

# 三维激光扫描测量技术

毛方儒 王 磊

(中国航天科技集团公司五院 514 所, 北京 100080)

**摘 要** 介绍了三维激光扫描测量系统的技术构成、测量原理, 并简要地介绍了法国 MENSi 三维激光测量系统的技术特点; 三维激光扫描测量技术在航空、航天工程中所具有的极其重要的应用价值。

**关键词** 三维激光扫描 测量系统 CCD 技术

## Measurement Technology of 3D Laser Scanning

MAO Fang-ru WANG Lei

(China Aerospace Science Company No. 514 institute, Beijing 100080)

**Abstract** The structure and principle of 3D laser scanning system, and the feature of the MENSi laser scanner are introduced. The measurement technology of 3D laser scanning is very useful in aerospace engineering.

**Key words** 3D laser scanning Measuring system CCD technology

## 1 引 言

在现代制造业中, 正向设计仅占 40%, 逆向设计占 60%, 逆向技术是为正向技术服务的。

三维激光扫描技术, 是从复杂实体或实景中重建目标的全景三维数据及模型, 主要是获取目标的线、面、体、空间等三维实测数据并进行高精度的三维逆向建模, 它区别于传统的单点定位测量及点线测绘技术。

三维激光扫描技术集光、机、电等各种技术于一

身, 它是从传统测绘计量技术并经过精密的传感工艺整合及多种现代高科技手段集成而发展起来的, 是对多种传统测绘技术的概括及一体化。

例如法国 MENSi 技术产生于 1987 年, 最初应用在金属结构及管线工程方面, 随着应用的不断深入及技术不断提高, 逐渐被广泛的应用于核电站、文物、考古、建筑业、航天、航空、船舶、制造、军工、军事、石化、医学、水利、能源、电力、交通、机械、影视、教学、科研、汽车、公安等。应用内容涉及到目标的建模、复制、仿制、仿研、仿真、修复、翻新、结构分析、

改造、维护、建档及用于任务的模拟、训练、仿真、虚拟现实、推演、试验、检测、变形分析、CAD、CAM、CMMS、有限元应力分析、流体动力分析、其他逆向工程 etc 等用途。

本文旨在对三维激光扫描技术的原理、构成及技术特点做一个介绍。

## 2 技术构成

三维激光扫描技术的核心是激光发射器、激光反射镜、激光自适应聚焦控制单元、CCD 技术、光机电自动传感装置(包括:激光水平 46° 步进传感、同轴纵向 320° 步进自旋转、目标遥控捕捉及取景)等,参见图 1。

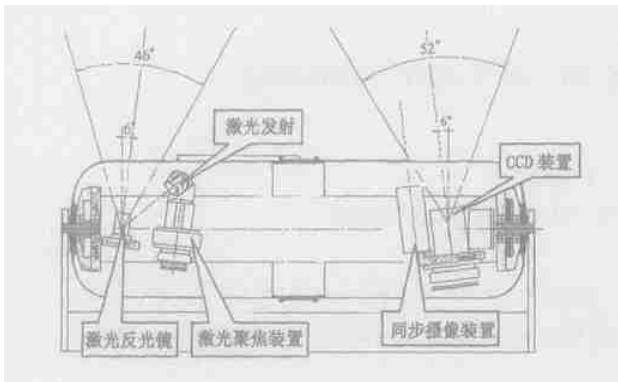


图 1

从系统组成来看,它包括三维激光扫描仪、便携三脚架、线缆、便携电脑及控制装置、定标球及标尺、测控软件、信息后处理软件等,参见图 2。



图 2

## 3 原理

三维激光扫描技术是基于测绘技术发展起来的,但测绘方法不同于传统测绘技术,传统测绘技术是单点定位的高精度测量目标,它是对指定目标中的某一点位进行精确而确定的三维坐标数据测量,进而得到一个单独的或一些离散的点坐标数据,这类技术有如三坐标测量仪、经纬仪、全站仪、激光跟踪仪等,而三维激光扫描仪则是对确定目标的整体或局部进行完整的三维坐标数据测量,这就意味着激光测量单元必须进行从左到右,从上到下的全自动高精度步进测量(即扫描测量),进而得到完整的、全面的、连续的、关联的全景点坐标数据,这些密集而连续的点数据也叫做“点云”,这也就使三维激光扫描测量技术发生了质的飞跃,这个飞跃也意味着三维激光扫描测绘技术可以真实描述目标的整体结构及形态特性,并通过扫描测量点云编织出的“外皮”来逼近目标的完整原形及矢量化数据结构,这里统称为目标的三维重建。见图 3。

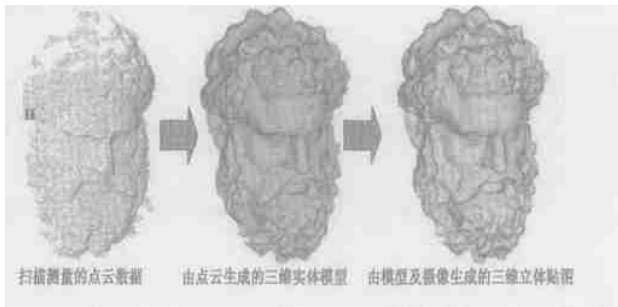


图 3

三维激光扫描测绘技术的测量内容是高精度测量目标的整体三维结构及空间三维特性,并为所有基于三维模型的技术应用而服务;传统三维测量技术的测量内容是高精度测量目标的某一个或多个离散定位点的三坐标数据及该点三维特性。前者可以重建目标模型及分析结构特性,并且进行全面的后处理测绘及测绘目标结构的复杂几何内容。如:几何尺寸、长度、距离、体积、面积、重心、结构形变、结构位移及变化关系、复制、分析各种结构特性等;而后者仅能测量定位点数据并且测绘不同定位点间的简单几何尺寸,如:长度、距离、点位形变、点位移等。

三维激光扫描测量原理: 每一个扫描云点的测

量都是基于三角测量原理进行的,并且根据激光扫描的传感驱动进行三维方向的自动步进测量。三角测量原理的实现是通过激光发射器发出的激光束经过反光镜(三角形的第一个角点)发射到目标上,形成反光点(三角形的第二个角点),然后通过 CCD(三角形的第三个角点)接受目标上的反光点,最后,基于两个角度及一个三角底边计算出目标的景深距离( $Y$  坐标),再经过激光束移动的反光点的位移角度差及  $Y$  坐标等计算出  $Z, X$  坐标。参见图 4。

反光镜的作用在于将激光束进行水平偏转,以便实现激光水平方向的扫描测绘功能。扫描仪主体本身的周向自旋转功能可以实现纵向  $320^\circ$  的扫描,每当水平扫描一个周期后,扫描仪主题将步进一次,以便进行第二次水平扫描,如此同步下去,最终实现对所有空间的扫描过程。

每扫描一个云点后,CCD 将云点信息转化成数字电信号并直接传送给计算机系统进行处理。进而得到被测点的三维坐标数据。

扫描仪采用自动的、实时的、自适应的激光束聚焦技术(在不同的视距中),以保证每个扫描云点的测距精度及位置精度足够高。它可以工作在非常广域的照度下及各种复杂环境中进行操作。

根据目标大小及精度要求,MENSI 可以把不同视点采集的点云信息经过拼接处理后合并到同一个坐标系中,合并办法是通过多个定标球来完成的。

操作员使用一个便携计算机便可在现场遥控操作。传感器中的视频微摄像机可以提供实时获取观测景象。扫描视角是  $320^\circ \times 46^\circ$ 。

视频摄像可以实时监测并遥视扫描过程,还可用来捕捉所需要的目标图象,以便后处理时的校准工作。

完整重建目标,仅仅从一个观测点扫描测绘目标数据是不够的,还必须在不同观测点进行扫描测绘,并且在同一个空间坐标系中合并后才能生成,MENSI 技术提供了人工辅助的自动合并功能,只要在扫描目标前规划好扫描内容并且设置好定标球便可。如图 4。

如图 5,将不同观测点扫描的点云内容在同一个空间坐标系中进行合并,然后在后处理软件功能模块中剪裁掉无关的部分,便得到所需的目标三维重建内容,接下来的工作是对点云质量进行处理(如

图 6),进行平滑、去噪、精度筛选、方差均值处理等,这样便得到可以用于各种应用目的的工作,如:测绘、计量等,如果再经过三维建模处理后,就可以在需要三维实体模型为基础的各种工作中扮演角色,如:可以转化给各种 CAD 软件进行处理、可转化给有限元分析软件进行各种应力分析处理、可转化给流体动力分析软件进行处理、可转化给检测软件进行结构分析检测用、可转化到三维设计软件中进行还原处理及逆设计逆向工程工作、可转化到虚拟现实软件进行三维可视化处理...,总之,基于点云及三维模型进行后处理加工的内容非常丰富,而且是目前很多领域的不可缺少的内容。



图 4

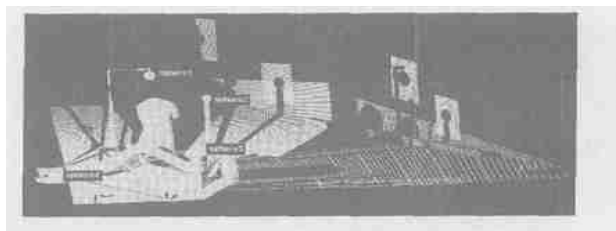


图 5

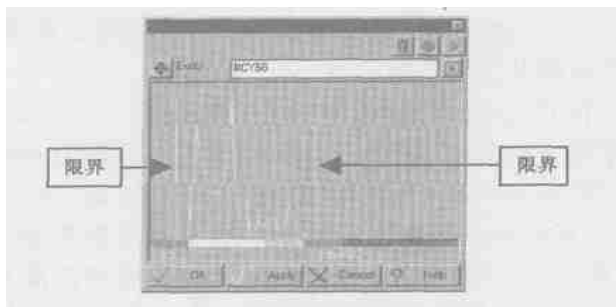


图 6 实体滤波范围对话框

点云是由三维激光扫描的无数测量点数据构成的,而每个点坐标数据的质量都非常重要。如图 7 所示,MENSI 处理技术在于它可以对点云数据进行优化处理,如:基于精度分布形态来过滤噪音点或劣质点,从而提高重建目标的整体精度及质量。

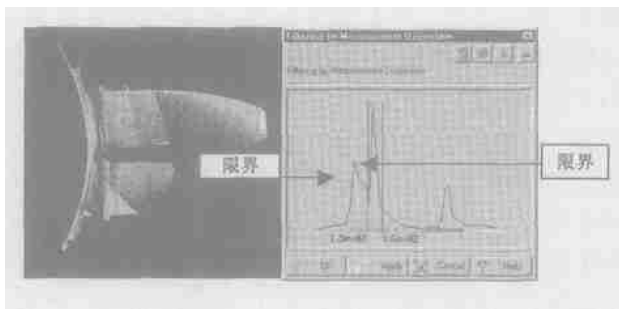


图 7 扫描误差滤波对话框

## 4 法国 MENSII 三维激光扫描技术的特点

### 4.1 对产品应用的认识

现代企业流程的任何环节都需要从设计、分析、处理、到再设计,任何环节中的问题及数据变化都需要检测、三维重构、快速还原、虚拟分析、校对、测试、评估、认证等工作,然后进入到改进、改型、改装、改造、修复、翻新、维护、训练等。总之,三维逆向空间及实体采集技术仅是重构客观真实形态数据的手段,重构后数据都要经过分析及处理,甚至再设计,很少有将实测数据不经过处理就直接用于加工制造的事例,即使是仿制,也需要经过比较分析、规划及工程的再设计。

三维激光扫描技术并不能直接用于复制与实物原形一模一样的东西,逆向技术始终是一种逼近原形的过程,精度要求也仅是基于现有技术发展水平、适用可能及逼近范围。

目前三维激光扫描技术还不能达到三坐标测量技术那样的精度水平,但却能解决三坐标测量技术所不能解决的很多问题,如:直接重构线、面、体、及空间,其根本区别是采集数据方式及三坐标数据量(又称点云),可达几千万以上的云点。量变达到质变,它改变了传统单纯测绘概念及数据应用方向,同时也建立了新的行为方式。

三维激光扫描技术不是让每个云点都定位精确,而是让点云所描述的整个实体及空间构成得到高精度的三维实体重构。传统技术是逐点定位测量,而三维激光扫描技术是对目标空间的“盲扫”及对空间整体(而不是离散定位点)的全景实测,两者是互补性技术。

由于精度与距离成反比关系这一世界性技术瓶颈,也由于激光源与扫描角度的制约,目前近距三维激光扫描技术与中远距三维激光扫描技术也具有很大的应用区别,扫描的数据特性不同,这就涉及到误差均匀分布还是误差非线性分布。所以两类技术也是互补性很强的技术。

4.2 MENSII 技术的优势及特点为适应企业前端的正向工作, MENSII 做了很多适应性研发

(1)全角扫描;

(2)同步视距变化的激光自动聚焦功能,可以改善实测精度及改善不同测距的散焦效应,有利于精度分布特性对原形的逼近;

(3)同步目标的 CCD 实时镜像监测功能,有利于现场目标选择及优化;

(4)同步现场采集工作的远程遥控功能,有利于复杂空间及不友好环境下的操作;

(5)同步现场操作的摄像校准功能,有利于现场发现问题并现场解决问题,减少后处理工作的不确定性及返工;

(6)适应复杂空间及环境中的轴向自转功能及广阔的扫描视阈,有利于尽可能多的采集全景空间内容并减少后处理中数据拼接的次数,进而改善多次拼接点云所造成的空间变形及拼接的接缝误差;

(7)现场实时数据筛选及优化功能;

(8)防辐射、防震动、防潮湿等措施。有利于户内外、异地客户现场及各种移动环境的操作;

(9)开放的接口格式,兼容各种软件数据格式。

### 4.3 MENSII 三维实体模型重构

MENSII 后处理软件具有点云处理、建模处理、校准处理、三维立体贴图、接口格式处理的一系列功能,基于大量点云的后处理, MENSII 软件可以从点云中重构出目标的实体模型并被其它正向软件所使用。

#### 4.3.1 重构机理

在点云上根据建模精度需要搭建三角平面构成的网格,三角平面将把邻近的多点连接起来,构成微小平面,建网格的过程也是点云均值处理的过程,它将对正负误差云点做方差均值计算,然后构成模型。

例如:  $(+0.2 \text{ mm}) + (-0.25 \text{ mm}) = 0.05 \text{ mm}$

#### 4.3.2 重构精度

三维实体模型的重构精度取决于云点测量精度、扫描距离、扫描云点密度、软件后处理及功能算

法。MENSI 技术在 16 年的技术发展及应用中积累了很多经验,软硬件技术及功能做了很大的改进,目前实测云点精度最高可达 0.1 mm,建模精度最高可达 0.07 mm。用 CATIA 软件可以直接读取点云,然后经过逆向处理模块进行建模重构,最后用正向设计模块进行加工并还原二维制图。

#### 4.3.3 重构处理

网格处理功能很丰富,包括均值计算、平滑、消杂点、消尖点、简化重叠平面、填充空点、编织漏点等,目的是将建模更逼近原形,并提高整体精度。

4.3.4 重构类型:重构分为规则构件及非规则实体两类。如:管道管线就属于规则实体,而自由曲面及空间方位就属于非规则实体。

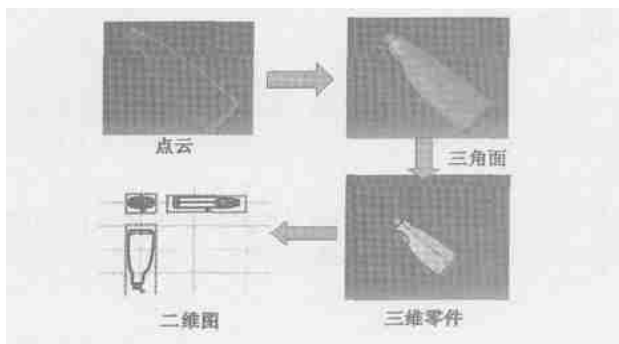


图 8

#### 4.4 精度问题

任何重构数据都不是被直接用于生产加工,无论重构精度多么精确,都要经过各种后处理工作、再设计及适用性处理,因此逆向采集精度仅是相对而言的指标。是对原形数据的逼近,代替不了原形数据。

MENSI 提高精度的性能可以从如下几项指标来说明:

(1)通过聚焦技术而实现的激光束反射光斑点的处理及效果;

(2)扫描点云处理;

(3)三维重构处理。

激光技术被公认为最有利于高精度测量实物,激光发射产品本身也只有与其他技术整合后才能满足不同的应用。MENSI 系统是将激光发射器与传感工艺整合后的内容,它更侧重于空间高精度整体测绘及重构,而不是单点定位测量。激光技术也存在精度问题,就空间扫描测绘来说,最直接的影响因素是散焦、距离;就三维重构应用来说,最直接的影响因素就是精度分布的均匀性及云点密度。前者涉及到每个云点数据的精确性,后者涉及到重建后的整体精确性。激光束发射聚焦不同于 CCD 接收聚焦。

光斑大小与激光聚焦功能及实测精度的效果关系如图 9 所示。

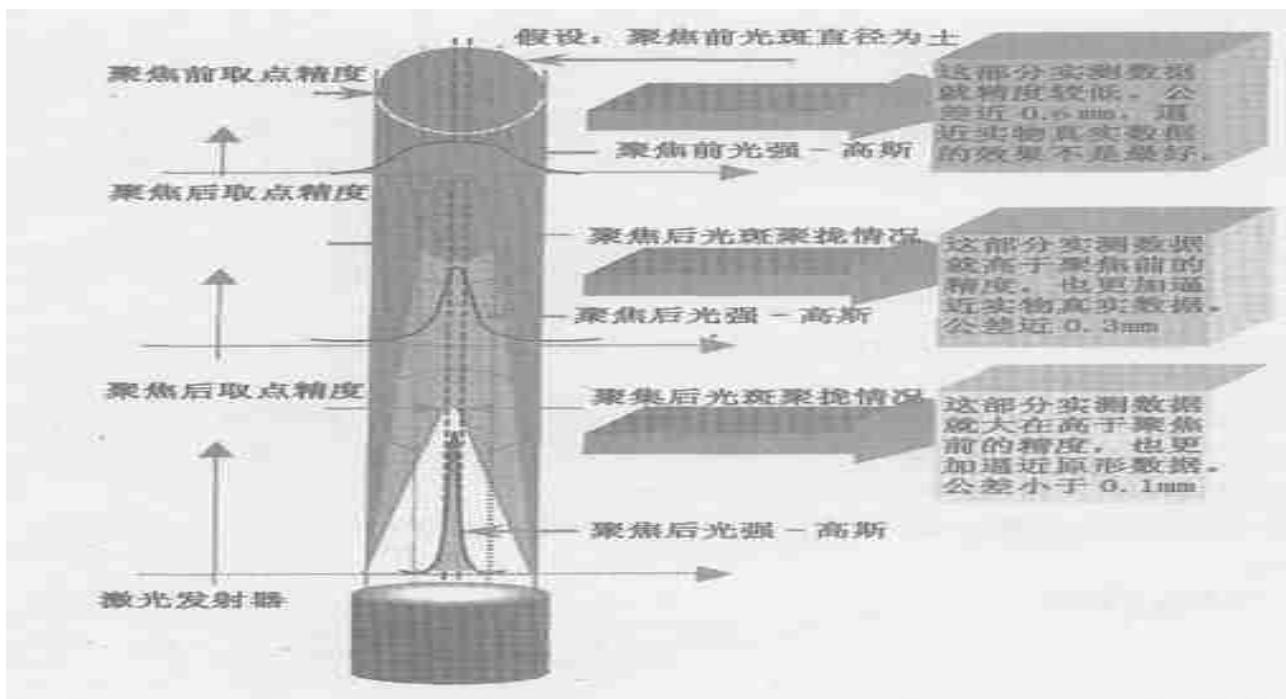


图 9

a) 聚焦功能可以提高扫描精度。

最核心的解决技术就是增加实时及自适应激光聚焦功能, 这个技术不是激光发射器本身的技术指标, 而是激光发射器与传感工艺的技术整合及光机电一体化结果。激光聚焦效果越好, 激光束的目标反射斑点的高斯分布就越窄, 峰值强度就越清晰、激光实测的点位精度及测距精度就越高。

激光扫描仪采集的实测数据取的是光斑聚焦后的最强点位置, 即: 高斯分布的峰值, 这样才能提高

点位精度, 进而最逼近真实的位置, 所以 MENSII 测量精度提高很大, MENSII 技术很好的解决了这个问题, 而且是目前唯一做到同步视距、同步速度及同步空间点位的激光束自适应聚焦功能, 目的是减少激光束散焦及距离延长所带来的精度衰减, 进而提高整体的采集数据及实测数据的精度。

b) 聚焦功能还可以防止丢点(或避免出现扫描死角)。

## 《宇航计测技术》征 稿 启 事

《宇航计测技术》创刊于 1981 年, 是经国家科委批准的中央级计量测试专业性技术刊物, 国内外公开发行。本刊被列为我国首批中文核心期刊、计量核心期刊、国家统计局用刊, 并被《中国学术期刊》(光盘版)与“中国期刊网”等多种文献数据库收录, 曾荣获全国、北京市和航天系统优秀科技期刊奖及中国期刊方阵“双效”期刊。

征稿范围: 长度、热学、力学、无线电、时间频率、电磁、化学和光学计量标准的设计、研制和计量测试技术、仪器仪表的检定维修技术、误差分析及数据处理技术; 石英晶体器件的设计和研制、电子技术应用、自动化测量、计量基础、计量产品介绍、国内外计量信息、计量测试动态及发展趋势等。

### 来稿要求:

1. 文稿应内容新颖, 论点明确, 论据可靠, 数据准确, 文字简练, 层次清楚。每篇文稿一般不超过 6,000 字, 文稿请附中英文标题、摘要、主题词、作者单位名称、所在城市、邮政编码及作者姓名。

2. 文稿的标题要简明、恰当, 一般不超过 20 个字; 文摘应简明、概括的给出文章的主要内容, 一般不超过 300 字; 每篇文章的主题词应根据主题词表查出, 一般为 3~8 个。

3. 文稿应打印在 A4 纸上或工整的抄写在 16 开单面方格稿纸上(使用规范的汉字); 文中外文符号的使用一般为: 物理量符号用斜体, 矢量与矩阵符号用黑斜体, 单位符号与词头用正体; 易混淆的拉 字母、希腊字母、大小写、正斜体和上下角标请用铅笔注明。

4. 文稿请按现行国家标准或行业标准及本刊要求撰写; 请使用法定计量单位, 专业名词、术语要规范。

5. 文稿中的图、表要求简洁、清晰, 照片请选用黑白图片, 并具有良好的清晰度和对比度、恰当的缩放比例。

6. 参考文献应引用最必要的、最新的且公开发表的文献, 一般不超过 10 条。

7. 文稿首页页脚处应注明第一作者的出生年、性别、学位、职称、所从事的工作或主要研究方向; 属各类基金资助的项目请注明基金项目的名称和编号。

8. 按照国家保密法的规定, 文稿中请勿涉及保密内容, 必要时应由所属单位进行保密审查并出具“可以公开发表”的证明。

9. 文稿请勿一稿多投。本刊收到的稿件经专家审查后, 一般在 60 天内将审查意见函告作者; 未经采用的稿件恕不退还, 请作者自留底稿; 稿件刊登后, 按国家有关规定向作者支付稿酬, 并按作者数量赠送当期样刊数册。

10. 文稿的著作权属于作者, 文责自负。作者若不允许本刊对文稿作文字性及少量内容删改, 或不同意将文稿编入本刊加入的数据库和数字图书馆, 请在来稿时声明, 本刊将做适当处理。

来稿请寄: 北京 9200 信箱 24 分箱《宇航计测技术》编辑部, 邮编: 100076。

联系电话: (010)68383695。