

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0129-05

三坐标激光非接触外形尺寸快速测量系统 与误差控制方法

张爱武¹ 胡少兴² 冯绪勇² 逢永涛¹

(¹ 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)
² 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要 传统的接触式测量满足不了批量生产的快速响应,典型的结构光法和基于近景摄影测量的非接触测量方法,在三坐标测量与三坐标解算过程中人工参与多,且应用限制条件多。利用 1D 激光位移传感器、伺服坐标控制器和运动减震补偿设备,研制了一种三坐标非接触外形尺寸测量系统,能够实现快速三维成像,自动获取工件表面密集三维点云。激光位移传感器安装在 z 轴上,并与 xoy 平面垂直。通过严格的系统检校和滤波,控制与补偿测量误差,快速自动全面检测工件质量。实验结果表明,系统单点测量精度优于 $10\ \mu\text{m}$,平均测量精度优于 $20\ \mu\text{m}$,可满足工件检测的使用要求。

关键词 测量;非接触测量;激光扫描;误差控制;三坐标

中图分类号 TB92 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0129

3D Coordinate Laser Non-Contact Measuring System and Error Control Methods

Zhang Aiwu¹ Hu Shaoxing² Feng Xuyong² Pang Yongtao¹

¹ Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

² School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract Machining mass products need a rapid measuring system, but the traditional contact measuring methods do not meet the demands of mass production. Meanwhile, some non-contact measuring methods, for example, structured light methods and photogrammetry-based systems, they usually require intense manual intervention during operating. A 3D coordinate laser non-contact measuring system using 1D laser sensor and a servo control coordinate system was proposed to fast collect dense 3D points of the objects. The laser sensor is installed on the z -axis perpendicular to the xoy scanning platform. The errors are removed by designing filters and calibrating the entire system. The measuring results show that the measuring errors of single point are less than $10\ \mu\text{m}$ and the measuring errors of the whole surface are less than $20\ \mu\text{m}$.

Key words measurement; non-contact measurement; laser scanning; error control; 3D coordinate

1 引言

近年来,随着数字制造技术的快速发展,对测量技术提出了新的要求:深入生产过程、现场测量。尤其在航空、航天、电子、汽车、造船、通信、核工业、水利水电和武器装备等行业生产都对外形尺寸测量提

出了现场快速测量的明确要求。因此,研究外形尺寸现场快速测量有重要的现实意义。

外形尺寸测量主要包括角度、距离、直线度和空间位置量的测量,其中最主要的是外形轮廓密集点连续的三坐标测量,其他待测量均可由外形轮廓密

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC40601081)、北京市科技新星(2006B57)和北京市优秀人才项目资助课题。

作者简介: 张爱武(1972—),女,教授,博士,主要从事空间信息获取、处理与应用和计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail: zhangaw163@163.com

集点三坐标测量计算间接得到。随着激光扫描和 CCD 技术的飞速发展,非接触三维测量以其速度快、无磨损等优点备受青睐,是一种极具发展潜力的三维测量技术^[1~3]。不过典型的包括结构光法和基于近景摄影测量的非接触测量方法虽然在测量速度上明显好于接触测量,但是通常精度低,应用上有各种限制条件^[4]。

本文依据通用三坐标系统设计原理,研制了一套三坐标非接触激光扫描外形尺寸现场快速自动测量系统^[5],通过严格的系统检校和滤波,控制与补偿测量误差,快速自动全面检测工件质量,取得了良好的测量效果。

2 系统组成

系统由平面扫描机构,1D 激光位移传感器及对准装置,控制系统三部分组成。其中平面扫描机构是系统的主要组成部分。其作用是安放被测部件和激光位移传感器及对准装置,在控制系统指令下按预定的测量路径,对被测部件实现自动的扫描测量,给出被测部件各点的三维坐标值。

平面扫描机构由可编程逻辑器件(PLC)、交流伺服驱动器、伺服电机、限位传感器、传动机构、开关电源及 PC 机等几部分组成。其量程可达到 350 线 \times 350 线。工作时,上位机通过串口向 PLC 下达控制指令,PLC 与交流伺服驱动器相连,而交流伺服驱动器又与三个伺服电机相连。伺服电机内部的转子是永磁铁,驱动器控制的 U, V, W 三相电形成电磁场,转子在此磁场的作用下转动,同时伺服电机自带的编码器反馈信号给驱动器,驱动器根据反馈值与目标值进行比较,调整转子转动的角度;转子的转动带动滚珠丝杠的转动,进而实现平面扫描单元在 x 轴上的平移及 y 轴上激光头的滑动,实现平面二维扫描;与此同时,激光头实时得到点的纵向深度值,与 PLC 的反馈平面坐标一起实现物体的三维信息获取。在这个过程中,伺服电机的精度决定于编码器的精度(线数);限位传感器可反馈信号给 PLC,保证运动单元不与导轨末端发生撞击; x 轴平行导轨的两电机各自的驱动器连接 PLC 相同的输出口,从而保证运动件刚体两端位置的同步。

平面扫描机构采用 PLC 作为控制器,通过专用的编程工具,即可在上位机进行 PLC 的相关通信参数设置,包括端口、波特率、数据长度及奇偶校验等,编辑底层的梯形图语言,并下载到 PLC 中。PLC 具有可靠性高、编程简单、通用性好、功能强大、体积

小且功耗低的特点。另外,与步进电机相比,系统采用了交流伺服电机及全数字的交流伺服驱动器,实现了位置和速度的半闭环控制,解决了步进电机丢步以及低速时步进的问题。交流伺服电机和全数字交流伺服驱动器抗负载波动能力强,运行平稳,发热和噪音明显降低,从而提高了整个系统的性能。经实验验证,系统平均测量精度优于 $20 \mu\text{m}$,单点测量精度优于 $10 \mu\text{m}$ 。图 1 为样机照片。

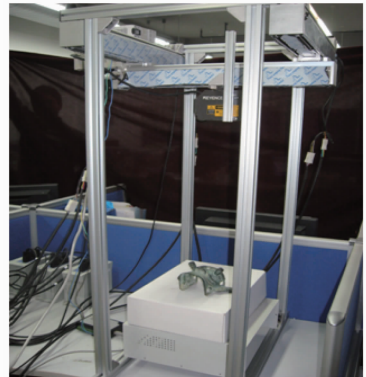


图 1 三维坐标非接触外形尺寸快速测量系统

Fig. 1 3D coordinate laser non-contact measuring system

3 平面扫描机构控制软件

软件的设计体现了三坐标测量原理。采用 y 轴线扫描与 x 轴步进结合的平面扫描策略,即当 y 轴线扫描结束时, x 方向上步进一个长度。为提高扫描效率,避免空行程,整个扫描采用“弓”字形思路,

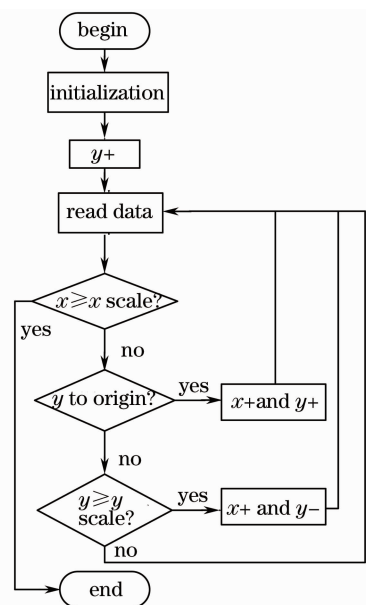


图 2 平面扫描机构控制软件流程图

Fig. 2 Flow diagram of the control software of 2D scanning table

通过实时检测 y 轴的位置,来确定线扫描是否到达左极限或右极限,进而决定 x 轴是否步进。根据系统硬件部分的结构与底层参数设置,并遵循 PLC 厂家的通信协议,在 Microsoft Visual C++ 6.0 平台上开发了三坐标平面扫描机构控制软件。其软件流程图如图 2 所示。

4 数据质量分析

系统三维数据来自平面扫描机构沿 x 轴和 y 轴的平面扫描的编码器,以及 z 方向的激光位移传感器的测量值。 x, y 和 z 方向测量精度取决于平面扫描机构和激光位移传感器。

1D 激光位移传感器实际上是激光器与 CCD 的组合,由三角形法测量点的位置,测量数据必然会包含噪声。而测量数据另一部分误差主要来自于平面扫描机构的机械误差。这两种误差是测量数据的主要误差来源。

4.1 去除激光测量数据噪声

利用 1D 激光位移传感器获取的测量数据不可避免包含由于响应速度、测量物体表面条件和环境干扰而产生的噪声。本文采用中值滤波器去除振荡造成的噪声,中值滤波器表示如下

$$g(x) = \text{median}[f(x-k)], k \in \omega,$$

式中 ω 是滤波器的窗口。

4.2 机械误差

4.2.1 平面扫描机构误差

平面扫描机构的安装精度与平稳性直接影响测

量的数据质量。系统采用高精度导轨在控制系统的指令下平稳、准确地移动。采用限位传感器,保证运动单元不与导轨末端发生撞击。设计了平衡减震装置,保证运动平稳、无冲击、无振动和自锁可靠。

4.2.2 激光头对准装置误差

激光位移传感器是一维单点式激光非接触测量头,测量过程中始终对准被测部件,且保证与扫描平面垂直,否则会带来机械误差。系统采用对准装置安装激光头。

4.3 机械误差控制措施

尽管在系统设计与加工以及安装过程中考虑了各种措施控制误差的产生,但是测量数据仍然会包含因机械问题而产生的误差,必须继续采取有效措施,将误差控制在最小范围。

4.3.1 系统标定

系统机械误差主要来源于机构误差与激光测量头非垂直误差。系统安装完毕后,需要通过标定的方法进一步确定部件的相对位置,利用标定后的数据修正测量结果。

系统标定前后数据对比如图 3 所示。从图中可以看出,系统标定前测量数据明显出现分层现象,这主要是系统机械误差所致。误差有规律性,正向扫描数据分布一致,负向扫描数据分布也一致,只是正向与负向扫描之间数据出现了明显分层。这种规律性误差是因平面扫描机构正负双向运动存在误差造成的。通过系统严格检校标定后,规律性误差完全消除。

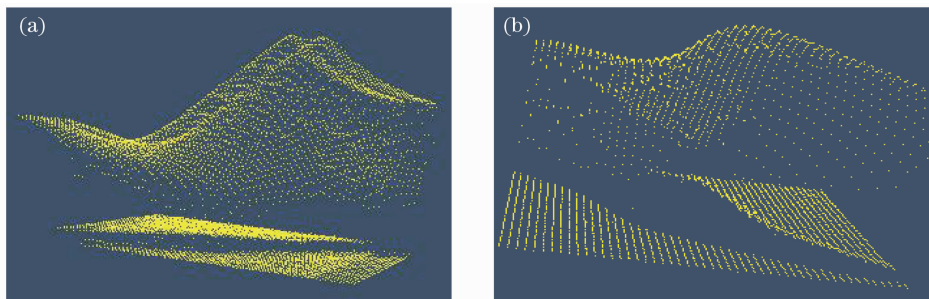


图 3 系统标定前后数据对比。(a)系统标定前获取的数据;(b)系统标定后获取的数据

Fig. 3 Data contrast between before and after calibration. (a) data before calibration; (b) data after calibration

4.3.2 异常数据处理

异常数据是任何数据获取系统普遍存在的问题,需要进一步处理,最大限速获取高质量高可靠的测量数据。本文采用 3δ 法则去除粗差数据,采用数据平滑的手段克服随机误差。

5 应用实例

实验 1:系统采用 10 Hz 的采样频率对三星堆出土文物进行测量,精确记录了文物复杂外形,测量数据无跳动。点云如图 4 所示。

实验 2:本系统采用 100 Hz 采样频率对叶轮进行扫描,获取外轮廓的三维点云。实验表明本系统

可以测量叶轮等复杂形状,测量点云如图 5 所示。

实验 3:采用 100 Hz 采样频率对鼠标进行扫

描,获取外轮廓的三维点云。实验表明本系统数据间隔均匀,数据无跳动,测量点云如图 6 所示。

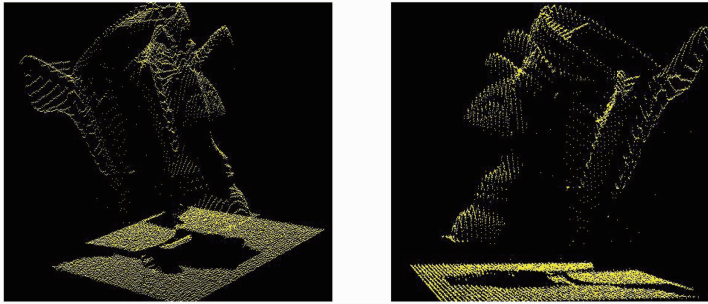


图 4 三星堆遗址文物扫描测量三维点云

Fig. 4 3D point cloud of the cultural relic from Sanxingdui

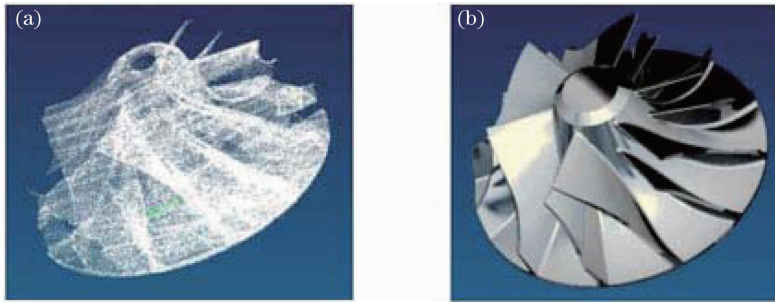


图 5 叶轮激光扫描测量三维点云(a)与重构的三维模型(b)

Fig. 5 3D point cloud (a) and 3D model of the impeller (b)

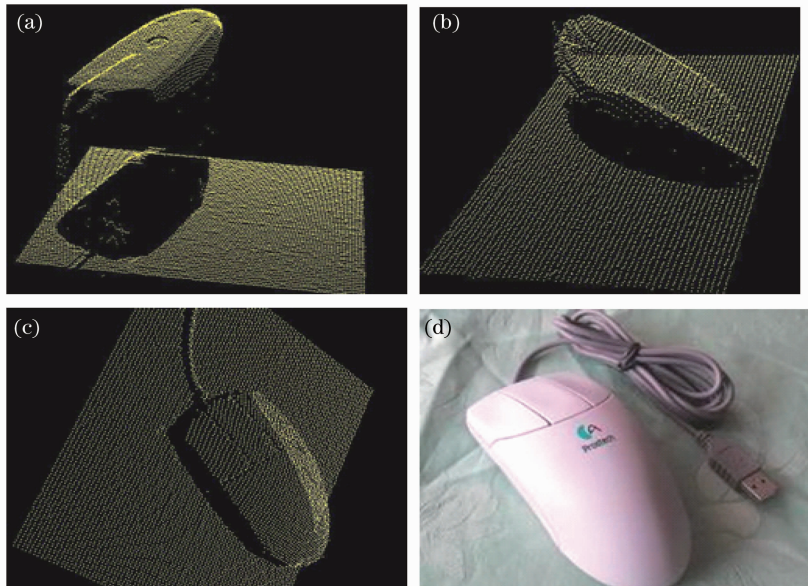


图 6 鼠标扫描测量结果。(a)~(c)不同方向三维点云;(b)实物照片

Fig. 6 Scanning data of mouse. (a)~(c) 3D point cloud from different direction;(b)photo of the mouse

实验 1~3 利用了不同的采集频率,对不同复杂程度的物体外形进行测量。系统能快速获取物体表面密集的三维点云,光滑表面上的数据点无跳动,数据点是光滑连续过渡的,证明数据点是均匀分布的。

6 结 论

开发了一种三坐标非接触外形尺寸快速测量系统,给出了误差控制措施和异常数据处理方法,保证系统测量精度。此种三坐标非接触测量系统的设计

与误差控制方法在三坐标系统开发上具有重要意义。实验结果表明系统单点测量精度优于 $10\ \mu\text{m}$ ，平均测量精度优于 $20\ \mu\text{m}$ ，系统保证了工件面上测量精度，可全面系统评价工件质量，测量精度符合一定领域使用要求。

参 考 文 献

- 1 Luo Xiangjie, Duan Chungang, Hu Shuangqi *et al.*. Study on safety and precision control of a certain military 3-coordinate laser non-contact measuring system[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(3): 18~20
罗相杰, 段纯刚, 胡双启等. 某军用三坐标激光非接触测量系统的安全性及精度控制方法研究[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(3): 18~20
- 2 Shi Chengying, Lin Hui, Jiang Qinbo *et al.*. The calibration method of geometrical parameters for the laser non-contact 3D-coordinate measuring system[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 73~75
石成英, 林辉, 姜勤波等. 激光非接触式三坐标测量系统的几何参数标定方法[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(1): 73~75
- 3 Zhang Aiwu. Research on the 3-D measurement system of sheet metal parts based on computer vision [D]. Changchun: Jilin University, 2002
张爱武. 基于计算机视觉的板材成形件三维测量系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2002
- 4 Pang Yongtao. Design and development of three-dimensional laser measurement system for free surfaces[D]. Beijing: Capital Normal University, 2008
逄永涛. 自由曲面三维激光测量系统设计与开发[D]. 北京: 首都师范大学, 2008
- 5 Shiuh Jer Huang, Chi Chan Lin. A three-dimensional non-contact measurement system[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1997, **13**: 419~425