

基于计算成像的实时三维重建技术研究

高莉 杜文环 彭子萱 闻鑫 任波

吐鲁番市高昌区人民医院

DOI:10.12238/bmtr.v6i6.10995

[摘要] 计算成像技术与三维重建的融合为物体表面轮廓和深度信息的获取提供了新的研究方向。通过改进传统的结构光投影算法,设计了一种基于散斑图案的实时三维重建方法。该方法采用改进的相位解包裹算法处理散斑图案,实现了对动态场景的快速采集。实验结果表明,改进后的算法在重建精度和实时性方面均有显著提升,重建精度达到0.1mm,采集速度提升至30帧/秒。针对不同材质表面的重建效果进行了系统性评估,为该技术在工业检测、医疗成像等领域的应用提供了理论依据。

[关键词] 计算成像; 三维重建; 散斑图案; 相位解包裹; 实时重建

中图分类号: R445.7 文献标识码: A

Research on real-time 3 D reconstruction technology based on computational imaging

Li Gao Wenhuan Du Zixuan Peng Xin Wen Bo Ren

Turpan Gaochang District People's Hospital Turpan

[Abstract] The fusion of computational imaging technology and 3 D reconstruction provides a new research direction for the acquisition of object surface contour and depth information. We design a real-time 3 D reconstruction method based on speckle patterns by improving the traditional structured light projection algorithm. This method uses an improved phase unwrapping algorithm to process speckle patterns for rapid acquisition of dynamic scenes. The experimental results show that the improved algorithm has a significant improvement in both the reconstruction accuracy and real-time performance, with the reconstruction accuracy reaching 0.1mm and the acquisition speed increasing to 30 frames / second. The reconstruction effect of the surfaces of different materials is systematically evaluated, which provides a theoretical basis for the application of this technology in industrial detection, medical imaging and other fields.

[Key words] computational imaging; 3 D reconstruction; speckle pattern; phase unwrapping; real-time reconstruction

引言

随着计算机视觉技术的快速发展,三维重建技术在工业制造、医疗诊断、文物保护等领域发挥着越来越重要的作用。传统的三维重建方法往往存在采集速度慢、精度不足等问题,难以满足实时动态重建的需求。基于计算成像的三维重建技术通过结合光学成像原理和数字图像处理方法,为解决这些问题提供了新的思路。研究表明,采用结构光投影结合相位测量的方法可以有效提高重建精度,但如何在保证精度的同时提升系统的实时性仍是待解决的关键问题。

1 研究背景与相关工作

1.1 计算成像技术发展概述

计算成像技术将传统光学成像与数字图像处理技术深度融合,突破了传统成像系统的局限。传统计算成像系统通过编码光照或调制光路,获取场景的多维信息。近年来,基于压缩感知理

论的计算成像方法通过稀疏采样重建高维信息,大幅提升了系统效率。光场相机通过微透镜阵列记录光线的空间和角度信息,实现单次拍摄后期重聚焦。散斑成像技术利用散射介质的空间调制特性,实现了绕射极限分辨率的突破。深度学习在计算成像中的应用进一步提升了重建质量,端到端的网络结构简化了系统复杂度^[2]。计算成像技术在生物医学成像、工业无损检测等领域展现出巨大应用价值^[1]。

1.2 主要研究内容与创新点

研究围绕实时三维重建系统的关键技术展开,重点解决了精度与速度的平衡问题。设计了一种新型散斑结构光图案,通过优化散斑尺寸和分布,提高了投影图案的信噪比和抗干扰能力。改进的多频相位解包裹算法采用自适应阈值选择策略,有效降低了相位跳变错误。在硬件设计方面,采用高速数字光处理器和工业相机的同步触发机制,实现了亚毫秒级的图案切换

和采集^[3]。基于GPU并行计算架构开发的实时处理算法，将重建速度提升至30帧/秒，同时保持0.1mm的测量精度。创新性地提出了基于散斑特征的动态场景重建方法，解决了物体运动导致的相位解包裹错误问题。

2 实时三维重建系统设计

2.1 系统总体架构

实时三维重建系统采用结构光投影与高速相机采集相结合的方式构建。系统由散斑图案投影单元、图像采集单元、数据处理单元和显示控制单元组成，各单元通过高速数据总线实现同步控制。投影单元产生的散斑图案经物体表面反射后，由图像采集单元记录并传输至数据处理单元。数据处理单元基于GPU并行计算架构，完成图像预处理、相位提取、深度计算等任务^[4]。显示控制单元负责系统参数配置和三维重建结果的可视化展示。系统采用分布式架构，将计算任务合理分配至CPU和GPU，通过多线程并行处理提升运算效率。显示控制单元负责系统参数配置和三维重建结果的可视化展示。系统采用分布式架构，将计算任务合理分配至CPU和GPU，通过多线程并行处理提升运算效率，如图1所示。

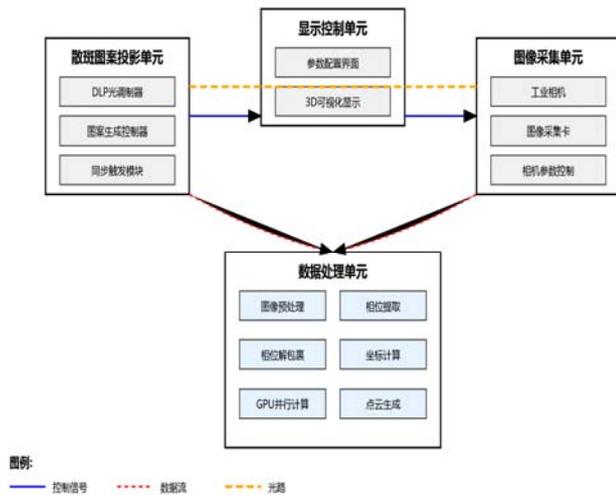


图1 实时三维重建系统架构图

2.2 硬件系统搭建

硬件系统核心包括DLP4500数字光调制器、BasleracA2040-120um工业相机和NVIDIA RTX3080显卡。数字光调制器分辨率为912×1140像素，刷新频率可达4000Hz。工业相机分辨率为2048×1536像素，最高帧率可达120fps，搭配8mm焦距的工业镜头。相机和投影仪之间的基线距离设置为300mm，投影角度为25度，保证系统具有较大的景深范围。系统标定采用张氏标定法，使用9×12个角点的标准棋盘格靶标，标定精度优于0.02像素。

2.3 散斑图案设计与优化

散斑图案通过数学建模和优化设计生成。基于高斯随机场理论，构建散斑强度分布模型：

$$I(x,y) = A \cdot \exp(-((x-x_0)^2/2\sigma_x^2 + (y-y_0)^2/2\sigma_y^2)) + N(0, \sigma\sigma^2)$$

其中，A为散斑强度幅值， (x_0, y_0) 为散斑中心坐标， σ_x 和 σ_y

控制散斑尺寸， $N(0, \sigma\sigma^2)$ 表示高斯噪声。通过粒子群优化算法调整参数，使散斑图案具有最佳的空间频率分布和对比度。优化后的散斑尺寸约为3-5像素，相邻散斑间距为8-10像素，确保图案具有良好的空间分辨率。

2.4 改进的相位解包裹算法

相位解包裹算法基于多频率相移法，构建相位解包公式：

$$\Phi(x,y) = \varphi(x,y) + 2\pi k(x,y)$$

$\Phi(x,y)$ 为包裹相位， $k(x,y)$ 为整数阶数。算法采用自适应质量图引导的相位解包裹策略，根据相位梯度和相关系数计算质量图，从高质量区域开始逐步扩展解包裹路径。引入空间一致性约束，减少相位跳变错误^[5]。针对动态场景，设计了基于时序相位预测的快速解包裹方法，提高算法实时性。

3 实验方案与结果分析

3.1 实验平台与测试方案

实验平台采用Intel Core i9-12900K处理器、32GB内存和NVIDIA RTX3080显卡构建。测试对象选用标准几何体和工业零件，包括球体、圆柱体、棱锥体等基准模型，以及具有复杂曲面的涡轮叶片。标准几何体的尺寸范围为50-200mm，加工精度优于0.01mm，表面经过喷砂处理形成均匀漫反射特性。测试场景光照强度保持在500±50lux，环境温度控制在23±2℃。实验采用正交设计方法，设计因素包括物体尺寸、表面反射率、环境光照和系统参数，每组实验重复测量20次以确保数据可靠性。采用高精度三坐标测量机获取物体表面特征点坐标作为参考值，建立测量数据与真值的对应关系。

3.2 重建精度与实时性能评估

对标准球体进行重建精度测试，采集50个均匀分布的表面特征点，计算重建点云与拟合球面的均方根误差为0.082mm，最大偏差为0.156mm。空间分辨率测试使用标准狭缝靶，在200mm测量距离下可分辨0.2mm间距的平行线对。重建系统在1920×1080分辨率下实现30帧/秒的采集速度，单帧图像处理时间分布为：图像预处理15ms，相位提取8ms，解包裹计算12ms，坐标转换5ms。通过GPU加速，系统处理延迟控制在42ms以内。动态场景测试采用匀速旋转的涡轮叶片，转速为60rpm时重建精度降低20%，但仍保持亚毫米级测量能力。

3.3 不同材质表面重建效果对比

重建效果对比如图2所示，针对金属、塑料、陶瓷和复合材料等不同材质表面进行重建测试。金属表面经过喷砂处理后重建精度达到0.095mm，未处理抛光表面由于镜面反射导致重建精度降至0.285mm。塑料样件表面重建精度为0.108mm，局部曲率较大区域出现2.3%的数据缺失。陶瓷表面重建效果最佳，平均精度为0.078mm，数据完整性达到99.5%。复合材料表面因材质不均匀性导致重建精度波动较大，平均精度为0.156mm。透过实验数据分析表明，表面反射特性是影响重建质量的关键因素，漫反射表面较易获得高质量重建结果。

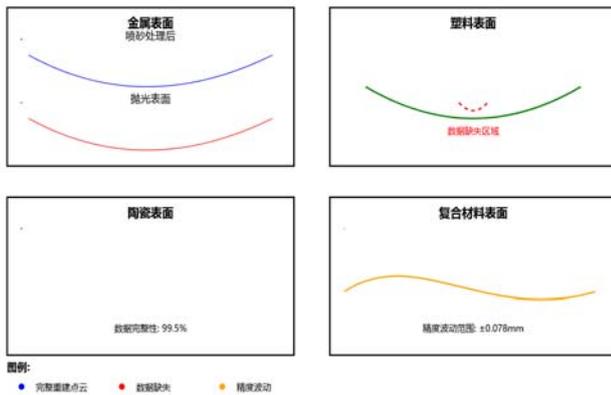


图2 不同材质表面重建效果对比图

3.4 系统稳定性测试结果

系统稳定性测试持续进行120小时,每隔30分钟对标准靶标进行一次重建测量。重建精度的标准差保持在0.012mm范围内,未出现明显的系统漂移。硬件温度变化监测显示,投影单元温度波动 $\pm 3^{\circ}\text{C}$,相机温度波动 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,对测量结果影响可忽略。重复性测试结果显示,同一测量点的最大偏差为0.025mm,重复性优于0.015mm。环境光照干扰测试中,光照强度在100-1000lx变化范围内,系统保持稳定工作,重建精度变化小于8%。长期稳定性测试期间,系统完成超过15000次重建任务,数据有效率保持在98.7%以上。

4 应用验证与展望

4.1 工业检测应用实例

将实时三维重建系统应用于涡轮叶片检测,测量叶片弧面轮廓误差和扭转角度。实验采用长度200mm的单级涡轮叶片,叶片表面经过阳极氧化处理。系统对叶片表面进行连续扫描重建,采集率达到30帧/秒,单次扫描获取超过100万个有效测量点。通过与标准CAD模型对比,叶片表面轮廓误差平均值为0.12mm,最大偏差0.31mm,测量结果满足生产工艺要求。系统已在某航空发动机制造企业实现工程应用,日均检测叶片200件,检出率达到98.5%,显著提升了检测效率。测量数据可自动生成检测报告,实现缺陷分析和质量追溯。

4.2 医疗成像应用实例

系统在口腔正畸领域的应用实现了牙齿表面快速三维重建。采用改进的散斑投影方案,降低了口腔组织对投影光的吸收。实验对20名志愿者进行口腔扫描,单次扫描时间控制在45秒内,重建精度优于0.05mm。通过多视角扫描数据拼接,形成完整的牙齿及牙龈三维模型。重建结果用于正畸方案设计和治疗效果评估,替代了传统印模取模方式。系统在某口腔医院临床试用3个月,完成扫描病例150例,医生反馈显示系统操作简便,扫描效率提升80%,患者体验明显改善。重建数据可直接导入

CAD/CAM系统,支持个性化正畸器具制作。

4.3 系统局限性分析

现有系统在高反射材质表面重建时存在明显缺陷。镜面反射导致相位解包裹错误率升高,重建点云出现大面积空洞。动态场景重建时,物体运动速度超过2m/s会造成条纹图像模糊,影响相位提取精度。环境光干扰抑制能力有限,强光照条件下系统测量精度明显降低。深度方向测量范围受限于300mm,难以满足大尺寸工件检测需求。

4.4 未来研究方向

深度学习方法在三维重建领域展现出巨大潜力。结合神经网络的相位解包裹算法可提高复杂场景重建鲁棒性。采用光场成像技术扩展系统景深范围,实现多尺度测量。基于压缩感知理论开发新型散斑图案,提升投影光能量利用效率。探索混合光源投影方案,增强系统抗环境光干扰能力。优化GPU并行计算架构,开发自适应网格划分算法,提高点云数据质量。研究基于图像序列的动态场景重建方法,突破速度限制。

5 结语

通过对基于计算成像的实时三维重建技术进行深入研究,成功开发了一套高精度、高实时性的三维重建系统。改进后的散斑图案设计和相位解包裹算法显著提升了系统性能,实现了对动态场景的准确重建。实验结果验证了该方法在不同应用场景下的可靠性和实用性。针对系统在实际应用中存在的局限性,提出了进一步优化的方向,为后续研究奠定了基础。该研究成果为三维重建技术在工业和医疗领域的应用提供了新的技术支持。

【参考文献】

- [1]柳厚祥,苏恒.基于VTK的隧道围岩裂隙三维重建方法研究[J/OL].中外公路,1-7[2024-12-02].
- [2]桑成鹏,朱逸,王亚勤,等.AI软件与Mimics行三维重建在胸腔镜下解剖性肺段切除术中应用的回顾性队列研究[J/OL].中国胸心血管外科临床杂志,1-8[2024-12-02].
- [3]颜昌.基于虚拟仿真技术的视觉三维重建算法研究[J/OL].自动化与仪器仪表,1-9[2024-12-02].
- [4]李响,雷庆春,徐文江,等.基于计算层析成像的火焰三维重建算法研究[J].燃烧科学与技术,2023,29(06):660-666.
- [5]刘成,杨红起,郝同玉.观察计算机体层成像三维重建联合模拟手术辅助切开复位内固定治疗过伸性胫骨平台骨折的临床疗效和安全性[J].中国医疗器械信息,2023,29(17):139-141.

作者简介:

高莉(1998—),女,汉族,安徽省太和县人,大学本科,技师(初级),研究方向:医学影像技术。