

面结构光在三维测量中的应用技术研究

刘新宇

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

[摘要] 结构光测量技术具有非接触、精度高、速度快、应用广等优点,是三维测量领域中重点发展的方向之一。对比3种不同形式的结构光,采用基于三角法原理的面结构光对待测物体进行三维测量,数据采集得到待测物体单幅点云,通过标志点自动拼接技术及基于ICP原理的拼接技术完成单幅点云数据的粗拼接和精拼接,将拼接后点云数据与理论模型对齐并创建彩图,得到待测物体误差彩图,直观反映待测零件实际状态。利用不同设备对同一零件进行测量,验证了结果的正确性以及测量的高效性,测量因素分析可以有效提高测量效率,减少噪点对测量结果的影响。

关键词: 三维轮廓测量;面结构光;激光三角法;点云拼接技术;误差分析

Research on Application of Surface Structured Light in 3D Measurement

LIU Xinyu

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The non-contact, high accuracy, fast speed and wide application are advantages of the structured light measurement technology. It is one of the most important directions in the field of 3D measurement. The paper compares three different forms of structured light. Three-dimensional measurement of the object is carried out based on the principle of triangulation. The single point cloud of the measured object is obtained by data acquisition. The rough and fine stitching of single point cloud data is accomplished by automatic stitching of marker points and stitching technology based on ICP principle. By aligning the stitched point cloud data with the theoretical model and creating the color map, we can get the error color map of the measured object. The actual state of the measured object is intuitively reflected. By using different equipment to measure the same part, the correctness of the results and the efficiency of measurement are verified. The measurement factor analysis can effectively improve measurement efficiency and reduce the influence of noise on measurement results.

Keywords: Three-dimensional topography measurement; Surface structured light; Laser triangulation; Point clouds registration; Error analysis

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.083

随着我国制造技术的发展,三维测量技术在航空航天、汽车、船舶等领域有着越来越广泛的应用。三维测量技术是通过特定的方式获得待测物体三维形貌信息的一种测量方法^[1]。三维测量技术分为接触式测量技术和非接触式测量技术两大类。接触式测量设备以三坐标测量机为代表,它是一种集机械、电子等技术于一体的测量设备,其特点是测量精度高,但测量效率相对较低,对环境要求高,且测针与待测物体易发生干涉。非接触测量技术是以光学为基础发展而成,其特点是对待测零件无损伤,测量速度快,目前非接触测量设备主要有关节臂测量机、激光跟踪仪、自动断层扫描设备、以

结构光技术为基础的3D扫描仪等。关节臂测量范围是以臂长为半径的球空间,测量大型零件时转站操作会造成精度损失。激光跟踪仪在测量复杂零件时,由于扫描头T-Scan必须与跟踪仪保持激光连接,故有测量死角存在。基于图像分析方法的自动断层扫描仪是将三维测量转化为二维测量,通过对采集到的图像进行物像坐标转化,得到待测零件不同截面的二维轮廓数据,利用蒙皮法拟合为待测零件的三维数据,其缺点是在测量过程中,需要对零件进行逐层铣削拍照,对待测零件有破坏性。以结构光技术为基础的3D测量设备光路简单,是目前三维轮廓测量领域的研究重点。通过在待测物

体上粘贴公共点,可以实现零件不同姿态下测量数据的自动拟合,既保证了测量精度,又提高了测量效率,具有非接触、高分辨率、快速数据采集、应用范围广等优点,是在实际研究和生产实践中最有前景的三维轮廓测量方法。本文重点将对结构光及相关设备的应用进行介绍。

1 结构光技术

结构光技术^[2-3]是一种非接触全场三角法测量技术。基本原理是通过激光器将各种形式的光栅条纹图案投射到待测物体表面上,待测物体表面上变形的光栅条纹图案由相机拍摄获取,通过计算光栅条纹图案中像素点灰度值的变化,解析出待测物体表面的空间位置坐标,从而获得待测物体表面的点云数据。其优点是能够快速采集待测物体表面信息,获得点云数据,且精度较高。结构光主要分为3种形式:点结构光、线结构光和面结构光。

点结构光是将光束投射到待测物体表面并形成的一个光斑,如图1所示。点结构光源由具备高亮度以及良好方向性特点的激光器组成。点结构光法在测量待测物体表面时只有一个光斑,信噪比高,若完成待测物体整体外形轮廓测量,必须配合二维机械扫描系统来协助完成,测量效率低,其测量精度一般大于0.2mm。

线结构光是将片状光束投射到待测物体表面上并与物体表面形成明亮交叉线,如图2所示。对于线结构光,通常只需要使用一维机械扫描系统即可完成整个待测物体三维形貌的测量,较点结构光测量设备效率大大提高,测量精度可以达到0.1mm。

面结构光是将二维图形投射到待测物体表面,并在物体表面上形成调制图案,如图3所示。最常见的面结构光是几何光栅投影,其类型包括:条纹光栅、正交光栅以及交叉线等,其特点是测量效率高,精度可以达到0.01mm。

2 激光三角法测量原理

当通过结构光法测量待测物体三维形貌时,在激光器、待测物体和 CCD 相机之间形成三角形,其输入输出关系可以利用三角形相似原理进行解析,该方法称为激光三角法^[4-5]。

图4为激光三角法测量原理,激光器将结构光投射到待测物体表面A点,入射光的部分漫反射光AA'通过透镜成像于CCD相机像平面M上,A为待测物体表面上的点,O为入射光与参考平面的交点,O'、A'分别为O、A的像点,α为入射光与反射光OO'的夹角,β为反射光OO'与CCD相机像平面M的夹角,u为透镜的物距

(OP),v为透镜的相距(O'P),y为像点A'与O'之间的像位移(O'A'),H为待测物体表面上点相对于参考平面的高度,分别过A、A'向OO'做垂线交于B、F,由三角形ABP与三角形A'FP相似可得,

$$\frac{AB}{A'F} = \frac{BP}{FP} \tag{1}$$

即,

$$\frac{H \sin \alpha}{y \sin \beta} = \frac{u - H \cos \alpha}{v + y \cos \beta} \tag{2}$$

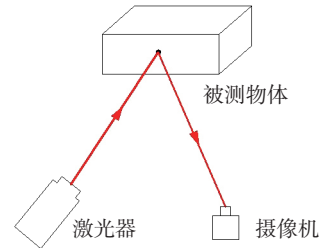


图1 点结构光模式

Fig.1 Point structured light mode

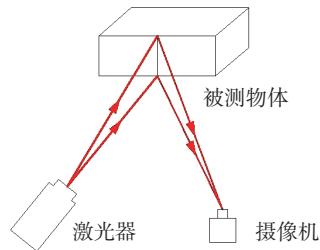


图2 线结构光模式

Fig.2 Line structured light mode

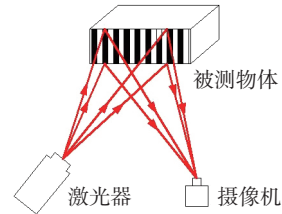


图3 面结构光模式

Fig.3 Surface structured light mode

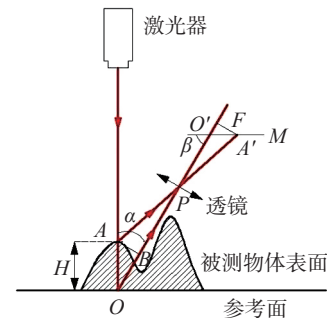


图4 激光三角法测量原理

Fig.4 Principle of laser triangulation

可得待测物体表面高度 H 为

$$H = \frac{u \sin \beta}{v \sin \alpha + y \sin(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

式中, u 、 v 可以通过相机校准得到, α 、 β 为光栅条纹图案编码及解码求解获得, 从而得到点测物体表面高度信息。

3 三维零件测量

本文采用德国 AICON-Breuckmann SmartS CAN 型激光扫描仪对某零件进行三维扫描测量, 该扫描仪由 1 个投影单元、2 个高分辨率 CCD 相机以及含有图片采集及数据分析软件的计算机组成, 采用 600mm 镜头, 最快可在 1s 内完成图像采集。

3.1 三维零件数据采集

为了保证测量数据的完整性与准确性, 在使用扫描仪开始测量之前, 需要对扫描仪进行精度标定, 标定结果对测量数据的准确性及后期数据的处理有很大关系。扫描仪采用平面棋盘^[6]法进行标定, 首先固定摄像机不动, 棋盘放置在 9 个不同位置拍摄 9 副图案, 其中第 1 个位置要求在参考平面上, 标定结果如图 5 所示。

在测量过程中, 首先将一定数量(最少 3 个)的 $\Phi 6\text{mm}$ 圆形纸质标志点随机粘贴在待测物体表面上, 标志点位置不要在同一直线上, 将待测物体放置于工作台上, 并将其保持在均匀的照明背景下, 调整好扫描仪位置及角度, 使 CCD 相机的景深中心位置正好处于待测物体上, 由于待测零件不能在一个姿态完成所有特征的采集, 故需要在不同姿态下采集点云, 待测零件每旋转 45° 采集一次单幅点云数据, 共采集 8 副点云数据, 使其包含待测零件的所有特征, 若 8 副点云数据不能包含待测零件所有特征, 调整待测零件不同状态, 使零件所有特征包含在点云数据中。小型零件可以直接放置在固定工作台上, 对于大型或重型零件, 将其放在具有旋转功能的工作台上, 方便调整零件的不同姿态, 提高扫描效率。CCD 相机采集到的结果条纹信息不仅包括目标对象的三维特征信息, 各种非目标对象的干扰信息也同样被 CCD 相机采集到, 例如将零件放置的工作台面, 测量结果会含有一定的工作台点云信息。因此, 在实际测量过程中, 需要根据待测零件大小合理选择镜头尺寸, 并保证待测零件与放置零件的工作台面有一定的色差, 在扫描时通过调整曝光度可以减少各种干扰信息的采集, 从而可以快速得到待测物体的三维形貌特征。图 6 所示为得到待测物体部分点云数据。通过特征标志点自动拼接技术^[7-8], 将不同坐标系下获取的三维点云数据自动转换到同一坐标系下, 得到待测物体整体点云数据。其基本原理是扫描仪扫描得到物体表面两个不同

部位的公共区域的点云数据分别为点云 1 和点云 2, 图 6 所示为拼接前点云数据, 点云数据 1 中的标志点集为 S , 点云 2 中的标志点集为 T , $P = \{p_i | p_i \in P, i = 1, 2, \dots, n\}$ 和 $Q = \{q_i | q_i \in Q, i = 1, 2, \dots, n\}$ 分别为标志点集 S 和 T 中由待测零件上相同标志点构成的标志点子集, $n \geq 3$, (p_i, q_i) 为匹配标志点对, r 如果匹配点 p_i 到标志点集 S 中每个点的距离与 q_i 到标志点集 T 中每个点的距离差为最小, 点云 1 和点云 2 完成标志点自动匹配。由于人工粘贴标志点的随机性和噪声的影响, 标志点自动匹配后得到的初始匹配标志点中经常存在误匹配标志点, 通过删除误匹配的标志点对, 最小化标志点重合误差, 实现点云数据的粗拼接。对于单幅点云采集到的标志点数量不足 3 个无法完成点云自动拼接的情况, 需采用根据待测零件不同特征手动对齐点云与标志点自动对齐相结合的方式来完成所有点云数据的粗拼接。

为最小化不同视场中获得的点云数据之间拼接误差, 在粗拼接的基础上需要进行精拼接来完成待测物体表面的点云处理。最广泛使用的精确拼接方法是基于 ICP (Iterative Closest Point) 原理^[9-10]的方法, 通过定义一个误差函数来反映点云重叠区域的吻合程度。假设两次扫描的点云数据分别为 A 点集和 B 点集, 固定 A 点集不动, 在 B 点集中寻找需要与 A 点集匹配的最近点, 建立两点坐标变换的目标函数, 当此目标函数取最小值时, 认为 B 点集转换到 A 点集所在的坐标系下, 点云精拼接完成, 如图 7 所示, 在所有单幅点云迭代 12 次后, 精拼接完成, 精拼接后的 RMS 值可以由软件给出, RMS 为 0.015mm。通过诸如去噪声的操作得到待测物

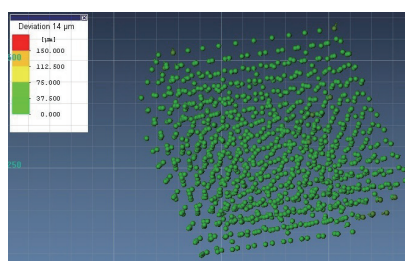
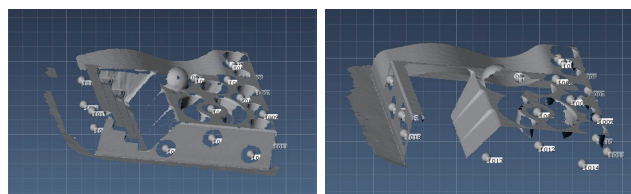


图5 扫描仪精度标定结果

Fig.5 Scanner accuracy calibration results



(a) 点云 1

(b) 点云 2

图6 拼接前点云数据

Fig.6 Point cloud data before splicing

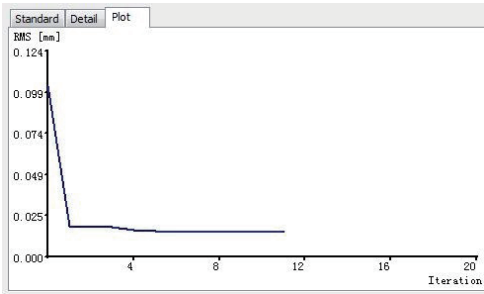


图7 精拼接RMS值变化

Fig.7 RMS variation curve of fine splicing

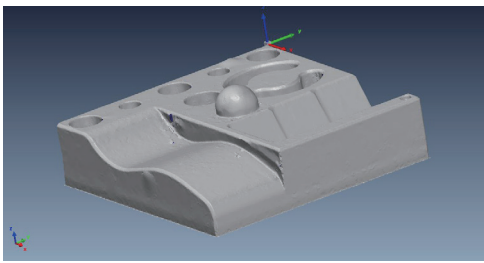


图8 拼接后零件点云数据

Fig.8 Point cloud data after splicing

体三维点云数据,如图8所示。

3.2 数据处理

将待测物体的理论数字化模型与精拼接后的点云数据导入到 PolyWorks 软件,根据图纸上基准要求,完成点云数据与数字化模型的高质量对齐。通过创建彩图命令来完成点云与数字化模型的三维轮廓偏差比较,并创建注释点,彩图比较可以直观反映待测物体整体偏差情况,由此判断是整体畸变还是个别部位突变,对于待测零件的整体评估起到了关键作用,如图9所示。

3.3 应用案例

以飞机某工装为测量对象,其外形尺寸为 $1\text{m} \times 0.8\text{m}$,如图10所示,分别利用扫描仪、关节臂测量机、激光跟踪仪 T-Scan 及三坐标测量机对其型面轮廓进行测量,其测量基准及测量项目完全相同,测量时间包括编程时间及后续处理时间,型面轮廓测量结果、测量时间如表1所示。通过对比发现,不同测量设备得到的型面轮廓偏差测量值保持一致,但在测量时间上,扫描仪测量效率明显更高。

4 测量影响因素

结构光法测量零件三维特征的主要影响因素有环境因素、待测零件光洁度、测量设备等因素。

环境因素是影响测量精度的重要因素,在黑暗的环境中,结构光的成像条纹清晰明亮,但在明亮或者照明强度不均匀的环境中,由于环境光源对结构光的影响,其成像条纹与背景条纹一致,不易区分,试验表明,

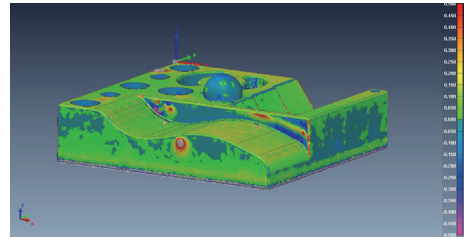


图9 零件彩图

Fig.9 Color map of part

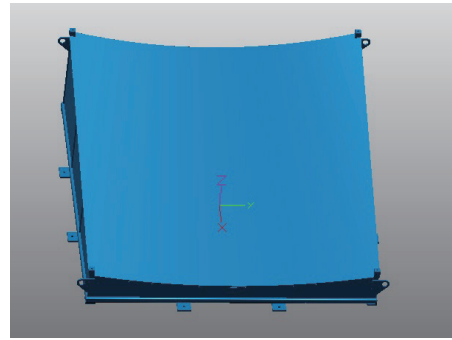


图10 测量实例

Fig.10 Example of measurement

表1 不同测量设备比较

Table 1 Comparison of different measuring equipment

测量设备	扫描仪	关节臂	激光跟踪仪	三坐标测量机
轮廓偏差/mm	0.081~0.127	0.073~0.112	0.087~0.122	0.085~0.132
测量时间/h	0.32	0.53	0.41	0.65

在明亮或照明强度不均匀的环境中,测量误差要增大 0.08mm 以上,甚至出现不能采集数据情况。因此要求测量过程中保持待测物体环境照明强度均匀。

结构光照射在待测物体表面上,如果被待测物体表面发生镜面反射,CCD 相机接收到反射条纹信息不能很好反映出待测物体表面的三维形貌特征。因此,在实际测量过程中,对于表面特别光滑的零件,通常在零件表面涂一层化学反射层,可以避免发生镜面反射,增加散射程度,提高影像质量。

此外,投影光强不稳定、CCD 相机的非线性以及饱和度和系统因素也对测量结果有一定的影响。

5 结论

本文介绍了结构光的分类及结构光法测量的原理—激光三角法,利用扫描仪对待测零件进行三维测量,通过点云粗拼接、精拼接、去噪声等操作得到零件的三维点云数据,将点云数据与数字化模型对齐并创建彩图,得到点云数据与数字化模型的 3D 比较彩图,直观反映待测零件的加工状态,并对某飞机工装利用不同设备进行测量,验证了结果的正确性以及测量的高效性,

测量因素分析可以有效提高测量效率,减少噪点对测量结果的影响,以结构光技术为基础的测量设备是未来零件非接触三维测量发展方向之一。

参考文献

[1] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

LI Zhongwei. Three dimensional measurement technology and system research based on structured light of digital grating projection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[2] BLSIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. Proceedings of SP IEEE and IS and Telectronic Imaging, 2003, 5013(1): 228-240.

[3] 王亚元. 基于数字摄影的光学三维测量技术 [J]. 工具技术, 2005, 39(12): 62-63.

WANG Yayuan. Optical 3D measurement technology based on digital photography[J]. Tool Engineering, 2005, 39(12): 62-63.

[4] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌 [J]. 厦门大学学报 (自然版), 2014, 43(1): 50-53.

LU Jinren, HUANG Yuanqing. Laser triangulation method for surface measurement[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2014, 43(1): 50-53.

[5] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 24(S3): 601-604.

WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the Laser Triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 24(S3): 601-604.

[6] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[7] 吕乃光, 孙鹏, 姜小平, 等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究 [J]. 北京信息科技大学学报, 2010, 25(1): 1-5.

LÜ Naiguang, SUN Peng, LOU Xiaoping, et al. Key techniques for 3-D structured light photogrammetry[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2010, 25(1): 1-5.

[8] 罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44(8): 1104-1106.

LUO Xianbo, ZhongYuexian, LI Renju. Data registration in 3D scanning system[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(8): 1104-1106.

[9] BESL P J, MCKAY N D. A Method for registration of 3D shape[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[10] CHEN Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.

通讯作者: 刘新宇, 硕士, 工程师, 研究方向为几何量检测, E-mail: lxy_rainman@163.com.

(责编 大漠)

(上接第 82 页)

Editorial Board of Aircraft Engine Design Manual. Aircraft engine design manual (Volume 10) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[2] 史振. 燃气涡轮叶片复合冷却结构参数化设计与数值研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

SHI Zhen. Parametric design and numerical research of gas turbine cooling structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[3] 杨炯, 席平, 胡毕富, 等. 适应弯扭肋的涡轮叶片多种种流肋造型方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 775-781.

YANG Jiong, XI Ping, HU Bifu, et al. Multi-type ribs of turbine blade modeling method fitting bowed-twist wall[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(6): 775-781.

[4] 张宝源, 席平, 杨炯. 复合弯扭涡轮叶片尾缝的快速建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 48-53.

ZHANG Baoyuan, XI Ping, YANG Jiong. Rapid modeling of trailing edge slots in bowed-twisted turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 48-53.

[5] 李吉星, 席平. 涡轮叶片导管快速建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1149-1155.

LI Jixing, XI Ping. Rapid modeling of impingement pipe in turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(6): 1149-1155.

[6] PÉREZ-ARRIBAS F, TREJO-VARGAS I. Computer-aided design of horizontal axis turbine blades[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 252-260.

[7] 席平, 朱谦, 张宝源. 涡轮叶片冷气通道转接段的特征分析及建模 [J]. 图学学报, 2012, 33(4): 37-41.

XI Ping, ZHU Qian, ZHANG Baoyuan. Feature analysis and modeling of cooling passages transition section in turbine blade[J]. Journal of Graphics, 2012, 33(4): 37-41.

[8] 夏禹. 涡轮叶片造型 CAD 系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

XIA Yu. The research on turbine blade CAD modeling system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.

[9] 徐波, 李建军, 张祥林, 等. 基于关联设计的弯曲级进模结构 CAD 方法研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12(3): 83-87.

XU Bo, LI Jianjun, ZHANG Xianglin, et al. Research on the CAD method of bending die structures in progressive dies based on associated design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(3): 83-87.

[10] 邱立业. 基于 NX 的级进模设计变更管理 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

QIU Liye. Progressive die design change management based on NX[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

通讯作者: 赵晓慈, 博士, 实验师, 硕士研究生导师, 主要研究方向为数字化设计与虚拟仿真技术, E-mail: skyzh@buaa.edu.cn.

(责编 大漠)