

基于机器视觉的齿轮测量技术研究进展

张德海 马选雄 李艳芹 祝志逢 许宸语 周盛茂 浮绍椿

Research progress of gear measurement technology based on machine vision

ZHANG Dehai, MA Xuanxiong, LI Yanqin, ZHU Zhifeng, XU Chenyu, ZHOU Shengmao, FU Shaochun

引用本文:

张德海, 马选雄, 李艳芹, 等. 基于机器视觉的齿轮测量技术研究进展[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1447–1456. DOI: 10.5768/JAO202546.0603003

ZHANG Dehai, MA Xuanxiong, LI Yanqin, et al. Research progress of gear measurement technology based on machine vision[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1447–1456. DOI: 10.5768/JAO202546.0603003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0603003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机器视觉螺纹图像评价方法

Thread image evaluation method based on machine vision

应用光学. 2022, 43(5): 904–912 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0502004>

用于多光谱相机的机器视觉系统设计

Machine vision system design for multispectral cameras

应用光学. 2025, 46(2): 233–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201001>

基于机器视觉的手机屏幕表面划痕检测研究

Surface scratch detection of mobile phone screen based on machine vision

应用光学. 2020, 41(5): 984–989 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502008>

批量高速二维码视觉检测识别系统

Identification system for batch of two-dimensional code with high speed based on machine vision

应用光学. 2021, 42(2): 276–282 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0202004>

低畸变宽工作距机器视觉镜头光学设计

Low distortion wide working distance machine vision optical lens design

应用光学. 2020, 41(5): 924–928 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501008>

基于蚁群算法的辊式涂布涂层厚度图像检测

Roll coating thickness image detection based on ant colony algorithm

应用光学. 2020, 41(3): 516–522 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0302005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082(2025) 06-1447-10

引用格式: 张德海, 马选雄, 李艳芹, 等. 基于机器视觉的齿轮测量技术研究进展[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1447-1456.

ZHANG Dehai, MA Xuanxiong, LI Yanqin, et al. Research progress of gear measurement technology based on machine vision[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1447-1456.



在线阅读

基于机器视觉的齿轮测量技术研究进展

张德海, 马选雄, 李艳芹, 祝志逢, 许宸语, 周盛茂, 浮绍椿

(郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 基于机器视觉的齿轮精度测量是齿轮精度理论与机器视觉技术的有机结合, 一次测量可以获得齿轮的全部几何要素, 适用于批量齿轮的在线测量, 具有不损伤表面、避免搬运造成光洁度下降、测量信息全面等优点。首先研究了机器视觉的基本原理, 然后对齿轮二维图像测量的研究现状进行了表述, 并介绍了机器视觉齿轮立体图像多种测量方法的结果, 最后展望了机器视觉技术在齿轮测量领域的发展、应用优缺点和多元融合, 为广大齿轮制造商以及从事机器视觉测量研究的学者提供了参考依据。

关键词: 机器视觉; 二维图像; 立体重构; 齿轮测量

中图分类号: TN247; TB487

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0603003

Research progress of gear measurement technology based on machine vision

ZHANG Dehai, MA Xuanxiong, LI Yanqin, ZHU Zhifeng, XU Chenyu,
ZHOU Shengmao, FU Shaochun

(College Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Gear accuracy measurement based on machine vision is an organic combination of gear accuracy theory and machine vision technology. All geometric elements of gears can be obtained in one measurement, which is suitable for online measurement of batch gears. It has the advantages of not damaging the surface, avoiding the loss of finish caused by handling, and comprehensive measurement information. Firstly, the basic principle of machine vision is studied, then the research status of gear two-dimensional image measurement is described, and the results of various measurement methods of machine vision gear three-dimensional image are introduced. Finally, the development, application advantages and disadvantages and multi-integration of machine vision technology in the field of gear measurement are prospected, which provides a reference for the majority of gear manufacturers and scholars engaged in machine vision measurement research.

Key words: machine vision; two-dimensional image; stereo reconstruction; gear measurement

引言

齿轮是能通过连续啮合传递运动和动力的机械基础零部件, 因其具有效率高、平稳性好、传动比准确度高, 可靠性高等优势, 被作为机械设备及仪器传动的核心, 发挥着不可替代的作用。齿轮

的加工制造精度是影响齿轮传动性能的最主要因素, 且机械装备的性能很大程度取决于齿轮传动性能, 而齿轮测量技术为齿轮产品加工制造精度合格提供了可靠保证。因此, 对生产出来的齿轮产品加工制造精度进行测量必不可少。同时, 齿

收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2025-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52006201); 国家自然科学基金面上项目(52275295); 河南省科技攻关项目(242102230034)

第一作者: 张德海, E-mail: zhangdehai0318@163.com

轮精度测量技术也是一个备受机械行业高度关注和极具研究价值的课题。

由于齿轮的复杂形状和严苛的测量环境,使用接触式测量方法无法实现对齿轮的快速在线测量^[1]。而非接触式齿轮测量技术中常用的方法包括结构光法^[2]、激光干涉法和三维扫描法^[3]等。相比于结构光法和激光干涉法,三维扫描技术作为一种先进的机器视觉测量技术,具有信息要素全和可视化程度高等优点,因此在齿轮测量领域发展迅速。

现代三维扫描技术的理念基础,源于通过光学摄影测量从二维图像中恢复三维信息的原理,具体可追溯到1989年,日本大阪精机公司结合激光全息原理开发了FS-35非接触齿面分析机^[4],首次采用机器视觉技术对齿轮类机械零部件进行在线测量,实现了快速测量齿形误差。

基于机器视觉的齿轮精度测量是齿轮精度理论与机器视觉技术的有机结合^[5]。使用机器视觉进行齿轮测量时,除了图像处理算法会影响测量精度外,摄像机自身的标定技术,立体匹配技术和

环境噪声等均会影响齿轮的测量精度。

针对现有机器视觉对齿轮测量技术的研究主要是围绕二维平面测量和立体重构测量方面开展。因此,本文首先介绍了机器视觉测量的基本原理,然后基于机器视觉对齿轮二维图像处理、测量精度、测量系统和立体测量技术的方法等方面进行分析总结,并根据发展现状对齿轮精度视觉测量技术的应用及前景进行了展望。

1 机器视觉测量基本原理

基于机器视觉的齿轮测量主要依赖于高精度的图像采集设备和复杂的图像处理算法。为了更好地运用机器视觉测量技术,需要了解摄像机的成像模型。

输入的视觉测量模型类型不同,测量的结果也不同,机器视觉测量模型按成像类型可以分为小孔成像模型和非线性成像模型。图1为摄像机图像平面与虚拟图像平面,理想的线性成像模型为小孔成像模型,其成像效果可以对齿轮进行一比一复刻。

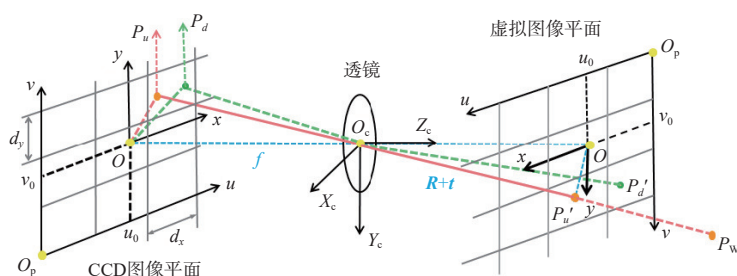


图1 摄像机图像平面与虚拟图像平面^[6]

Fig. 1 Camera image plane and virtual image plane^[6]

小孔成像模型的转换关系可以表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:坐标原点为 O 的图像坐标系 xOy ; (u_0, v_0) 为图像坐标系的原点,下标0表示像素坐标系原点; (X_c, Y_c, Z_c) 为摄像机坐标点,下标c表示摄像机坐标系标识; (u, v) 为像素坐标系($O_p - uv$)上某一点,下标P表示像素坐标系标识; f 表示摄像机焦距; d_x 和 d_y 分别为焦点到成像平面的距离; $\mathbf{0}^T = (0, 0, 0)$; R 为

正交三阶旋转矩阵; t 是由3个平移向量组成的三维矩阵; (X_w, Y_w, Z_w) 表示物体在世界坐标系中的位置,下标w表示世界坐标系标识。

考虑到现实摄像机中的镜头会由于存在不同程度的成像畸变,导致镜头失真,引起图像变形,因此摄像机的镜头畸变在测量过程中需要校正。

非线性成像模型可以表示为

$$\begin{cases} x_{\text{rad}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_{\text{rad}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x, y) 是畸变点的位置; $(x_{\text{rad}}, y_{\text{rad}})$ 是归一化处理的无畸变坐标, 下标 rad 表示矫正后无畸变标识; r 表示无畸变坐标与光学中心的距离, 即畸变圆半径; $r^2 = x^2 + y^2$; k_1 、 k_2 、 k_3 是径向畸变项, 下标 1 表示距离图像中心较近的区域, 下标 2 表示距离图像稍远的区域, 下标 3 表示距离图像更远的区域; p_1 、 p_2 是切向畸变系数, 下标 1 为图像在水平和垂直方向上的平移变形, 下标 2 为图像的旋转畸变。

2 机器视觉对齿轮二维图像的处理与测量研究

基于机器视觉的齿轮二维图像处理技术涵盖了图像处理、轮廓提取、参数测量和测量系统等多个方面。一些研究人员和学者在这一领域进行了深入研究, 如研究了不同的图像处理与边缘提取算法, 以提高图像质量和测量精度, 提出了不同的齿轮参数测量方法, 实现对齿轮的准确尺寸和形态分析, 并且设计了不同的齿轮测量系统, 提高了测量的自动化程度和效率。

2.1 图像分割与边缘提取算法研究现状

对采集到的齿轮二维图像进行预处理时, 由于摄像机自身的畸变以及外部光照等因素的影响, 会不可避免地使齿轮图像产生改变, 影响测量精度^[7]。对采集到的齿轮二维图像进行背景噪声消除, 精确的图像分割和清晰的齿轮特征提取等操作, 对齿轮精度分析具有重要的参考意义。因此, 近年来有研究学者对齿轮图像的分割与提取算法进行了如下研究。

2017 年, 段振云等人^[8]在确定齿轮边缘过渡带的基础上, 提出了一种基于高斯积分曲面拟合的亚像素级边缘定位算法, 构建并求得了边缘法向的高斯积分模型均值, 确定了齿轮图像的亚像素边缘, 能够最大限度地消除噪声的影响。为了验证模型效果, 测得最大齿廓偏差为 $5.948 \mu\text{m}$, 根据 GB/T 10095《圆柱齿轮》渐开线齿轮公差等级从 1 级到 11 级, 5 级精度的齿廓偏差允许值是 $8 \mu\text{m}$, 实现了高精度的齿轮测量。

2017 年, 单紫薇^[9]在对现有的齿轮图像边缘检测算法研究中, 提出基于八邻域的像素级边缘提

取算法与基于双线性插值与高斯曲线拟合相结合的亚像素级边缘提取算法, 分别实现了齿轮图像的像素级边缘粗定位与亚像素级边缘的精确定位, 为验证算法精度, 随机选取齿轮局部图像上的 15 组数据, 使用精度为 $0.05 \mu\text{m}$ 的一等量块进行实验验证, 结果表明算法的精度达到 $1 \mu\text{m}$ 。

为解决齿廓图像边缘失真导致偶然性测量误差的问题, 2019 年, 支珊等人^[10-11]提出了一种基于测量误差类型的齿廓图像边缘失真修正算法, 改进了 Bertrand 曲面模型, 获取亚像素齿廓边缘偏距信号, 实现齿轮的齿距测量, 单个齿距偏差小于 $0.75 \mu\text{m}$, 累计偏差为 $2.60 \mu\text{m}$, 满足 5 级精度直齿圆柱齿轮的测量要求。但对于齿轮基圆的定位方法, 现有研究并未提出有效的解决方案。

为直接获得斜齿轮齿面的粗糙度, 2021 年, HE Y 等人^[12]提出了一种基于机器视觉的斜齿轮粗糙度测量方法, 通过对感兴趣区域提取有效特征, 并应用于卷积神经网络模型。选择从生产线上的 15 个齿轮中经过处理的 4 440 张图像, 按照 1 : 15 分为测试集和训练集, 结果表明所建模型的准确率可达 97%。

目前对齿轮图像分割与边缘检测算法已经有了很高的精度和准确性, 但还存在一些问题, 如图像采集时噪声对图像的影响, 以及算法的逻辑等。因此, 在未来的研究中, 需要进一步改进和优化现有的边缘检测算法, 并与其他相关技术相结合, 以提高测量精度和鲁棒性。

2.2 齿轮参数测量研究现状

齿轮参数测量的实质是求解像素密度与轮廓的物理尺寸。为了扩展齿轮参数测量的范围和提高测量精度, 有研究学者对基于齿轮图像的参数测量进行了如下研究。

齿廓总偏差是评定齿轮几何精度的基本项目之一, 它是指实际齿廓形状偏离理论齿廓的几何量, 用来衡量齿轮齿廓曲线的平滑性。最初是在 2012 年, CAJA J 等人^[13]基于视觉测量技术开发了一款软件, 用以评估齿轮图像的齿距偏差和渐开线齿廓偏差, 是对齿轮测量评估的开端。此后, ALI M H 等人^[14-15]通过摄像机采集探针沿着齿轮齿廓以 10 mm/s 的速度扫描图像, 实现了齿轮齿形误差的在线测量, 明显提高了测量的稳定性和速度。2017 年, 王宁等人^[16]提出一种基于机器视觉的齿轮齿廓总偏差测量方法, 通过半径约束拟合

圆孔中心,并根据齿廓边缘点坐标建立齿廓总偏差数学模型。为验证5级精度齿轮模型效果,与三坐标测量机对比,最大绝对误差不超过 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。

小模数齿轮指模数小于 1 mm 的齿轮,由于小模数齿轮的尺寸小,对其齿轮特性的测量困难,因此在2018年,LUO M T等人^[17]提出了一种测量小模数齿轮的光学相干断层扫描方法,测得模数分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 的小齿轮的几何参数,实现了微型齿轮的精密测量。汤洁等人^[18]针对小模数齿轮,依据齿轮精度标准ISO1328-1:2013中偏差项目定义,给出了基于视觉测量的齿轮齿距偏差和齿廓偏差评定方法,通过对比本研究齿轮测量中心对模数为 0.5 mm 、8级精度圆柱直齿轮的测量结果,完成了方法验证,最大绝对误差为 $4\text{ }\mu\text{m}$,最小为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。虽然实现了小模数齿轮的视觉测量,但是该算法在实际测量中速度一般,不适合工厂批量测量。为此在2020年,ALHADEFF L L等人^[19]提出了一种在齿轮生产过程中测量小型齿轮的预检测方法,采用光学显微镜采集齿轮图像并计算出齿轮形位误差,显著降低测量时间。与此同时,左孝林^[20]也提出了用齿廓拟合圆弧进行齿距偏差计算的测量方法,应用于工厂中出现因凸起或凹陷等局部缺陷导致测量误差较大的情况,提高了齿距偏差和齿廓偏差的测量精度,解决了批量小模数齿轮快速测量的要求。

从上述研究可以发现,不同方法适用于各自的测量领域,目前可以实现齿轮基本参数测量,通过对测量方法进行优化,可以提高齿轮参数测量的精度和效率,继而推动齿轮测量向齿轮偏差参数测量方向发展。

2.3 齿轮测量系统研究现状

国外的研究学者视觉图像齿轮测量系统起步较早,如2005年,YOUNES M A等人^[21]提出了一种集轮廓、齿厚和齿距测量装置于一体的齿轮视觉测量系统,在 60 s 内可实现齿厚偏差、节距偏差和齿廓同时测量。为降低测量时间,GADELMA-WLA E S^[22]提出了齿轮几何参数的机器视觉测量系统,开发了一款GEARVISION软件,实现了对直齿圆柱齿轮参数在线测量,对齿顶圆直径为 156 mm 的齿轮测量误差为 $\pm 0.101\text{ mm}$ 。

搭建齿轮测量平台能够有效改善测量精度并提高效率,近些年,国内的研究学者根据测量场景的不同,进行了深入的研究。

2014年,李冠楠^[23]研发了基于结构光的直齿圆柱齿轮视觉测量系统,用于测量渐开线齿廓基圆半径和齿形误差,在通过齿轮参数验证其有效性的基础上,进一步分析了影响该系统精度的关键因素,包括硬件影响和算法因素。但是该系统仅针对圆柱直齿齿轮,因此在2016年,LIU R L等人^[24]搭建了由多个相机构成的锥齿轮测量系统,通过对168个锥齿轮进行测试,实现了测量速度不超过 1.3 s ,精度达到 $45\text{ }\mu\text{m}$,适用于自动化生产线的实时测量。

随着汽车电装、家用电器和办公用品等领域的崛起,对于注塑齿轮生产企业具有重要的作用,因此在2020年,周佳艺等人^[25]研发了面向生产现场的注塑齿轮快速视觉检测系统,可实现注塑齿轮基本参数和外观的在线检测与测量,对缺陷的检测准确率为 100% ,尺寸测量重复性小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2024年,YU B等人^[26]针对小模数齿轮,研究了一种结合激光传感器和视觉相机的齿轮测量方法,建立了齿轮测量系统模型,并使用标准块进行精度评估,根据ISO1328-1对齿形偏差的评价,测量重复性为 $1.52\text{ }\mu\text{m}$,实现了6级精度的小模数齿轮在线测量。

目前,齿轮视觉测量技术已经可以实现测量齿轮基本参数,并能够面向生产现场进行快速测量。多数研究也已经从测量齿轮基本参数发展到测量齿轮齿面误差精度,小模数齿轮的测量精度也达到了微米级。然而大部分测量研究主要是对二维图像测得某单一参数,参数测量的集成度低,无法做到对齿轮进行全面测量与评价。

3 机器视觉对齿轮立体图像测量的研究

随着计算机技术的快速发展,仅仅使用单目摄像机采集并测量齿轮图像的二维参数已经不能满足可视化需求了,在科技进步和市场升级的双重作用下,双目甚至多目视觉检测技术很快应用于齿轮测量领域,特别是立体图像测量方面的研究成果不断涌现。而现有的机器视觉对齿轮立体图像测量的主流方法包括双目甚至多目视觉测量、结构光法视觉测量、激光三角测量等。

3.1 双目视觉

双目视觉测量原理简单,只需要在自然光下就能获得三维信息,具有系统结构简单、测量灵活和成本低等优点。采用被动式光源对三维景深进行

测量,非常适合现场的在线测量,其劣势是程序算法复杂,计算量大,在光照较暗或者过度曝光的情况下效果差,双目视觉测量系统如图2所示。

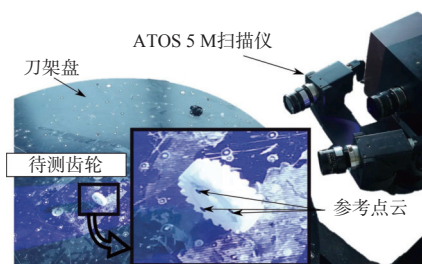


图2 双目视觉测量系统^[27]

Fig. 2 Binocular vision measurement system^[27]

2021年,URBAS U等人^[27]为了评估扫描齿轮的测量偏差,使用双目相机对6个直齿圆柱齿轮进行逆向建模,拟合出齿轮的点云数据,测量出了齿轮的螺距偏差和轮廓偏差,并对比使用了齿轮坐标测量机,分析了误差来源,能够快速评估齿轮整体质量,但是在细节部分,例如齿面等进行重复测量时的综合不确定度要高于齿轮坐标测量机。

为解决双目相机在齿轮细节部分的测量问题,2023年,LI J H等人^[28-29]将双目视觉与结构光技术相结合,立体重构了直齿圆柱斜齿轮的点云数据,并依据ISO1328-1实现了对8级精度斜齿轮表面的三维误差测量,分析了误差的主要来源,同时提出了同轴多环检测法用以测量齿厚和齿距,测量结果与齿轮坐标测量机具有高度的一致性。

双目视觉对圆柱齿轮可以进行360°全方位的立体采集和测量,但是对于具有复杂几何形状的齿轮(例如端面齿轮),双目相机无法获取其完整的齿轮点云信息^[30]。因此2022年,LU X X等人^[31]提出将双目视觉与逆向建模技术结合,将点云数据和设计模型的几何特征进行坐标变换,使用非均匀有理b样条曲线建模方法准确重建端面齿轮的齿面,并通过有限元分析,降低了齿面边界区域的偏差测量,获得了更多细节信息。

在模具行业,微小形齿轮如果使用接触式的测量方法,加工标准齿轮成本高,难度大,采用视觉测量就显得格外重要。在2022年,王青云等人^[32]提出将双目视觉与结构光投影相结合,采集三维点云数据,既实现了齿轮整体的三维偏差测量,也能够反映出金属收缩的成形特性,同样适用于注塑齿轮的测量。

随着机器视觉技术的快速发展,与其他非接触

测量技术相结合进行齿轮测量也随之变得愈加广泛,并且引入了一些具有深度学习的算法^[33]来解决测量过程中的问题,齿轮测量精度有所提升。2023年,杨洪涛等人^[34-35]对比了不同算法处理的直齿轮点云模型,重构出明显的齿轮边缘细节,测量出齿轮的左右齿距总偏差和齿廓总偏差,有效提高了齿轮重构时模型的精度。

3.2 结构光法

结构光是通过一个光源投射出具备一定结构的(比如黑白相间)的光线打到齿轮表面,不同的形状特征会使结构光的条纹或者斑点产生不同程度的变形,可以通过算法计算出距离、形状和尺寸等信息,从而获得齿轮的三维立体图像。齿轮重构转换模型如图3所示。

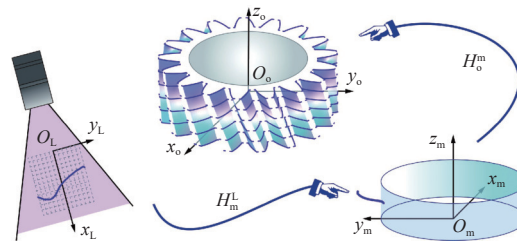


图3 齿轮重构转换模型^[36]

Fig. 3 Tooth surface reconstruction transformation model^[36]

近些年,有学者研究了线结构光技术对齿轮的高精度测量,发现在齿轮测量研究中采用线结构光技术是一种常见且有效的方法^[37],特别适合获取齿轮轮廓和齿形等细节信息。为了快速获取齿面三维形状信息,实现齿轮径向圆跳动测量,MIAO J W等人^[38]使用线结构光和视觉相机在不旋转物体的情况下,通过多幅景深图像拟合出椭圆测量齿轮轴的径向跳动,构建出齿轮齿面的三维形貌误差,极大地提升了测量效率。

2021年,洪天野^[39]搭建了线结构光和摄像机相结合的齿轮三维测量装置,建立了计算齿面点云理论分布位置的数学模型,可以自定义测量立体齿轮的基本参数。为验证模型效果,选取渐开线斜齿圆柱齿轮,测得单个齿距偏差为5.2 μm,累积齿距偏差为25 μm,评价该齿轮齿距误差精度为6级。

2021年,余石鹏等人^[40-42]建立了线结构光和摄像机相结合的超精密齿轮齿距偏差测量系统,对6级精度齿轮立体测量的不确定度展开研究,以齿廓偏差为研究对象,对测量结果的影响因素展开了分析,共分析出了7种影响源,结果表明,线结构

光系统的误差是影响整个齿轮测量系统误差的主要因素,其不确定度为 $2.3\text{ }\mu\text{m}$,能够满足测量精度在 $2.3\text{ }\mu\text{m}$ 以上的齿轮测量。

3.3 激光三角干涉法

基于光学三角原理,根据光源、物体和检测器三者之间的几何成像关系来确定空间物体各点的三维坐标。通常使用激光作为光源,CCD相机作为检测器,激光干涉测量系统示意图如图4所示,PZT指压电陶瓷。

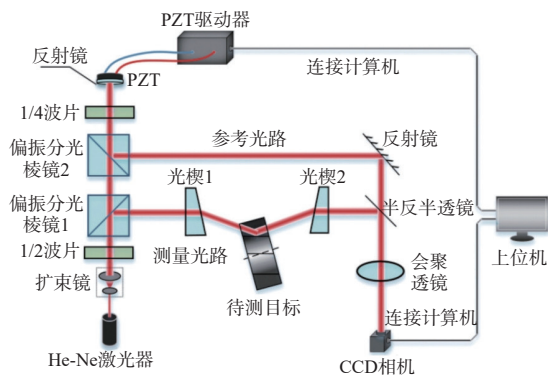


图4 激光干涉测量系统示意图^[43]

Fig. 4 Schematic diagram of a laser interferometry system^[43]

为了使激光测量技术更好地应用于齿轮测量领域,2011年,FANG S P等人^[44]设计了齿面激光干涉测量系统,并使用小模数的圆柱齿轮进行数值模拟和测量试验,结果表明,干涉条纹图像能反映出齿面重建的形状,但是由于随机干扰和安装误差,图像中也存在一些噪声。

为了实现更高的齿轮倒角表面轮廓测量精度,2015年,ZHOU C L等人^[45]提出使用激光传感器和XY移动控制平台测量齿轮倒角表面轮廓,控制滚珠丝杠精密控制平台运动,拟合出齿轮倒角轮廓的表面,测量精度可达 $1\text{ }\mu\text{m}$,并且易于使用。

为了通过测量几何误差来补偿重建齿轮轮廓的精度,2019年,TIAN H等人^[46]使用2个类似双目视觉的激光三角测量传感器,直接测量齿轮轮廓,通过补偿传感器的螺距和偏航角来校准测量的齿形,补偿结果可以减少至高98%的几何误差。

2022年,ZHU X D等人^[47-48]针对激光干涉方法在测量齿轮形状偏差缺乏测量基准的问题,设计了光学表面来降低条纹密度增强干涉的方法,用对称的斜入射干涉仪测量渐开线圆柱形斜齿轮,搜索屏蔽优化的最佳相对位置,构建出齿面的立体图像,与 Gleason 方法的测量结果对比,测量

精度在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

4 基于机器视觉的立体齿轮测量技术对比及发展趋势

齿轮视觉测量中的三维误差测量是近10年来研究的主流,生产力的发展带动了更高水平的测量效率,对机器视觉齿轮测量精度进行更全面的数据挖掘和方法融合,能够完善齿轮精度理论,为提高齿轮制造加工质量提供保障,对提升齿轮测量效率具有重大意义。

国内外学者对齿轮的立体视觉测量做了众多的研究,为齿轮的测量精度和效率开拓了更大的进步空间。下文将从3个角度出发,展望机器视觉测量技术为齿轮行业创造的机遇和面临的挑战。

4.1 齿轮视觉测量技术的发展

在国内外的各项研究中,利用机器视觉对齿轮二维图像处理技术和立体重构测量技术方面均获得了良好的效果,已在众多小模数齿轮生产企业得到了应用,立体测量时精度高,处理速度快等证明了机器视觉在齿轮测量方面的应用潜力。当前,视觉齿轮测量技术正从二维图像测量向立体重构测量方向发展,处于向下一代测量技术过渡的阶段。

但由于齿轮复杂的结构和易反光特性,很难实现对齿轮全方位、多角度的立体重构和参数测量。在目前的研究中,也体现出了部分局限性,例如在对齿轮使用双目视觉进行点云拟合数据处理时,噪声是随机性的,只能使用算法减弱噪声的影响,不能完全消除噪声,从而限制了测量精度,这也是目前该领域研究最多的方向。赵慧洁等人^[49]分析了结构光的难题,将金属表面的反光与齿面投射光多次反光混叠,提出了并行单像素成像方法,以此进行精度评价分析并构建方程,虽然该方法面向反光表面的三维重构能力在平滑区域表现良好,但在边缘及阶跃等高梯度区域失效。未来的研究重点应是发展能够同时适应反光特性与复杂几何特征的鲁棒性三维重建方法。

在未来,齿轮的机器视觉测量技术必将纳入更多先进的科学技术,往复合化、微型化和智能化方向发展,以提升测量效率和精度。

4.2 齿轮视觉测量技术的优缺点及应用现状对比

在齿轮立体图像构建与测量方面,立体视觉测量技术得到了广大研究人员和学者的青睐,并且

齿轮立体图像重构也克服了传统二维平面可视化程度低、参数单一等缺点,可以作为对齿轮全过程测量的有效技术。表 1 总结了现有方法的优势、局限性和应用情况,旨在为后续研究提供参考。

表 1 齿轮立体图像测量技术的优势、局限性和应用现状

Table 1 Advantages, limitations and application status of gear stereo image measurement technology

测量技术	优势	局限	应用现状
双目视觉法	扩展性高、实时性高、可视化高、普适性高	精度一般、抗干扰性差	适用于精度一般、成本敏感的应用,适合大批量检测
结构光法	测量精度高、容错性好	抗干扰性一般、算力要求高、测量范围较小	适用于小型齿轮的精密测量和复杂表面的构建
激光三角干涉法	测量精度最高、准确度高、响应速度快	抗干扰性一般、测量范围较小、设备成本高	适用于高精度、高要求的齿轮测量

基于目前的研究现状,系统的硬件条件、光照环境和点云算法复杂度等仍是制约齿轮立体测量发展的重要因素。例如,在摄像机的标定阶段,受摄像机本身的噪声和光学畸变等影响,初始值的偏差会增加后续匹配过程的不稳定性。其次,在齿轮立体图像的特征提取阶段虽然能够完全提取图像特征,但是因为算法的侧重点不同,测量结果存在差异,导致其鲁棒性不稳定。最后,在齿轮立体图像重构时,去除噪声阶段和拟合数据阶段存在多个局部最优解,也会限制齿轮测量的精度。

4.3 齿轮视觉测量技术的多元融合

在齿轮立体图像构建与测量方面,使用双目视觉和结构光技术进行互相融合的方法得到齿轮立体数据,其本质是对机器视觉技术的扩展,而齿轮机器视觉测量技术是一门多领域交叉的学科,包括云平台的数据共享、齿轮的精度评价、齿轮的工艺误差等。

齿轮立体图像的传动误差测量也是机器视觉领域的一个重要研究方向。如 YU B 等人^[50]提出了在齿轮啮合状态下的齿轮传动误差点云模型;WANG Y Z 等人^[51]提出了利用点云数据确定齿轮径向复合偏差的虚拟测量方法,解决了同时获得齿形偏差和径向复合偏差的问题。

随着人工智能技术的成熟,结合“大数据”手段分析齿轮工艺问题,通过进行云平台实现数据共享和计算,可及时调整工艺参数,使测量的精度和速度得到提高。因此,结合其他方法的测量技术将会是齿轮视觉测量领域的必然趋势,但其实用化进程需要建立相应的云平台实现数据支持。

5 结束语

本文深入探讨了机器视觉技术在齿轮测量中的研究进展,从机器视觉的测量原理入手,分析了

国内外在二维平面和立体测量方面的相关研究成果。通过对比分析,机器视觉结合其他非接触测量技术,展示了在齿轮测量精度和效率提升方面的巨大潜力,不仅填补了在齿轮测量领域中的技术空白,还为工业制造中的齿轮精密测量提供了新的思路。机器视觉技术在二维平面的测量已经很成熟,结合立体测量技术的发展,将进一步推动工业生产中齿轮传动系统的可靠性和效率。

参考文献:

[1] 石照耀, 于渤, 宋辉旭, 等. 20 年来齿轮测量技术的发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1009-1024.
SHI Zhaoyao, YU Bo, SONG Huixu, et al. Development of gear measurement technology during last 20 years[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1009-1024.

[2] 虞梓豪, 刘瑾, 杨海马, 等. 多频光栅物体高精度廓形三维测量及重建研究[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 580-585.
YU Zihao, LIU Jin, YANG Haima, et al. Research on 3D measurement and reconstruction of high-precision profile of multi-frequency grating object[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(3): 580-585.

[3] 陈鹏, 刘慧婷, 张磊, 等. 高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 307-313.
CHEN Peng, LIU Huiting, ZHANG Lei, et al. High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 307-313.

[4] FUJIO H, KUBO A, SAITOH S, et al. Laser holographic measurement of tooth flank form of cylindrical involute gear[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(3): 721-729.

[5] 石照耀, 方一鸣, 王笑一. 齿轮视觉检测仪器与技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 74-86.
SHI Zhaoyao, FANG Yiming, WANG Xiaoyi. Research

- progress in gear machine vision inspection instrument and technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 74-86.
- [6] 包昊菁. 基于机器视觉的链轮径向跳动测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
BAO Haojing. Research on measurement technology of sprocket radial runout based on machine vision[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [7] 程瑶, 许文斌, 刘云阳. 基于角度交会的二维坐标图像测量系统[J]. *应用光学*, 2024, 45(2): 438-445.
CHENG Yao, XU Wenbin, LIU Yunyang. Two-dimensional coordinate image measurement system based on angle intersection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 438-445.
- [8] 段振云, 王宁, 赵文珍, 等. 基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 219-225.
DUAN Zhenyun, WANG Ning, ZHAO Wenzhen, et al. Sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 219-225.
- [9] 单紫薇. 基于机器视觉测量的齿轮图像边界提取算法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
SHAN Ziwei. Research of gear image boundary extraction algorithm based on machine vision measurement[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [10] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于机器视觉和局部图像分析的齿轮中心定位[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(3): 24-26.
ZHI Shan, ZHAO Wenzhen, ZHAO Wenhui, et al. Gear center location based on machine vision and local images analysis[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(3): 24-26.
- [11] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 齿距视觉测量的齿廓图像边缘失真修正算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(4): 50-57.
ZHI Shan, ZHAO Wenzhen, ZHAO Wenhui, et al. Algorithm of tooth profile image with pitch measurement for edge distortion correction[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(4): 50-57.
- [12] HE Y, ZHANG W, LI Y F, et al. An approach for surface roughness measurement of helical gears based on image segmentation of region of interest[J]. *Measurement*, 2021, 183: 109905.
- [13] CAJA J, GÓMEZ E, BARAJAS C, et al. Alternative method for the metrological characterization of spur gears in the sub-millimeter range using optical equipment[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1431(1): 169-180.
- [14] ALI M H, KUROKAWA S, UESUGI K, et al. Camera based 3D probe control in measuring gear profile[C]// 2013 Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing. New York: IEEE, 2013: 242-246.
- [15] ALI M H, KUROKAWA S, UESUGI K. Camera based precision measurement in improving measurement accuracy[J]. *Measurement*, 2014, 49: 138-147.
- [16] 王宁, 段振云, 赵文辉, 等. 齿轮齿廓总偏差视觉测量方法研究[J]. *机械传动*, 2017, 41(11): 28-32.
WANG Ning, DUAN Zhenyun, ZHAO Wenhui, et al. Research of the visual measurement method of gear tooth profile total deviation[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2017, 41(11): 28-32.
- [17] LUO M T, ZHONG S C. Non-contact measurement of small-module gears using optical coherence tomography[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2490.
- [18] 汤洁, 刘小兵, 李睿. 未知参数小模数齿轮齿距和齿廓偏差视觉测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 100-109.
TANG Jie, LIU Xiaobing, LI Rui. Vision measurement of pitch and profile deviations for small modulus gears with unknown parameters[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 100-109.
- [19] ALHADEFF L L, SLATTER T. A straightforward and low-cost pre-inspection measurement method for small gears[J]. *Manufacturing Letters*, 2020, 23: 23-28.
- [20] 左孝林. 基于机器视觉的小模数齿轮批量快速测量方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
ZUO Xiaolin. Research on the rapid measurement method of fine-pitch gear batch based on machine vision[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [21] YOUNES M A, KHALIL A M, DAMIR M N H. Automatic measurement of spur gear dimensions using laser light, part 2: measurement of flank profile[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44: 103603.
- [22] GADELMAWLA E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears[J]. *Measurement*, 2011, 44(9): 1669-1678.
- [23] 李冠楠. 直齿圆柱齿轮渐开线齿廓的结构光视觉测量技术[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LI Guannan. Spur gear profile measurement based on structured light system[D]. Changchun: Jilin University,

- 2014.
- [24] LIU R L, ZHONG D X, LYU H Q, et al. A bevel gear quality inspection system based on multi-camera vision technology[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1364.
- [25] 周佳艺, 石照耀, 南浩轩, 等. 面向生产现场的注塑齿轮快速分选检测系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 2017-2026.
- ZHOU Jiayi, SHI Zhaoyao, NAN Haoxuan, et al. Rapid sorting and inspecting system for plastic gears in production site[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 2017-2026.
- [26] YU B, LI Z G, SUN Y Q, et al. A method combining laser and vision detection for on-line measurement of small modules gears[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5): 055014.
- [27] URBAS U, ZORKO D, ČERNE B, et al. A method for enhanced polymer spur gear inspection based on 3D optical metrology[J]. *Measurement*, 2021, 169: 108584.
- [28] LI J H, ZHANG D H, LI Y Q, et al. A novel 3D, full-field optical method for measuring gears[J]. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023, 237(5): 1949-1960.
- [29] ZHANG D H, LI J H, LI Y Q, et al. A coaxial multi-ring detection method for measuring the pitch and thickness accuracy of cylindrical gears[J]. *Measurement and Control*, 2024, 57(6): 736-750.
- [30] 周子翔, 黄丹丹, 刘智. 一种基于三维形状上下文特征的点云配准算法[J]. *应用光学*, 2023, 44(2): 330-336.
- ZHOU Zixiang, HUANG Dandan, LIU Zhi. Point cloud registration algorithm based on 3D shape context features[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 330-336.
- [31] LU X X, ZHAO X, HU B, et al. A measurement solution of face gears with 3D optical scanning[J]. *Materials*, 2022, 15(17): 6069.
- [32] 王青云, 王训伟, 邱耀弘, 等. 金属注射成形微小齿轮光学全齿扫描测量技术研究[J]. *现代制造工程*, 2022(6): 90-96.
- WANG Qingyun, WANG Xunwei, QIU Yaohong, et al. Study on optical scanning method for entire teeth measurements of micro gears fabricated by metal injection molding[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(6): 90-96.
- [33] 宋力争, 林冬云, 彭侠夫, 等. 基于深度学习的 patch-match 双目三维重建[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 436-443.
- SONG Lizheng, LIN Dongyun, PENG Xiafu, et al. Patch-match binocular 3D reconstruction based on deep learning[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 436-443.
- [34] 杨洪涛, 陆广慧, 沈梅. 基于双目视觉的齿轮三维点云精确重构方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(10): 56-59.
- YANG Hongtao, LU Guanghui, SHEN Mei. Research on accurate reconstruction method of gear 3D point cloud based on binocular vision[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(10): 56-59.
- [35] 陆广慧. 基于视觉测量的齿轮几何特征测量系统与精度保证技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- LU Guanghui. Research on gear geometric feature measurement system and accuracy guarantee technology based on vision measurement[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [36] 石照耀, 王涛. 齿轮三维测量中线结构光测头位姿的优化方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7): 44-53.
- SHI Zhaoyao, WANG Tao. Optimization method of probe position and posture of linear structured light in three-dimensional gears measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 44-53.
- [37] 朱统晶, 周平, 刘欣冉, 等. 结构光三维测量系统标定的关键算法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(5): 848-852.
- ZHU Tongjing, ZHOU Ping, LIU Xinran, et al. Crucial algorithms for structural light 3D measurement system calibration[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 848-852.
- [38] MIAO J W, TAN Q C, WANG S, et al. A vision measurement method for the gear shaft radial runout with line structured light[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 5097-5104.
- [39] 洪天野. 基于点云处理的渐开线齿轮线结构光三维测量技术研究[D]. 温州: 温州大学, 2022.
- HONG Tianye. Research on line structured light 3D measurement of involute gear based on point cloud processing[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2022.
- [40] 余石鹏. 基于线结构光测量系统的齿轮测量误差与测量不确定度研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- YU Shipeng. Research on gear measurement error and measurement uncertainty based on linear structured light measurement system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [41] 余石鹏, 赵运才, 王得峰, 等. 基于线结构光的超精密齿轮齿距偏差测量分析[J]. *现代制造工程*, 2021(7): 103-108.

- YU Shipeng, ZHAO Yuncai, WANG Defeng, et al. Measurement and analysis of pitch deviation of ultra-precision gears based on line structured light[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(7): 103-108.
- [42] 赵运才, 王得峰, 余石鹏, 等. 基于新型复合齿轮线结构光的齿廓测量及其不确定度的评定[J]. *光学技术*, 2021, 47(1): 50-55.
- ZHAO Yuncai, WANG Defeng, YU Shipeng, et al. Tooth profile measurement and its uncertainty evaluation based on gear line structured light of new compound[J]. *Optical Technique*, 2021, 47(1): 50-55.
- [43] 赵逸超, 王珉, 焦明星. 基于自适应阈值的齿轮干涉图像前景区域提取方法[J]. *应用光学*, 2023, 44(2): 345-353.
- ZHAO Yichao, WANG Xian, JIAO Mingxing. Extraction method of gear interference image foreground region based on adaptive threshold[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 345-353.
- [44] FANG S P, WANG L J, KOMORI M, et al. Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank[J]. *Optik*, 2011, 122(14): 1301-1304.
- [45] ZHOU C L, XU Z P, CAI C M, et al. A high precision collaborative vision measurement of gear chamfering profile[C]//2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). Zhengzhou: Atlantis, 2015: 715-720.
- [46] TIAN H, WU F, GONG Y J. Gear tooth profile reconstruction via geometrically compensated laser triangulation measurements[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1589.
- [47] ZHU X D, WANG Z H, YANG P C, et al. Analysis and optimization of shielding in measuring helical gear tooth flank by laser interferometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(10): 105006.
- [48] ZHU X D, CHEN Z Q, YANG P C, et al. Design optical surface as the measurement datum in measuring gear tooth flank by symmetrical laser interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110034.
- [49] 赵慧洁, 李宇曦, 姜宏志, 等. 复杂光照条件下的高精度三维成像技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 278-289.
- ZHAO Huijie, LI Yuxi, JIANG Hongzhi, et al. High-precision 3D-imaging technology under complex illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 278-289.
- [50] YU B, KOU H L, SHI Z Y, et al. A virtual measurement method of the transmission error based on point clouds of the gear[J]. *Measurement Science Review*, 2022, 22: 92-99.
- [51] WANG Y Z, WANG G, FAN Y Z, et al. A virtual measurement method for evaluating the gear radial composite deviation based on point cloud data[J]. *Results in Engineering*, 2024, 22: 102380.