的研发起步较晚, 多数参照德国、日本及美国所制定的规则标准。中科行智研发的 SL 系列三维结构光测量系统, 理想测量精度可达到 0.1~1 μm , 同时抗干扰性良好、装置轻便。深圳广成创新技术公司所研发的 HAWK 系列结构光测量系统, 其三维精度范围为 0.2~



图 3 GOM ATOS ScanBox 8360 三维测量系统

Fig. 3 GOM ATOS ScanBox 8360 3D measurement system

1.6 μm 。华中科技大学基于 AutoScan 研制了集参数自标定、测量规划、三维点云处理等功能于一体的, 面向复杂零件自动化测量的软硬件平台, 做到了检测分析一体化^[1]。华南理工大学搭建了结构光视觉标定检测系统, 并基于该系统搭建了高精度柔性臂振动测控实验台^[2]。作者所在的课题组自主研发了一种基于单目结构光的复杂零件

在机智能检测平台,可对航空叶片类复杂零件实现在机检测自适应参数标定,及智能测量误差

补偿,提高光学检测的自动化程度^[13],平台如图 4 所示。

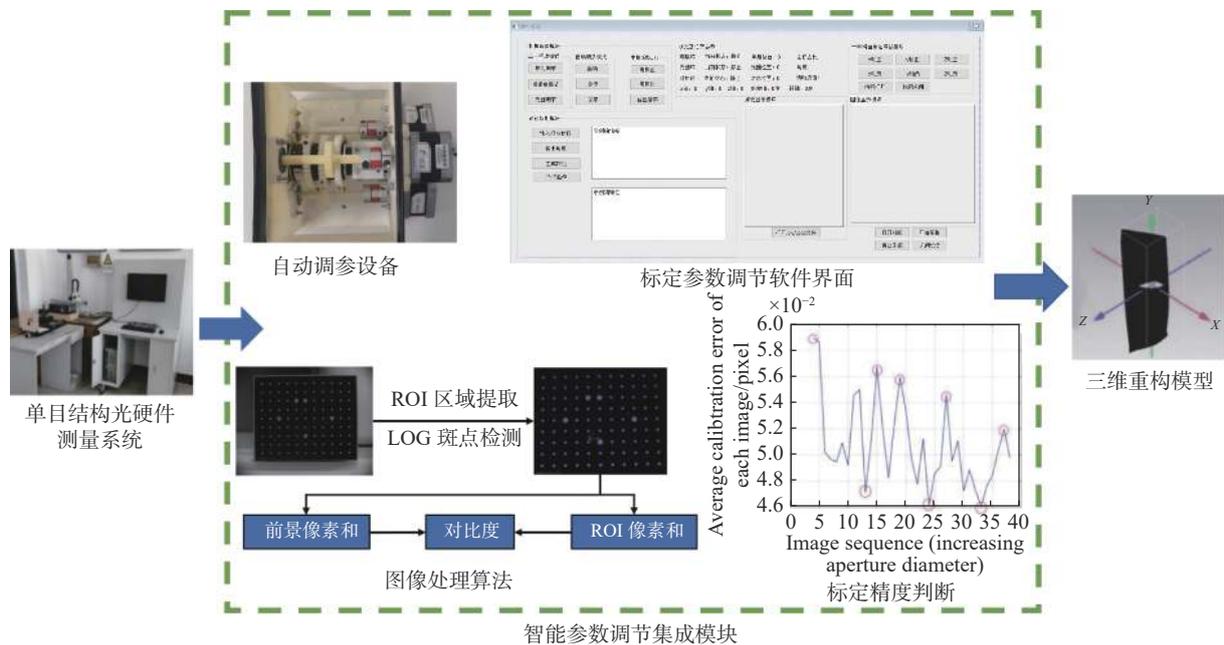


图 4 本课题组研发的单目结构光智能在机检测平台

Fig. 4 Monocular structured light intelligent on-machine detection platform developed by our research group

目前的结构光三维测量系统存在的主要问题包括:①多数传统结构光三维测量设备的标定方法过于依赖人工操作,费时费力且易造成测量误差;②结构光测量设备所采用的光栅投影测量技术存在局限,还无法适应在机检测场景中的动态三维形貌测量的需求;③部分测量平台在进行三维重构时,仅适合于实验室应用场景,对存在大量复杂点云噪声的在机检测工业场景,其可靠性不理想;④尚未有针对不同测量曲面特点的普适性检测平台。而要利用结构光实现在机检测,则要解决以上问题。

3 数字光栅投影三维测量关键技术

基于结构光栅的三维测量方式按空域与时域可分为:空域傅立叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)^[14]与时域相位测量轮廓术(Phase Measurement Profilometry, PMP)^[15]。FTP虽然可以应用于动态测量,但其测量精度低,无法满足工业检测的精度要求;而PMP适合测量细微纹理的零件表面,其测量精度较前者高,所以可更广泛地应用于加工表面测量。结构光三维测量系统的测量原理及过程如图 5 所示。

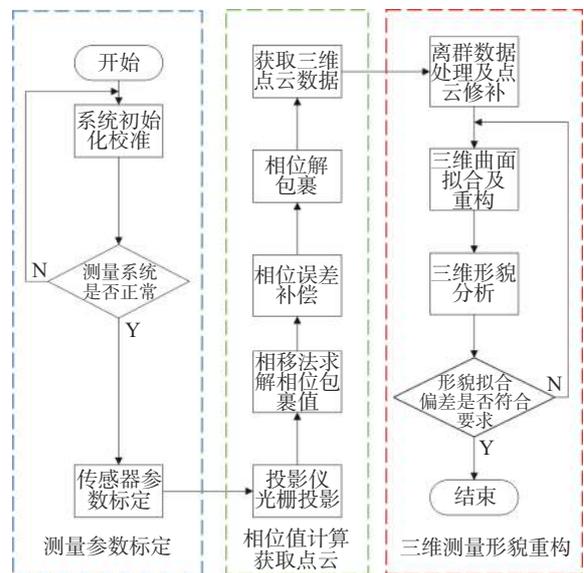


图 5 基于数字光栅投影的三维测量流程

Fig. 5 3D measurement flow based on digital grating projection

3.1 结构光在机检测自适应参数标定

目前的结构光测量参数标定多采用人工离线的标定方案,精度低且标定时间较长,并且无法适应在机检测所需的特殊动态测量场景,同时投影结构光易受环境影响。所以,学者提出了内外参

迭代算法优化^[16]、构造图像场线特征向量^[17]、视野变焦控制^[18]等方法。这些方法虽然能在一定程度上提高结构光参数标定效果,但仍然难以确定精确的标定参数值,而且依赖经验知识,尤其在复杂工况下效果欠佳。针对这一问题,研究人员通过分析相关参数与标定精度的内在作用机理,自动优化标定效果。一些学者依据光栅相位测量机理,分析光栅相位信息以获取精确的匹配关系及特征,并研究了结构光调制强度、控制点数量和感兴趣区域等因素对标定过程的作用机理,实现了结构光在机检测复杂工业场景的参数自动化

标定^[19-21]。同时,在综合分析了摄像机焦距、曝光时间、校准板倾斜和图像数量 4 个校准参数对校准精度的复合影响后,使用概率统计方法,对校准结果进行了质量比较分析,其可同时适用于动态检测时向心与远心透镜标定^[22]。另外,学者们还结合图像处理算法与硬件控制方式,实现了单目、多目结构光标定参数的动态调节^[23-25]。

综上所述,针对在机结构光检测标定时存在的相关问题,国内外学者提出了相关解决方法,可应用于自动化结构光在机检测过程,典型自适应参数标定方法对比总结,如表 2 所示。

表 2 典型自适应测量参数标定方法

Tab. 2 Typical adaptive measurement parameter calibration methods

代表性学者	技术方法	优点	缺点	适用场景
Yao ^[17]	图像特征向量法	标定精度高	复杂度偏高	工业化快速标定测量场景
Gao ^[18]	视野变焦控制法	标定速度快,实时性好	难以适用于复杂检测场景	物距变化测量场景
Moru ^[22]	参数规律统计法	无需设置初始参数	较难获取精确参数区间	采用定焦镜头的测量过程
管雯璐 ^[23]	微型自动调节装置	装置灵活、抗环境干扰强	成本较高	变温条件下的自动标定
Hojong Choi ^[25]	步进电机自动控制法	不需人为干预,自动化水平高	装置占用空间较多	自适应焦距调节

3.2 在机检测相位误差分析及补偿方法

在机检测过程中,相移法的测量精度受到一定影响,使相位包裹值的求解产生误差,可将其分为:①由测量系统几何位置约束导致的光栅畸变误差;②由光照因素导致的光栅图像饱和误差;③在机检测时由被测物移动或非稳定因素所导致的相位偏差。

3.2.1 光栅畸变误差分析及优化

为提高在机检测的灵活性,一般采用弱约束结构光测量模型。在实际测量条件下,很难严格约束测量系统间的几何位置,使原本应投射到实际基准面的条纹,投射到虚拟基准面,产生光栅几何畸变及周期畸变。畸变投影系统光路如图 6 所示。其中,真实投影参考面与虚拟参考面间转换关系表达式如式 (1) 所示。由于光栅分布 ϕ 与坐标 x 成线性比例关系,由图 6 可以得到参考平面与产生的虚拟平面间存在的相位差关系式,如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} y = y' \\ x = \frac{m \sin \theta + n \cos \theta}{n + x' \sin \theta} x' \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $m = oa$, $n = aa'$, θ 为投影仪的光轴偏差角。

$$\varphi(x) = 2\pi f x = 2\pi f \frac{m \sin \theta + n \cos \theta}{n + x' \sin \theta} x' \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出,若仍以原来的线性关系进行计算,则会产生测量偏差。由于传统相移法多数仅靠附加投影条纹数量来补偿相移误差,具有一定局限性。为了解决此类问题,在进行相位误差源分析时,可利用易于检测的形状特征,有效识别各种测量误差源并避免畸变误差^[26]。同时,可基于多频外差的相位跳跃误差自校正方法,避免额外的数据采集步骤,以解决相移方法需投影多编码图像、效率低的问题^[27]。

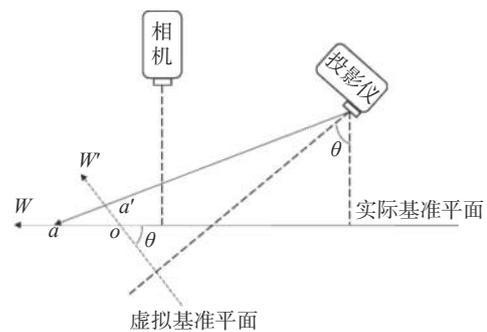


图 6 畸变投影系统光路

Fig. 6 Optical path of the distorted projection system

3.2.2 光照及反光影响的在机检测方法

在工业检测场景中,应用光栅相移法对铝合金等具有高反光特性的金属表面,或在非理想光照环境的实际工业场景中检测效果不佳^[28]。如薄壁叶片表面会出现反光现象,如图7所示,造成的三维点云测量缺失如图8所示。目前在工业中采取的喷涂法,需要后续的清理工序,同时涂层厚度及均匀性也影响了三维测量精度。



图7 薄壁叶片表面反光现象

Fig. 7 Surface reflection phenomenon of thin-walled blades



图8 反光形成的点云缺失

Fig. 8 Missing point cloud formed by reflection

以广泛采用的四步相移法为例,在复杂光环境中,影响结构光条纹的相关参数有:传感器接收

的环境光强度 L_e ; 物体表面反射率为 r 的物体反射的环境光和表面散斑的多路投影光 L_i ; 投影仪的光线强度 L_p ; 相机的曝光参数 t ; 相机增益 k 。根据以上分析,将条纹强度影响公式总结为式(3)。

$$I(x,y) = kt\{r(x,y)[L_p(x,y) + L_i(x,y)] + L_e(x,y)\} \quad (3)$$

由式(3)可知,正确设置相关可控参数,如 k 、 t 、 $L_p(x,y)$,对于获取理想条纹强度至关重要。所以国内外学者以此为主要思路,对结构光的光照影响展开了相关研究。

一类方法是通过控制曝光参数来避免条纹饱和,有学者提出了多重曝光的方法^[29],虽然可通过调节相机及光圈来方便地控制曝光参数,但无法做到精确的量化控制,且十分耗时。所以之后提出了根据被测物的表面反射率,进行曝光时间的自适应预测,避免了人为干预引入的误差,且效率较高^[30]。为了简化算法的复杂度,采用一次曝光图像完成全局最优曝光时间预测,其对于实现复杂环境在机检测具有良好的实用价值^[31]。以上基于曝光的处理方法,多数容易对表面反射率较低区域产生曝光不足的影响,Liu等^[32]利用深度学习理论,提出一种跳越金字塔聚合网络(SP-CAN)来增强单个曝光捕获的图像。与现有的图像增强方法相比,该方法可有效地保留图像边缘和角落的详细编码相位信息,在工业实际应用中,可实现全方位形貌检测,如图9所示。

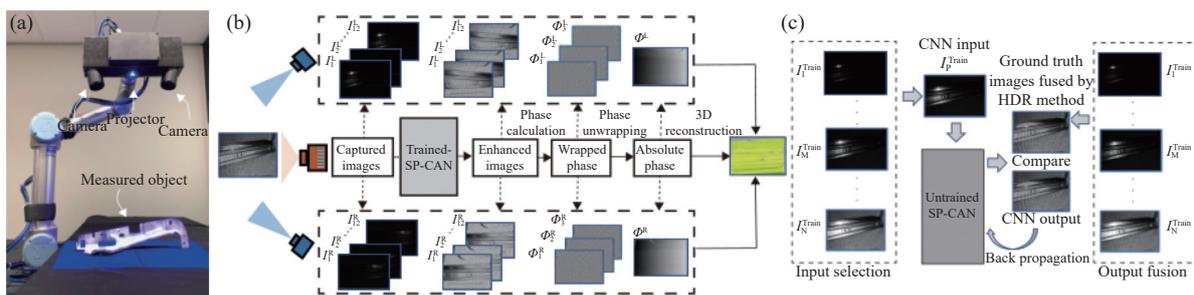


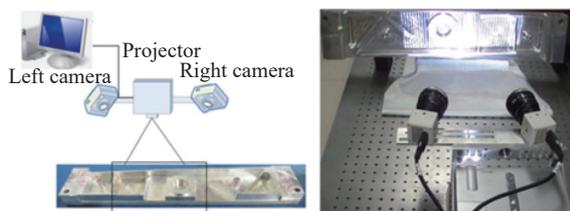
图9 (a)全自动曝光增强三维测量系统及(b), (c)方法流程^[32]

Fig. 9 (a) Full automatic exposure enhancement 3D measurement system and (b), (c) it's flow chart^[32]

另一类方法通过自适应调整投影条纹亮度,达到最适合当下检测环境的效果,以避免图像饱和,大大减少了所需图案的数量。但降低了相位展开的精度^[33]。另外,可利用点扩散函数和相机响应函数^[34],自适应动态调整黑白条纹亮度。依据投影最优强度与理想捕获强度的对应关系,建

立局部自适应灰度阈值对相位图进行优化,与全局方法相比鲁棒性更强,该方法可用于高反射率表面的加工或抛光零件,如涡轮叶片、轴或光面塑料零件^[35-36]。其采用的紧凑型双目结构光检测装置,如图10所示。

另外,一些学者采用了其他方法,如多摄像机

图 10 紧凑型反光金属工件三维测量系统^[36]Fig. 10 Three dimensional measurement system of compact reflective metal workpiece^[36]

视点法^[37], 偏振滤光片法^[38], 以上方法均需要额外的光学及控制硬件, 增加了测量工作的复杂性。上述方法仍难以应用于动态测量场景。对典型的光饱和和优化方法进行了对比总结, 如表 3 所示。

表 3 典型的光饱和和优化方法对比

Tab. 3 Comparison of typical optical saturation optimization methods

代表性学者	技术方法	优点	缺点	适用场景
Pinzek ^[29]	多重曝光控制法	曝光参数控制较方便, 无需额外硬件系统	难以根据环境定量精确控制曝光, 耗时长	环境光照影响较为主要的检测
Liu ^[32]	全自动快速最佳曝光计算方法	检测过程自动化水平较高	易影响反射率较小部位, 造成曝光不足	表面尺寸较大的反光物体检测
陈龙 ^[35]	局部自适应条纹投影法	具有针对性的处理, 不影响其他区域像素	准确的灰度阈值较难确定	叶片、轴类表面反射率差异大的对象检测
Liu ^[37]	多目视点配准法	测量精度较高	受测量空间限制, 欠缺灵活性	小范围精密物体的在机检测
Zhang ^[38]	偏振滤光片法	可较精确控制光平衡	需要添加额外的光学及控制硬件	镜面物体的在机检测

3.2.3 在机检测动态相位快速补偿

针对动态场景的结构光测量技术是目前国内外的研究难点, 由于结构光向被测物数次投影光栅, 并采用相移法计算相位, 所以当在机检测动态物体包裹相位时, 存在不可避免的相位计算偏差, 从而造成解相位偏差, 使后续获得的三维点云出现错误。

对于在机测量时的运动相位偏差, 学者发现采用动态相位补偿策略对相移测量产生的运动误差的优化具有广阔的研究价值。Chen^[39]等率先提出了在平移与旋转简单运动下的相位补偿方法。而后, 有学者通过分析结构光检测的内在机理, 提出以物体的运动周期与结构光投影规律为依据进行动态相位补偿^[40], 该方法对于具有规律

性运动的物体具有良好效果。Deng 等^[41]分析了条纹阶噪声的形成机制, 提出了一种边缘保留的条纹校正策略来解决相位问题, 与现有的补偿校正算法相比, 无需计算单像素点相位误差, 且不局限于特定相位计算方法, 简单快速。

另外, 部分学者还借助复合算法进行动态相位补偿, 如采用光流法判断物体运动状态进而完成相位补偿^[42], 其还可计算目标运动速度, 但算法计算时间较长, 并且需要被测物体拥有较为明显的特征点作为判断依据, 否则易被环境干扰。采用基于正弦和格雷码结合投影的方法, 可实现复杂物体的快速三维测量^[43]。Weise 等基于立体相位展开技术^[44], 提出一种动态实时的三维重构技术。Tao 等利用物体运动的时空相关性^[45], 使测量深度可根据当前重建对象的体积大小自适应确定。

通过表 4 总结的国内外学者的代表性研究发现, 基于相位补偿的技术可应用于结构光动态测量的多种场景, 并对实现光学非接触在机检测具有十分重要的研究意义, 但其在算法误差控制及实时性方面仍有较为广阔的提升空间。

表 4 在机动态相位补偿代表性方法对比

Tab. 4 Comparison of representative methods of on machine dynamic phase compensation

代表性学者	技术方法	优点	缺点	适用场景
Feng ^[40]	周期性运动相位补偿法	对规律性误差补偿效果好	难以应用于复杂运动场景	匀速运动状态的相位补偿
Deng ^[41]	条纹阶噪声分析法	无需逐像素计算相位误差	依赖实验条件及人工分析步骤	存在噪声的动态场景测量
郭逸凡 ^[42]	光流补偿法	准确判断运动测量状态	对环境光线过于敏感	高速动态场景测量
Kim ^[43]	相移格雷码结合方式	操作简单, 测量速度快	易引起新的测量误差	实时在机三维扫描测量

4 在机检测三维点云处理及曲面重构

在投影光栅测量出相位主值并进行相位展开后, 得到被测物表面关键的绝对相位值, 之后为进一步求取物体表面的三维点云坐标数据, 可通过标定时测量系统模型中建立的传感器像素坐标、相位信息、三维点云坐标的映射关系进行计算。

如图 11 所示, 以弱约束关系的单目结构光投影测量模型为例, 根据空间几何关系, 可建立结构光相位 θ 与参考三维坐标系中的坐标点 (X, Y, Z) 之间的转换关系, 如式 (4) 所示:

$$\theta = \frac{(2\pi L/T_0)X + (L-Z)\theta_0}{L-Z}, \quad (4)$$

式中, θ 为投影仪光心 O_p 投射出的结构光在 P 点的相位值, T_0 为正弦光栅周期, θ_0 为正弦条纹的相位初值。

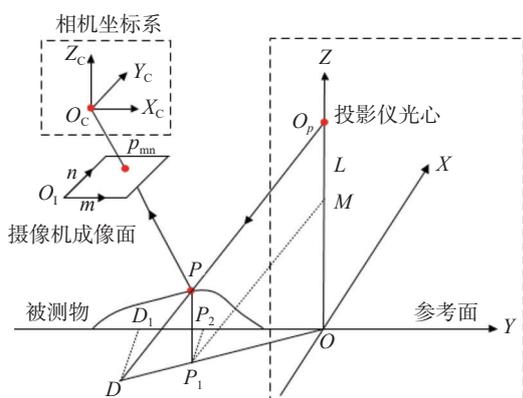


图 11 结构光投影测量模型

Fig. 11 Structured light projection measurement model

在标定出传感器参数的同时, 依据式 (4) 可得出结构光相位值 θ 与三维点云坐标之间的关系, 进而获得被测表面的三维点云数据。

4.1 在机检测点云噪声数据处理方法

利用在机检测进行三维形貌测量的过程中存在噪声, 且干扰噪声都能以误差数据点或离群数据点的方式进行表达 (见表 5)。可将干扰噪声根据特征及测量背景分为两类。第一类噪声点云主要是在整体外观尺寸测量时存在的问题, 例如固定夹具等非测量相关对象所造成的干扰, 其特点是噪声点游离于被测物之外, 易于和被测点云进行区分, 一般采用人工搜索或采用特殊仪器对其进行剔除, 此方面技术已相对成熟。本文主要聚焦第二类测量数据的处理, 即针对表面加工形貌测量时, 由于加工及测量过程中的随机因素所造成的小尺度噪声, 其特点为非均匀分布, 与目标点云相嵌合且点云邻接关系散乱, 与外观测量噪声难以判断区分, 所以此类问题的难点在于如何在有效滤除误差噪声的同时, 保留局部细节特征。针对不同种类的噪声问题, 可通过点云的边缘分

布特征, 使用移动最小二乘法计算模型点云和谷脊点的法向量。然后, 在离散梯度的基础上进一步识别和保留潜在特征点^[46]。针对复杂密度不均匀点云, 噪声难以滤除问题, 基于聚类算法进行研究^[47], 对 3D 点云模型建立栅格化单元集合, 采用并行计算可提高运算效率。

表 5 常用的离群点去除方式

Tab. 5 Common outlier removal methods

离群点去除方法	适用场景
基于迭代优化算法	适合于在杂乱噪声中搜寻临近目标点
基于邻域信息的点云聚类算法	适合对具有特定类型的点云数据进行分类
基于点云频率的滤波方式	适合对较复杂形状点云模型的分割计算

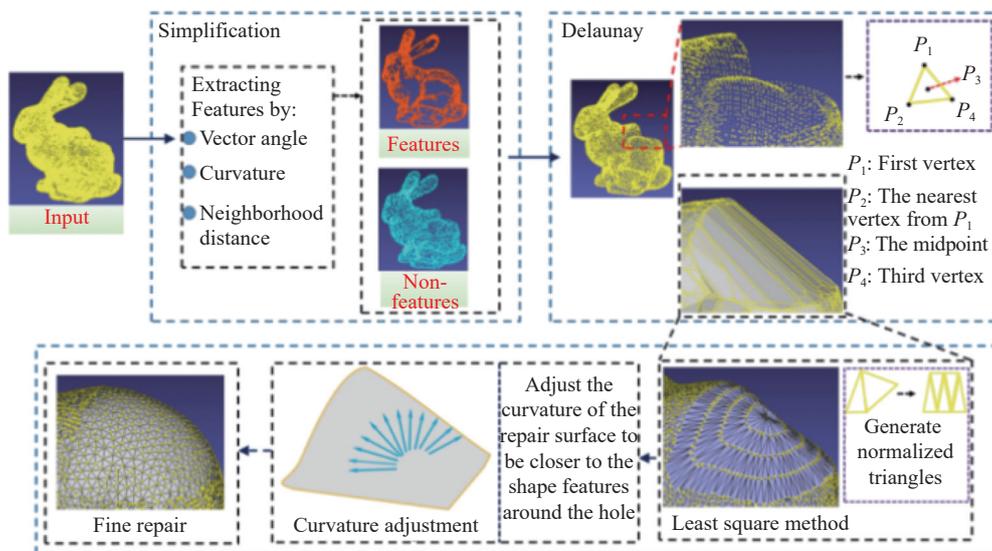
目前, 多数学者所采用的处理方式往往仅考虑算法去噪性能, 而通常忽视了对于原始点云数据及局部纹理形貌特征的保留, 所以无论是在科研或工业应用中, 都应认真思考如何兼顾好点云处理中的“去”与“留”的问题。

4.2 点云模型修补优化方法

由于在机检测时, 存在难以去除的噪声, 因投影、扫描范围或相机拍摄盲区, 以及待测物体本身形貌过于复杂等特点, 不可避免地造成点云信息丢失而形成孔洞, 直接影响后续三维重构的完整性及精确度。

对于上述问题, 应用最广泛的一类方法是依据孔洞周围点云的空间性质及特征关系, 补充并建立完整点云模型填补策略。如基于空间表面散射插值的 3D 组织重建孔洞修复新方法, 利用拟合新曲面与原始曲面曲率导数差值最小完成填补^[48]。针对复杂特征模型点云, 采用任意多边形模型修复方法, 将空间分割成不相交的内部和外部体量, 使用八叉树网格, 可同时构造内外体并重建曲面^[49]。另外, Chen 等^[50]探究了不同点云精简密度对点云修补方法的影响。实验结果表明, 对于数万量级的点云数据的最佳简化率为 70%~80%, 对数十万量级的点云数据最佳简化率为 40%。所以, 特征点优化提取和孔洞修复的结合不仅提高了修复效率, 而且保留了数据的原始特征, 基于点云优化信息的修复方法流程, 如图 12 所示。

另外, 由于基于孔洞周围点云特征的方法^[51-52],

图 12 基于点云优化信息的修复方法流程^[50]Fig. 12 Repair method flow based on point cloud optimization information^[50]

仅适用于曲率相对较小的曲线, 填充算法修补后, 对于缺失面积较大或特殊曲面曲率差异较大的测量表面, 普遍易修补出错误点云, 所以无法具有针对性的恢复其原始形貌特征。

为解决以上问题, 学者们提出基于先验知识的点云修补方法。例如, 以名义网格的先验知识为基础建立数值模型, 识别出缺失孔洞后, 以名义网格与实际点云的距离差为依据, 进行点云填补^[53]。另外, 可通过将实验数据分为特征孔和非特征孔, 对于特征孔洞利用样条引导张量投票法来修复, 非特征孔采用平面引导张量投票法进行恢复^[54]。近年来, 多数学者趋向于采用基于深度学习及神经网络算法, 进行点云补洞。其中具有代表性的方法为: 基于融合的反向传播神经网络(Back Propagation, BP)与遗传算法(Genetic Algorithm, GA), GA-BP 网络^[55] 计算过程, 如图 13 所示。

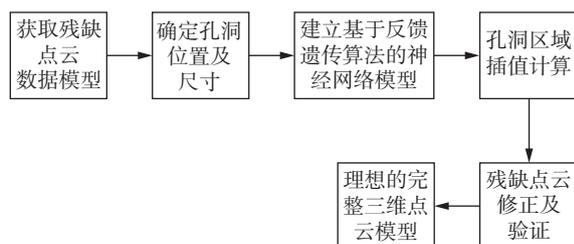


图 13 基于 GA-BP 算法的点云孔洞修补流程

Fig. 13 Point cloud hole repair process based on the GA-BP algorithm

4.3 不同类型曲面三维表面形貌重构方法

在机测量的最终目的是获取零件的表面加工形貌参数以及进一步计算分析。针对特定种类的待测量曲面, 需要采用适合的测量及表面拟合方案, 其中具有代表性的方法如下。

4.3.1 大尺寸类型曲面形貌重构

对于大型自由曲面, 由于视觉仪器视场范围与分辨率的矛盾, 及被测物体表面相互遮挡等原因, 会造成被测点过于稀疏或产生测量盲区等问题。所以应合理利用多传感器融合方式, 例如将辅助装置(机器人、无人机)搭载结构光传感器与雷达进行测量, 并将模型划分为若干部分, 逐步对各个视角及方向的点云进行采集, 之后将各视角的点云数据统一到同一坐标系中, 最后拼接出完整的曲面模型^[56]。

多视角点云配准决定了最终的点云测量精度, 存在的累积误差问题是影响重构精度的主要因素。针对复杂大尺寸曲面重构, 对点云各个分割区域视角的数据模型进行密集采集, 并通过标记曲面特征点, 采用近景测量法获取特征三维信息, 可优化重构精度^[57]。另外, 对于大尺寸点云数据计算量庞大问题, 利用多核并行计算的三角区域划分算法构造叶节点的点云数据。最后, 采用基于分段线性系统和约束四面立体化方法计算完整的三维网格模型, 具有更高的测量效率以及精度^[58]。利用无人车搭载六自由度机械臂的大尺寸表面测量重构过程, 如图 14 所示。

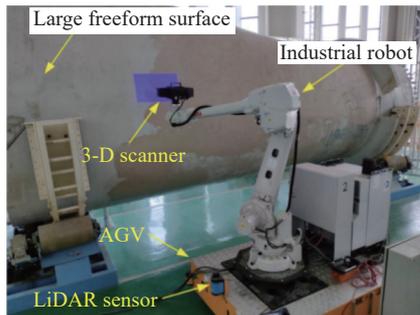


图 14 无人车搭载机械臂的大型叶片测量重构^[56]

Fig. 14 Measurement and reconstruction of a large blade of an unmanned vehicle equipped with a manipulator^[56]

4.3.2 微型曲面形貌重构

以往的小型尺寸零件的表面形貌都是以激光扫描的测量方式, 而结构光投影测量法已成为复杂的激光扫描技术的经济替代品。对于小尺寸对象重建, 可以通过围绕其进行旋转来获取图像^[59]。但微型曲面重构时, 特征点分割困难且拼接难度较大。故针对微型曲面存在的点云过拟合与欠拟合问题, 可根据图元关键点间的联系与边界特征点的排布方式划分图元, 之后采用区域生长算法与三角形叉积法分割三维点云^[60]。另外, 以微型细管孔内表面三维重构为例, 可采用位置传感器和光学三角原理进行三维测量, 重构模型如图 15 所示^[61]。

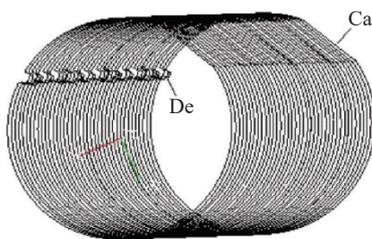


图 15 微型管孔内表面三维重构模型^[61]

Fig. 15 3D reconstruction model of the inner surface of a microtubule hole^[61]

4.3.3 复杂曲面形貌重构

对于复杂曲面测量, 需要更加密集的数据采

样, 其模型拟合与标准曲面相比更加困难。针对形状复杂、结构面较多的腔体类曲面零件, 应确定并规划最优测量精度和角度范围, 并根据零件制造中的实际测量需要, 计算不同表面纹理特征和辐照角度下目标的距离测量性能, 如可通过分析波形和功率等光学特性, 建立优化拟合模型^[62], 以简化重构复杂程度。以航天发动机机匣的三维重构过程为例, 首先, 进行自动化测量视点规划, 并基于多视角测量数据进行三维点云拼接; 之后为减小点云拼接累积误差, 可基于迭代最近点算法去除误差噪声, 最终对处理后点云进行曲面重构。航天发动机机匣如图 16 所示, 视点规划测量过程如图 17 所示。



图 16 航天发动机机匣

Fig. 16 Aerospace engine casing



图 17 视点规划测量过程

Fig. 17 Viewpoint planning measurement process

不同类型曲面重构所涉及到的重构技术要求, 如表 6 所示, 其中的难点在于如何有针对性地拟合不同技术要求的三维点云数据, 且处理好精度与效率之间的关系, 是尚要解决的关键问题。

表 6 不同类型曲面形貌重构技术对比

Tab. 6 Comparison of different types of surface reconstruction technologies

曲面类型	典型代表	曲面特点	测量难点	适用测量策略	曲面拟合方法
大尺寸曲面零件	涡轮发动机叶片、航空曲面零件	形状较规律, 曲面尺寸数米至数十米	一次扫描难以测量出完整表面点云, 且数据计算量庞大	采用柔性测量装置并配合多视角点云拼接方式	曲面片直接拟合法
微型曲面零件	微型精密半导体零件、精密光学器件	曲面尺寸较微小(毫米级)	点云分割难度较大, 且较难解决过拟合和欠拟合问题	搭载光学高倍镜头和立体显微镜的光栅条纹投影法的测量方式	样条曲线拟合法
复杂形状及曲面结合体	复杂腔体类零件	结构复杂, 面数较多	点云模型拟合困难, 测量繁琐, 难以获得高精度且完整的点云模型	接触式与非接触式结构光结合的测量方式	基于特征约束及交互式曲面拟合法

5 总结与展望

本文对基于视觉的三维表面形貌测量技术进行了综述,着重对基于结构光的三维在机测量方法进行了总结与分析,得出以下结论:

(1)传统方法难以应用于加工检测等领域的现场标定。因此,可将光学检测技术与实际机械加工过程相结合,综合考虑工业场景的光强、相机曝光参数、测量位姿及空间约束等应用条件,通过优化算法和硬件控制平台相结合的方式,建立预测调节一体的在机测量装置,根据工况自适应调节测量参数,提高测量自动化水平及实际应用性。

(2)基于结构光的投影技术,目前难以满足实际加工场景存在的动态化及实时性需求,并存在三维点云数据量庞大、传输效率难以保证等难题。在未来的研究中,可以从提高图像传感器的采集频率、提高图像的捕获效率、利用相关算法或配合硬件系统运动学补偿技术实现动态误差修正以及开发高性能处理硬件等方面解决此类问题。

(3)目前,基于结构光的三维视觉测量精度普

遍只能达到亚毫米至亚微米级别,而随着超精密加工、光刻制造等相关技术的发展,提高精度使其超越亚微米甚至纳米测量级别成为重要的研究方向。改进思路可从软硬件两方面着手,从硬件方面考虑:提高传感器精度,改进测量原理,采用更高分辨率的相机,解决投影装置的精度依赖问题,并利用更高测量精度的镜头。从算法方面考虑:可利用深度学习及神经网络突破传统算法的局限。

(4)实现自动在机测量—加工一体化,需要测量系统与数控系统实现无缝数据传输及数据在机实时处理。在数据传输方面,可利用TSN+5G等通讯架构方式,结合开放式数控系统,建立测量与加工的数据低延迟、无丢失传输。在数据处理方面,可利用云计算技术与边缘实时操作系统,搭建人工智能分析平台,提升数据分析水平,并赋予其反馈自学习能力,也是今后的重要发展方向。

未来随着技术的不断发展,相信基于机器视觉的三维测量技术会逐步完善,并更好地服务于精密加工与光学检测等领域。最终,朝着人—机—物全面物联的新型生产模式发展,并逐步形成全面智能化的新型产业和应用生态。

参考文献:

- [1] DE-DIN. BS EN ISO 25178-6-2010 Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: areal - part 6: classification of methods for measuring surface texture[S]. 2010.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 33523.6-2017 产品几何技术规范(GPS)表面结构 区域法 第6部分:表面结构测量方法的分类[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 33523.6-2017 Geometrical product specifications(GPS) —surface texture: areal—part 6: classification of methods for measuring surface texture[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [3] WANG Z P, YIN M, OU D Y, *et al.*. Optical measurement method for blade profiles based on blade self-features[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 2067-2076.
- [4] ZHENG ZH, WAN Y, ZHANG Y J, *et al.*. CLNet: cross-layer convolutional neural network for change detection in optical remote sensing imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 175: 247-267.
- [5] ZANGL K, DANZL R, HELMLI F, *et al.*. Highly accurate optical μ CMM for measurement of micro holes[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 75: 397-402.
- [6] KHAN A, MINEO C, DOBIE G, *et al.*. Vision guided robotic inspection for parts in manufacturing and remanufacturing industry[J]. *Journal of Remanufacturing*, 2021, 11(1): 49-70.
- [7] LIU J D, SUN W L, HUANG Y. An algorithm for trajectory planning of complex surface parts for laser cladding remanufacturing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(12): 2025-2032.
- [8] 陶迁,周志峰,吴明晖,等. 基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(12): 1315-1322.
TAO Q, ZHOU ZH F, WU M H, *et al.*. Detection of reflective surface defects based on phase measuring

- deflectometry[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1315-1322. (in Chinese)
- [9] REVILLA-LEÓN M, GONZALEZ-MARTÍN Ó, PÉREZ LÓPEZ J, *et al.*. Position accuracy of implant analogs on 3D printed polymer versus conventional dental stone casts measured using a coordinate measuring machine[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2018, 27(6): 560-567.
- [10] 朱可, 霍彦文, 武通海, 等. 基于光度立体视觉三维重构算法的微观磨损形貌原位测量原理及方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 1-9.
ZHU K, HUO Y W, WU T H, *et al.*. Principle and method for in-situ measurement of micro-scale worn surface morphology based on 3D reconstruction with photometric stereo vision Algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 1-9. (in Chinese)
- [11] 李中伟, 张攀, 钟凯, 等. AutoScan系列复杂零件自动化三维测量装备开发与应用[J]. *航空学报*, 2021, 42(10): 112-129.
LI ZH W, ZHANG P, ZHONG K, *et al.*. Development and application of AutoScan series automated 3D measuring equipment for complex parts[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(10): 112-129. (in Chinese)
- [12] 邱志成, 肖骏. 线结构光视觉系统标定新法及其振动测控应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 230-240.
QIU ZH CH, XIAO J. New calibration method of line structured light vision system and application for vibration measurement and control[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 230-240. (in Chinese)
- [13] 李茂月, 肖桂凤, 蔡东辰, 等. 单目结构光测量中参数自适应标定方法[J/OL]. *红外与激光工程* [2022-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20211207.0957.002.html>.
LI M Y, XIAO G F, CAI D CH, *et al.*. Parameter adaptive calibration method in monocular structured light measurement[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering* [2022-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20211207.0957.002.html>. (in Chinese)
- [14] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [15] WU ZH J, GUO W B, LU L L, *et al.*. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [16] GUAN F L, XU A L, JIANG G Y, *et al.*. An improved fast camera calibration method for mobile terminals[J]. *Journal of Information Processing Systems*, 2019, 15(5): 1082-1095.
- [17] YAO Q, KUBOTA A, KAWAKITA K, *et al.*. Fast camera self-calibration for synthesizing free viewpoint soccer video[C]. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2017: 1612-1616.
- [18] GAO Z R, GAO Y, SU Y, *et al.*. Stereo camera calibration for large field of view digital image correlation using zoom lens[J]. *Measurement*, 2021, 185: 109999.
- [19] ZHANG J, LUO B, XIANG ZH L, *et al.*. Deep-learning-based adaptive camera calibration for various defocusing degrees[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5537-5540.
- [20] XU X CH, LIU M Y, PENG S, *et al.*. An In-orbit stereo navigation camera self-calibration method for planetary rovers with multiple constraints[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 402.
- [21] FOLTYNSKI P, LADYZYNSKI P. Digital planimetry with a new adaptive calibration procedure results in accurate and precise wound area measurement at curved surfaces[J]. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2022, 16(1): 128-136.
- [22] MORU D K, BORRO D. Analysis of different parameters of influence in industrial cameras calibration processes[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108750.
- [23] 管雯璐, 谭逢富, 靖旭, 等. 基于环境温度反馈的卡塞格林望远镜自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1832-1838.
GUAN W L, TAN F F, JING X, *et al.*. Automatic focusing of Cassegrain telescope based on environmental temperature feedback[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1832-1838. (in Chinese)
- [24] 潘海鸿, 王耀玮, 徐大斌, 等. 使用非特制靶标实现线结构光平面标定[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 54-60.
PAN H H, WANG Y W, XU D B, *et al.*. Calibration of line-structure light plane using non-specific target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 54-60. (in Chinese)
- [25] CHOI H, RYU J. Design of wide angle and large aperture optical system with inner focus for compact system camera

- applications[J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 179.
- [26] PAK I J, KIM C S, KANG J C, *et al.*. Verification of phase measurement error sources in phase-shifting interferometry with four step phase-shifting algorithms[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3856-3864.
- [27] LI J, GUAN J T, DU H, *et al.*. Error self-correction method for phase jump in multi-frequency phase-shifting structured light[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 949-958.
- [28] LIN H, GAO J, MEI Q, *et al.*. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [29] PINZEK S, GUSTSCHIN A, NEUWIRTH T, *et al.*. Signal retrieval from non-sinusoidal intensity modulations in X-ray and neutron interferometry using piecewise-defined polynomial function[J]. *Journal of Imaging*, 2021, 7(10): 209.
- [30] RAO L, DA F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.
- [31] 李茂月, 刘泽隆, 赵伟翔, 等. 面结构光在机检测的叶片反光抑制技术[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 464-475.
LI M Y, LIU Z L, ZHAO W X, *et al.*. Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 464-475. (in Chinese)
- [32] LIU X J, CHEN W Y, MADHUSUDANAN H, *et al.*. Optical measurement of highly reflective surfaces from a single exposure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1882-1891.
- [33] WANG YH, ZHANG Q, HU Y, *et al.*. Rapid 3D measurement of high dynamic range surface based on multi-polarization fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(8): 084107.
- [34] RAMAKRISHNAN V, PETE D J. Savitzky-Golay filtering-based fusion of multiple exposure images for high dynamic range imaging[J]. *SN Computer Science*, 2021, 2(3): 191.
- [35] 陈龙, 王文聪, 张峰峰, 等. 基于双目结构光的术中肝脏表面局部亮度饱和和分区投影[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2590-2602.
CHEN L, WANG W C, ZHANG F F, *et al.*. Zonal projection based on binocular structured light for localized luminance saturation of intraoperative liver surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(11): 2590-2602. (in Chinese)
- [36] JIANG H ZH, ZHAO H J, LI X D. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(10): 1484-1493.
- [37] LIU G H, LIU X Y, FENG Q Y. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4557-4565.
- [38] ZHANG B L, KWOK H S, HUANG H C. Three-dimensional optical modeling and optimizations of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(12): 123103.
- [39] CHEN M Y, GUO H W, WEI C L. Algorithm immune to tilt phase-shifting error for phase-shifting interferometers[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22): 3894-3898.
- [40] FENG SH J, ZUO CH, TAO T Y, *et al.*. Robust dynamic 3-D measurements with motion-compensated phase-shifting profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 127-138.
- [41] DENG J, LI J, FENG H, *et al.*. Edge-preserved fringe-order correction strategy for code-based fringe projection profilometry[J]. *Signal Processing*, 2021, 182: 107959.
- [42] 郭逸凡. 运动物体散焦光栅投影三维测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 30-42.
GUO Y F. The research of defocusing fringe pattern projection profilometry on dynamic objects[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 30-42. (in Chinese)
- [43] KIM S S, CHUNG B M. Rapid 3D shape measurement using sine pattern in phase-shifting projection method[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(8): 1381-1389.
- [44] WEISE T, LEIBE B, VAN GOOL L. Fast 3D scanning with automatic motion compensation[C]. *Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2007: 1-8.
- [45] TAO T Y, CHEN Q, FENG SH J, *et al.*. High-speed real-time 3D shape measurement based on adaptive depth constraint[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22440-22456.
- [46] GONG M, ZHANG ZH J, ZENG D. A new simplification algorithm for scattered point clouds with feature preservation[J]. *Symmetry*, 2021, 13(3): 399.
- [47] 杜钦生, 李丹丹, 陈浩, 等. 结构光3D点云的PIN针针尖提取[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(9): 1331-1340.

- DU Q SH, LI D D, CHEN H, *et al.*. PIN tip extraction from 3D point cloud of structured light[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(9): 1331-1340. (in Chinese)
- [48] NIE E J, LI J, ZHANG R M, *et al.*. Three dimensional point cloud hole repairing strategy for binocular stereo reconstruction[C]. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE, 2017: 2456-2461.
- [49] JU T. Robust repair of polygonal models[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 888-895.
- [50] CHEN H, CUI W. Holes filling of scattered point cloud based on simplification[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(11): 14641-14661.
- [51] CHU T, YAO W M, LIU J, *et al.*. Hole-filling framework by combining structural and textural information for the 3D Terracotta Warriors[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 15(4): 046503.
- [52] 李月雯, 耿国华, 魏潇然. 基于泊松方程的孔洞修补算法[J]. *计算机工程*, 2017, 43(10): 209-215,221.
LI Y W, GENG G H, WEI X R. Hole-filling algorithm based on Poisson equation[J]. *Computer Engineering*, 2017, 43(10): 209-215,221. (in Chinese)
- [53] 刘中玉, 张明锋, 聂雪媛, 等. 一种基于径向基函数的两步法网格变形策略[J]. *力学学报*, 2015, 47(3): 534-538.
LIU ZH Y, ZHANG M F, NIE X Y, *et al.*. A two-step mesh deformation strategy based on radial basis function[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 534-538. (in Chinese)
- [54] LIN H B, WANG W. Feature preserving holes filling of scattered point cloud based on tensor voting[C]. *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing*, IEEE, 2016: 402-406.
- [55] ZHANG H, TIAN ZH G. Failure analysis of corroded high-strength pipeline subject to hydrogen damage based on FEM and GA-BP neural network[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(7): 4741-4758.
- [56] WANG J SH, GONG Z Y, TAO B, *et al.*. A 3-D reconstruction method for large freeform surfaces based on mobile robotic measurement and global optimization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5006809.
- [57] WANG J SH, TAO B, GONG Z Y, *et al.*. A mobile robotic measurement system for large-scale complex components based on optical scanning and visual tracking[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102010.
- [58] GUO B Y, WANG J W, JIANG X B, *et al.*. A 3D surface reconstruction method for large-scale point cloud data[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 8670151.
- [59] DE PAOLIS L T, DE LUCA V, GATTO C, *et al.*. Photogrammetric 3D reconstruction of small objects for a real-time fruition[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, Springer, 2020: 375-394.
- [60] 张溪溪, 纪小刚, 胡海涛, 等. 基于特征线拟合的微型复杂曲面点云分割方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061502.
ZHANG X X, JI X G, HU H T, *et al.*. Point cloud segmentation method for complex micro-surface based on feature line fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061502. (in Chinese)
- [61] 吴恩启, 柯映林, 李江雄. 微细管道内表面光电检测及三维重构系统[J]. *光电工程*, 2007, 34(1): 59-64.
WU E Q, KE Y L, LI J X. Photoelectric detection and 3D reconstruction system for the inner surface of small-diameter pipes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 59-64. (in Chinese)
- [62] HARIYAMA T, MARUNO K, WATANABE M, *et al.*. High-accuracy error-reduction method for 3D complex shape measurement with local-maximum-power-based technique of FMCW[J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 69-82.

作者简介:



吕虹毓(1996—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 2021年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为计算机视觉及光学非接触式测量技术等。
E-mail: lhy3007@126.com



李茂月(1981—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 2004年于南京林业大学获得学士学位, 2007年于长安大学获得硕士学位, 2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事智能加工与光学检测技术方面的研究。E-mail: lmy0500@163.com