

doi: 10.7690/bgzdh.2022.03.012

双轮廓仪金属增材制造工件表面 3 维重建技术

李俊宏¹, 张萍¹, 高椿明¹, 刘婷婷², 张凯², 张长东²

(1. 电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 611731; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为解决金属增材制造的零件易出现变形的问题, 开展基于双轮廓仪的变形检测技术研究。以激光三角测量法为测量核心方法, 通过点云数据拼接处理, 完成了工件表面形貌的 3 维重建。实验验证结果表明: 该系统能达到的测量分辨率为 2 μm , 可为金属增材制造加工过程的变形检测技术提供一种新的检测手段。

关键词: 增材制造; 变形检测; 轮廓仪; 3D 图像拼接

中图分类号: TP15 **文献标志码:** A

3D Surface Reconstruction Technology of Metal Additive Manufacturing Workpiece with Double Profile Meter

Li Junhong¹, Zhang Ping¹, Gao Chunming¹, Liu Tingting², Zhang Kai², Zhang Changdong²

(1. School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the deformation problem of metal additive manufacturing parts, the deformation detection technology based on double profil meter is studied. With laser triangulation method as the core measurement method, the 3D reconstruction of workpiece surface topography is completed by point cloud data splicing processing. The experimental results show that the measurement resolution of the system is 2 μm , which can provide a new detection method for the deformation detection technology of metal additive manufacturing process.

Keywords: additive manufacturing; deformation detection; profil meter; 3D image stitching

0 引言

金属增材制造依据模型文件进行逐层叠加来实现零件加工。相对于传统的制造手段, 金属增材制造具有消耗材料少、可实现复杂零件制造等优点, 并逐步应用于航空航天、国防、医疗、汽车制造等领域^[1]。金属增材制造过程中, 成形质量受多个因素影响, 包括环境因素和加工过程参数设置等^[2]。其工件主要有 3 类缺陷: 一是内部孔隙、裂纹和裂缝内部缺陷^[3]; 二是表面裂纹、表面孔隙这类表面缺陷^[4]; 三是由于应力集中导致的零件尺寸变形^[5]。其中形变缺陷的检测非常重要。

变形检测目的是分析成形的尺寸和设计模型尺寸偏差^[6], 用于评价成形质量。对成形件的测量一般采用三坐标测量的方式。2001 年, H.Haitjema 研发了新型三坐标测量机, 并将其投入工业界进行使用^[7]。2010 年, G.Budzik 利用三坐标测量发现飞机发动叶片在加工时, 垂直摆放时的形变最小, 加工质量最好^[8]。2016 年, Li C 等发现使用岛屿扫描策略进行加工时, 零件变形量最小^[9]。之前的变形检

测都是加工完成后进行, 近年加工过程中的变形检测也逐步开始。2018 年, M.Biegler 在研究加工过程中薄壁件的变形情况时, 发现变形主要是横向变窄和纵向变形的特点^[10]。2020 年, Du L 等设计了结合 3 维扫描和重建功能的质量检测系统, 使用扫描仪为金属增材制造零件提供 3D 模型, 最后同模型值进行对比, 比传统方法有更好的检测效果^[11]。2021 年, N.Kladovasilakis 等也通过激光扫描仪对金属 3D 打印的发动机叶轮进行了逆向工程, 并通过模型值进行计算得到了对应的偏差, 实现检测和修复工作^[12]。

笔者使用双轮廓仪进行 3 维数据拼接, 完成对 3D 打印过程的层间监测, 从而提供一种对加工过程的质量监控技术。

1 3D 扫描成像原理与拼接方法

1.1 3D 成像原理

激光三角测量法^[13]是一种经典的非接触式的距离测量法, 原理简单, 应用广泛。激光三角测量法是激光通过透镜照射到物体表面, 通过 CCD 传

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103002)

作者简介: 李俊宏(1995—), 男, 四川人, 硕士, 讲师, 从事 3 维重建、金属 3D 打印研究。E-mail: 760717845@qq.com。

传感器接收从物体表面反射过来的光，结合参考平面，测量出物体的高度信息，如图 1 所示。

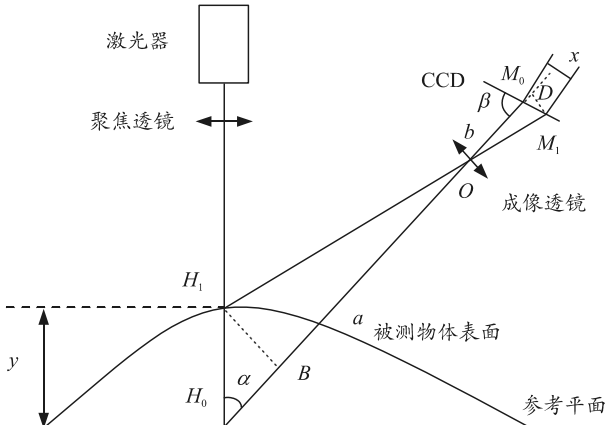


图 1 激光三角法测量原理

根据相似三角形和正弦定理可以推出物体高度，如式(1)所示。

$$y = ax \sin \beta / (b \sin \alpha + x \sin(\alpha + \beta)) \quad (1)$$

其中： y 为物体的高度信息； x 为 CCD 中的 2 个像点之间的像距； a 、 b 分别为成像物距和像距； α 、 β 为入射光与参考平面夹角以及反射光和 CCD 夹角。

根据式(1)，可将 CCD 上面的 x 值转换为测量高度值 y 值，从而实现了物体表面高度的测量。该方法是轮廓仪的核心测量方法。

1.2 3D 数据拼接方法

为提高扫描精度和对 3 维外形的准确性，通常使用成一定夹角的双轮廓仪进行扫描。2 套数据的拼接成为了提高最终 3D 成像精度的保障。

线激光轮廓仪不仅测量范围有限，而且扫描精度与表面形貌相关；因此，为了提高检测精度常使用双轮廓仪进行互补和校正，点云数据的拼接算法直接影响检测精度。拼接最具代表性的就是最近邻点迭代算法^[14]。点云数据可看成是一个矩阵，将其变换到另外一个坐标系：

$$Q = RP + T \quad (2)$$

其中： P 为变换前的点云； Q 为变换后的点云； R 为旋转矩阵； T 为平移矩阵；需求解旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。当 2 个点云数据的距离达到最小时，就是拼接完成时，使得式(3)中的目标函数达到最小即可。

$$E = \sum_{i=1}^n \|q_i - Rp_i - T\|^2 \quad (3)$$

笔者采用中间重叠部分数据计算参数，然后将参数运用全局，最终完成拼接运算。

1.3 3 维曲面重建方法

本文中算法首先使用绕 y 轴旋转的旋转矩阵进行一个初始变换来进行旋转处理。再使用统计滤波来对离群点进行剔除，通过邻域部分计算出均值和标准差，设置倍数系数，倍数系数乘以标准差加上均值为一个标准范围，若平均距离在标准范围之外时，认为此点为离群点并剔除。再通过 1.2 节中设计的局部拼接方法进行拼接处理，如图 2 所示。为能更直观地看出物体表面形貌，需要曲面重建，3 维重建核心算法主要使用 Delaunay 三角剖分^[15]来进行重建处理。

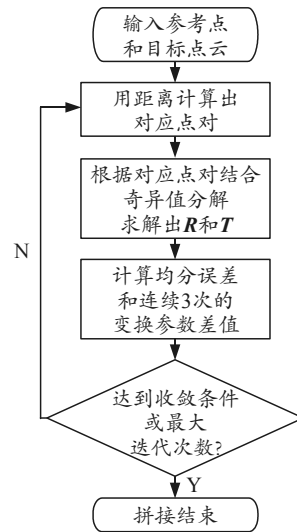


图 2 拼接算法流程

双轮廓仪的优势如图 3 所示，1 号轮廓仪在 C 面成像不良，2 号轮廓仪在 A 面成像不良，但是将其一起拼接后，可得到完成数据。在处理前，为保证不受样品数据的影响，会先进行直通滤波。

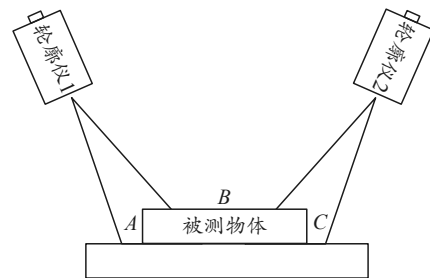


图 3 双轮廓仪测量

2 实验与分析

2.1 实验系统

实验系统框图如图 4 所示，2 个轮廓仪固定安装在移动机构上 (ox 方向)，沿着 oy 方向移动，实现对 xoy 平面的扫描，轮廓仪将数据送入计算机中处理，经过拼接和平滑后，在显示端 3D 显示。

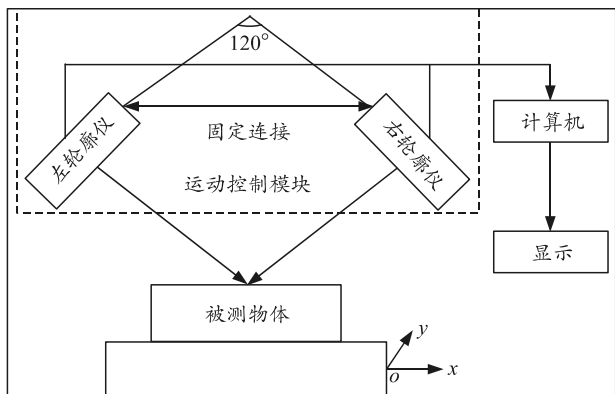


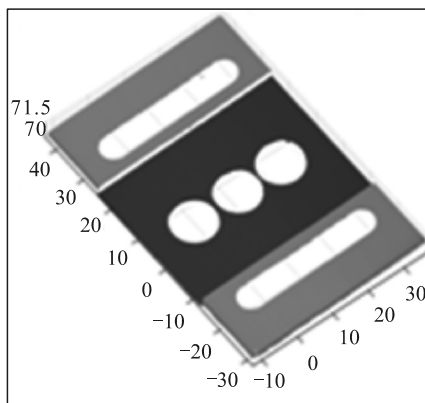
图 4 实验系统

2.2 测试流程

为测试算法的有效性，开展了如图 5 所示的光具接板的验证扫描测试。



(a) 实物



(b) 拼接结果

图 5 拼接结果

通过配准后的结果分析可知，由于 ICP 算法是代入全部点进行计算，为更好地将此算法用于此系统，笔者采用局部区域来进行拼接，可减少计算量和得到更好的效果。

为提高重建的效率，先使用体素法^[16]对拼接后的数据进行精简处理，精简后的点云个数为 1 202 357，精简率为 43.21%。重建结果如图 6 所示，表明该方法可有效实现曲面重建。

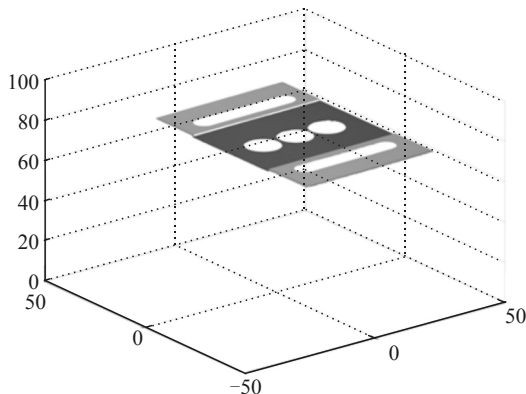


图 6 3 维重建

2.3 测试结果分析

为验证系统的测量误差，使用标准测试件来进行校验实验。测试件有 0.2、0.5、2 和 5 mm 4 个高度，采用轮廓仪对不同阶梯差的样件进行多次测量。

通过表 1 中数据分析可知，通过对测试件的不同高度差进行测量，整个系统测量高度误差的波动范围在 -0.002~0.001 8 mm。

表 1 测试件高度差的数据测量结果

高度差/mm	测量 1	测量 2	测量 3	误差/ μm
5.0	5.001 0	4.999 1	4.998 3	1.7
2.0	2.001 3	2.001 7	2.001 8	1.8
0.5	0.500 5	0.501 1	0.501 1	1.1
0.2	0.198 6	0.198 0	0.198 8	2.0

使用 0 级量块搭建出高度差更大的物体进行测量，测量数据如表 2 所示。

表 2 0 级量块高度差的数据测量结果

高度值/mm	测量值	误差/ μm
3.0	3.000 5	0.5
10.0	10.001 6	1.6
19.5	19.498 5	1.5

根据表 1 和 2 分析测量数据的误差，当高度差小于 5 mm 时，数据误差值均小于 2 μm 。该技术使用范围内，常见高差均小于 2 mm。根据多次的测量值和误差结果，可知测试系统的分辨率可达 2 μm 以内。

3 结束语

笔者开展了基于双轮廓仪的 3D 表面重构技术分析，完成了相应的点云拼接方法和算法。通过建立实验测试系统，对测试样品进行了测试实验，完成了 3D 表面重构技术的验证，经分析得出 z 轴上 2 μm 的测量分辨率，为 3D 打印层间检测的应用奠定了基础。

参考文献：

[1] ROCHUS P, PLESSERIA J Y, ELSEM M V, et al. New

applications of rapid prototyping and rapid manufacturing (RP/RM) technologies for space instrumentation[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 61(1): 352-359.

[2] MARCO, GRASSO, VITTORIO, et al. In-Process Monitoring of Selective Laser Melting: Spatial Detection of Defects Via Image Data Analysis[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, 139(5): 1-16.

[3] GONG H J, RAFI K, GU H F, et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. *Additive Manufacturing*, 2014(1-4): 87-98.

[4] M F ZÄH, LUTZMANN S. Modelling and simulation of electron beam melting[J]. *Production Engineering*, 2010, 4(1): 15-23.

[5] THUIS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(9): 3303-3312.

[6] CAO J, GHARGHOURI M A, NASH P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 409-419.

[7] HAITJEMA H, PRIL W O, SCHELLEKENS P H J. Development of a Silicon-based Nanoprobe System for 3-D Measurements[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 365-368.

[8] BUDZIK G. Geometric accuracy of aircraft engine blade models constructed by means of the generative rapid prototyping methods FDM and SLA[J]. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 2010, 34(1): 32-43.

[9] LI C, FU C H, GUO Y B, et al. A multiscale modeling approach for fast predication of part distortion in selective laser melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 703-712.

[10] BIEGLER M, GRAF B, RETHMEIER M. In-situ distortions in LMD additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20: 101-110.

[11] DU L, LAI Y, LUO C, et al. E-quality Control in Dental Metal Additive Manufacturing Inspection Using 3D Scanning and 3D Measurement[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 1038.

[12] KLADOVASILAKIS N, KONTODINA T, CHARALAMPOUS P, et al. A case study on 3D scanning, digital reparation and rapid metal additive manufacturing of a centrifugal impeller[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1037(1): 012018(6pp).

[13] EIGLE H, 侯尔志. 激光非接触测量表面轮廓[J]. *国外计量*, 1989(3): 7-9.

[14] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.

[15] YANG H B. Industrial Design Applications of Surface Reconstruction Algorithm Based on Three Dimensional Point Cloud Data[C]. *International Conference on Robots&Intelligent System*. IEEE Computer Society, Huai'an, 2017: 178-181.

[16] POMERLEAU F, COLAS F, SIEGWART R, et al. Comparing ICP variants on real-world data sets[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 34(3): 133-148.

(上接第 58 页)

4 结束语

笔者设计电路全部采用低功耗集成电路组成，不仅体积小、功耗低，而且具有极低的虚警率，实现全方位宽区域警戒。电路在 3~5 V 电压电源下能可靠工作，工作电流小于 1 mA。试验结果证明：对履带装甲目标车辆的预警距离可达到 350 m，对轮式装甲目标车辆的预警距离可达到 250 m；同时具有极低的低虚警，24 h 昼夜的虚警次数小于 6 次。

由于电路采用硬件电路实现，电路可进行模块化集成，大大提高工作可靠性，可推广应用到各种智能弹药和智能水雷的警戒系统设计中。

参考文献：

[1] 王杰雷, 秦栋译, 裴水源, 等. 基于 STM32 的地震动信号检测识别系统设计[J]. *研究与开发*, 2017, 36(7):

48-51.

[2] 蒋毅成, 程翔, 张河. 智能雷弹药低功耗预警系统设计[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(3): 164-166.

[3] 谢仕强. 基于地震动传感器的人员车辆探测系统[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[4] 何光林, 陶斯倩, 范红波. 基于噪声特征的地震动信号目标预警和识别算法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(1): 24-27.

[5] 夏明主, 刘奇. 基于噪声激励及响应和模态分析的风洞引射器结构优化设计[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(10): 66-70.

[6] 赵建抒, 史慧芳, 关胤. 爆炸逻辑网络自动精密挤注装药工艺装备技术[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(2): 82-85.

[7] 石义官, 李全俊, 刘锡朋, 等. 射孔弹自动装药装配生产线[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(4): 94-96.

[8] 蓝肖颖. 破片冲击起爆屏蔽装药的临界判据[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(10): 80-83.