

# 基于点云融合的管路精确测量方法\*

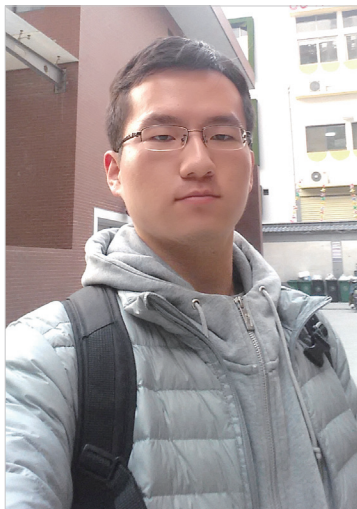
张桁维, 梁 晋, 孟繁昌, 徐劲澜, 李文攀

(西安交通大学机械工程学院机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

**[摘要]** 为了提高航空发动机管路测量的精度, 提出一种基于点云融合的管路模型精确测量方法。利用机器视觉原理从多张图片中得到全局点坐标, 作为三维结构光测量过程中的定位点, 获得点分布密度基本均匀的点云数据, 最后利用点云融合技术得到管路三维数字化模型。测量试验表明, 该方法的测量值与标准值最大绝对偏差为 0.16mm, 可以有效提高管路测量的精度。

**关键词:** 管路测量; 全局点获取; 结构光测量; 点云融合; 离散点模型

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.051



张桁维

硕士研究生, 主要研究方向为光学测量。

管路零部件大量应用于航空发动机中, 其产品质量直接影响到整个系统的运行。近年来, 数字化的管路设计对发动机的装配空间提出

了更高的要求, 对应的管路部件加工精度, 尤其是折弯角度和扭转角度的精度更为严格。快速准确的管路测量方法是确保其精确装配和无应力装配的核心技术。目前管路加工一般由数控弯管机来完成, 但存在一定的加工误差, 为了实现管路的精确装配, 在装配过程中需要保证其端点的位置以及走向。人工装调或人工修正试装均不能满足管路精确装配以及无应力装配的要求, 因此在管路装配前, 需对管件弯曲成形后的空间几何形态、折弯角度等参数进行精确测量, 从而对管件加工后的数据和设计模型进行比较, 以实现管件加工中的回弹补偿和加工后的质量检验。只有测量合格的管路才能允许实施装配, 并一次装配成功。对于测量不合格的管路, 可根据测量结果修正加工参数。对管路进行准确、快速数字化测量已经成为保证航空发动机产品质量的关键环节。

目前传统的管路测量方法已经不能满足工程应用中复杂管路快速

准确数字化测量的要求。因此, 迫切需要一种快速、高精度的弯管检测手段, 用于航空发动机的管路测量, 助力我国航空发动机的量产。

国内外相关研究机构相继开展了航空发动机管路测量方面的研究, 取得了一些研究成果。赵玉芹等<sup>[1]</sup>采用在管件表面粘贴标记条的方法, 进行管件的三维重建, 该方法用数码相机对贴有标记条的弯管系统进行多角度拍摄测量, 利用主动轮廓模型方法提取图像中的边缘特征进而获得空间弯管的几何参数, 但工程实际应用中很难对每个管件附加大量标记条进行测量和重建。金鹏等<sup>[2]</sup>提出基于二维靶标的管路端点位置测量方法, 该方法需要将二维靶标装配在导管两端, 通过图像采集获得靶标上标识点的图像坐标, 在此基础上计算出管路端点的位置, 但该方法操作繁琐, 端点测量精度受靶标安装精度的影响很大。张天等<sup>[3]</sup>利用背光源技术在采集的二维图像上获取弯管的轮廓, 并在轮廓上提取中心轴线

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51421004)。

和边缘线,进而得到弯管重建所需的管路空间轴线三维坐标和弯管的外径尺寸,但该方法对弯管轮廓边缘线及中心轴线的提取存在较大误差,容易产生误差的累积与传递。Lee等<sup>[4]</sup>提出一种自动化方法,从激光扫描数据生成由直管、弯头和三通管组成的整个管道三维模型,试验结果表明,该方法对于激光扫描数据的不完整性以及数据中的噪声和密度变化鲁棒性较差。Tangelder等<sup>[5]</sup>利用CSG模型和灰度梯度拟合图像中的弯管,实现了对弯管的测量,但该方法需要包含完整边缘和表面信息的弯管CSG模型,并且只适用于含有直管和接头等标准弯管零件的重建。

为了提高航空发动机管路的测量精度,本文首先对管路空间四周的全局点三维坐标进行精确测量,以此作为三维结构光测量<sup>[6-7]</sup>过程中的定位点,获得离散点模型,保证了管路局部特征的完整而且不需要借助其他辅助装置;之后对模型进行去除噪声及融合处理,提高管路模型的精度。试验结果表明,该方法能够准确计算管路空间几何形态等参数,操作方便且计算效率高。

### 测量原理

本文提出基于点云融合的方法来测量管路的参数。首先,该方法在待测管路四周布置标志点,通过图像处理、标志点的定位、编码点的识别得到非编码点的空间坐标,为下一步的三维结构光测量中点云配准提供公共点集,即将得到的点云之间完成坐标转换,统一到坐标系,使点云之间获得正确的相互位置关系。

在获得的点云模型中会出现多幅点云间产生分层的情况,为最后的点云融合处理带来一些精度损失。为此,本文采用最近点迭代算法(Iterative Closest Points)来精确配准两幅点云,通过多次两幅点云间配准达到完整表达管路离散数据模型的结

果<sup>[8]</sup>。

经过精确配准的点云还会存在一些局部的分层现象,如果不对其进行处理,得到的管路模型将会存在表面缺损、粗糙等缺陷。因此,本文采用点云融合技术对其进一步处理,目的就是获得单层点云数据,去除一些噪声和数据冗余,提高模型的精度。点云融合的基本思路是针对两幅不同曲面的点云在其边界,也就是重叠区域处,分布密度比较低的特征,计算重叠区域处的密度函数,对密度函数进行插值运算处理,获得融合点坐标<sup>[9]</sup>。

在两幅点云曲面 $S_1$ 、 $S_2$ 之间存在重叠区域,一般情况下管路表面的一个真实点会在曲面 $S_1$ 、 $S_2$ 上映射两个对应点 $s_1$ 、 $s_2$ ,那么点 $s_1$ 、 $s_2$ 就具有映射关系,则融合点 $k$ 就在点 $s_1$ 与点 $s_2$ 之间。但由于点云是曲面的一种离散表达形式,点云数据是不连续的,所以可能会出现点云 $S_1$ 中点 $s_1$ 在点云 $S_2$ 中无法找到对应点 $s_2$ 的情况,针对这一问题,可采用插值计算点云 $S_2$ 来得到相应的映射点。

考虑到噪声对点云数据造成的影响<sup>[10]</sup>,求取点云 $S_1$ 及 $S_2$ 上局部邻域的梯度密度最大点来替代点 $s_1$ 与 $s_2$ 。因此以点 $s_1$ 为圆心, $r$ 为半径,作一个圆 $A_1$ , $A_1$ 与 $S_1$ 的交集所包含的点为 $s_1$ 的邻域,记为 $N(s_1)$ 。同理可得, $s_2$ 的邻域为 $N(s_2)$ 。假设 $N(s_1)$ 的局部梯度密度最大点为 $s'_1$ , $N(s_2)$ 为 $s'_2$ 。通过多次迭代,将点 $s_1$ 、 $s_2$ 漂移到局部密度最大点。定义梯度密度均值漂移函数为:

$$s'_1 = s'_1 + \frac{\sum_{s_{i_j} \in N(s_1)} \langle s_{i_j} - s'_1, n \rangle w(\langle s'_1 - s_{i_j}, n \rangle)}{\sum_{s_{i_j} \in N(s_1)} w(\langle s'_1 - s_{i_j}, n \rangle)} n \quad (1)$$

式中, $n$ 为点 $s_1$ 的法向矢量, $w(\langle s'_1 - s_{i_j}, n \rangle)$ 为权函数,可定义为:

$$w(x) = \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (2)$$

根据获得的局部密度最大点 $s'_1$ 、 $s'_2$ ,计算局部邻域的密度:

$$w_{s_1} = \sum_{s_{i_j} \in N(s_1)} \exp\left(-\|s'_1 - s_{i_j}\|^2/2\sigma^2\right) \quad (3)$$

$$w_{s_2} = \sum_{s_{i_j} \in N(s_2)} \exp\left(-\|s'_2 - s_{i_j}\|^2/2\sigma^2\right) \quad (4)$$

融合点的位置计算为:

$$f(w_{s_1}, w_{s_2}) = s_1 + \frac{w_{s_1}}{w_{s_1} + w_{s_2}} \|s'_1 - s'_2\| n \quad (5)$$

### 实现流程

管路具体的测量流程如图1所示,包含以下3个阶段。(1)全局点获取:首先使用相机对底盘上的全局点进行图像采集,然后通过对标志点的定位、编码点的识别,得到非编码点空间三维坐标如图2所示。(2)管路三维轮廓测量:将弯管固定在底盘上并将刀片固定在弯管端面上,便于识别管路起始点和末尾点。由于弯管外表面为黑色,颜色过深会影响点云提取精度,使用白色显像剂向弯管试件均匀喷涂白色薄层。随后使用光栅投影仪将数幅特定编码的条纹光栅投射到管路表面,并由成一定夹

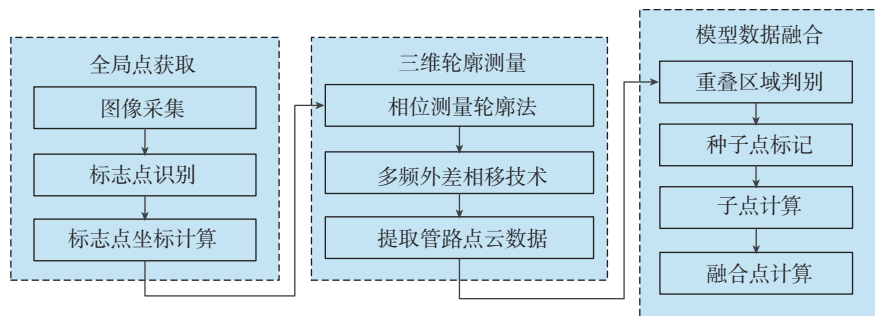


图1 测量流程  
Fig.1 Measurement process

角的两个摄像头同步采集相应图像,对图像进行解码和相位计算,实现管路表面密集点云的测量,所得结果如图3所示。(3)模型数据融合:根据两幅不同曲面的点云在其边界处分布密度比较低的特征,对密度函数进行插值运算处理,可以消除局部分层现象及噪声、精确配准点云,融合处理前后对比如图4所示。同时获得管路各段轴线交点的坐标,计算出端头处轴线与平面的交点坐标作为轴线的起始点和末尾点,如图5所示。

### 试验验证

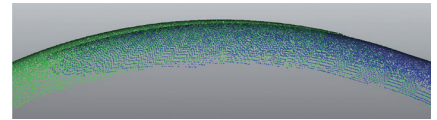
搭建由光栅投射器、数码摄像机、高性能计算机组成的弯管三维轮廓测量平台,验证该方法的测量精度。测量平台选用德国 Basler 公司生产的 acA1600-20gm 工业数字摄像机,相机分辨率为  $1624 \times 1236$ ; 镜头选用德国施耐德公司 8mm 镜头; 光栅投射器选用光学稳定性较好的数字光栅投射器,分辨率为  $1280 \times 1024$ 。软件部分已经在 VS2010 平台下编程实现。

被测管路如图6所示,经过三坐标测量机的测量,得到管路上首尾两端点、拐点共11个点(特征点)的空间坐标值以及3个关键点的折弯角度。本文以此测量值作为管路的标准值,分别使用本文所述方法(方法

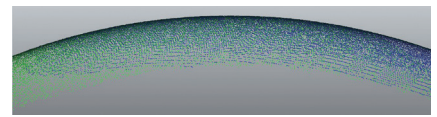
1)以及基于轮廓边缘提取的方法<sup>[3]</sup>(方法2)进行测量。方法2通过不同视点采集弯管的二维图像并获取弯管轮廓,在轮廓上提取中心轴线和边缘线,最后利用三维建模技术重建被测弯管的三维模型。由于管件表面一般无特征纹理,有些甚至反光强烈,利用像素灰度值对管路边缘的识别误差较大且效率低,同时通过管路轮廓提取中心线会导致误差的传递和累加,以此为基础得到的弯管空间参数的精度无法保证。与方法2不同,方法1将得到的全局点坐标作为三维结构光测量过程中的定位点,可以精确获得管路整个表面的点云数据,

再对点云进行融合去除一些噪声,保证了弯管空间参数的测量精度。同时,为了验证方法的重复性,按照上述方法进行8组重复试验。根据测量数据,得到不同方法之间的对比结果,如图7所示。

测量试验的绝对偏差是指测量值与标准值之间的偏差,相对偏差为



(a)局部点云融合处理之前



(b)局部点云融合处理之后

图4 局部点云融合处理前后对比图像

Fig.4 Images before and after local point cloud fusion processing

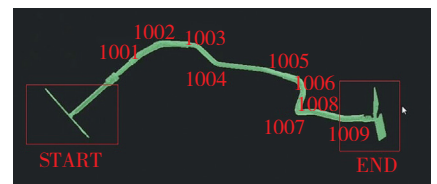


图5 试件点云处理后效果图

Fig.5 Pipeline point cloud processing result



图2 全局点获取

Fig.2 Marked points capture

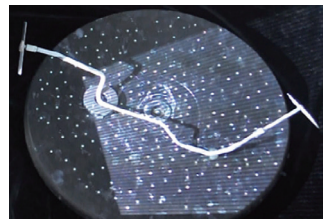


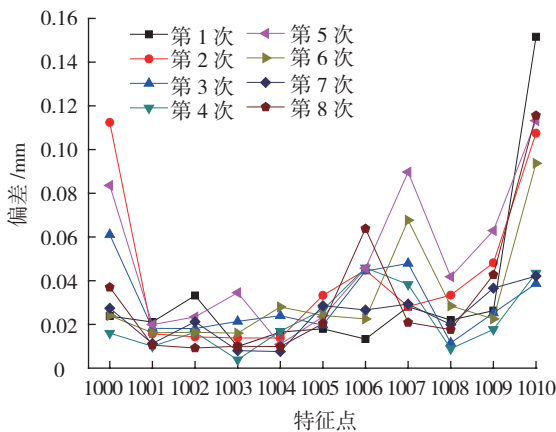
图3 扫描光栅

Fig.3 Contour measurement

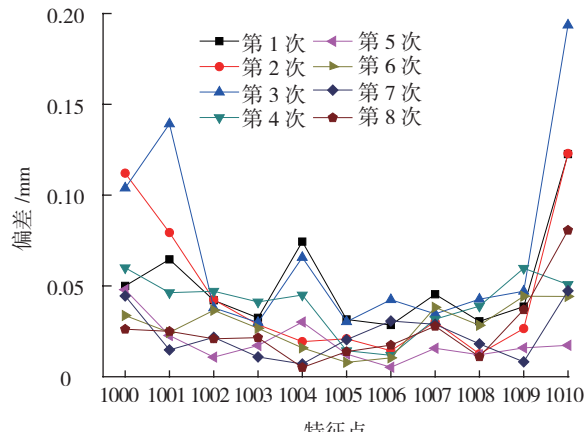


图6 测试管件

Fig.6 Testing pipeline



(a)方法1



(b)方法2

图7 不同方法与标准值空间坐标对比结果

Fig.7 Comparison of different method and standard value about coordinate values

表1 折弯角度参数测量对比 (°)

测量点	方法 1		方法 2	
	最大绝对偏差	最大相对偏差	最大绝对偏差	最大相对偏差
1004	0.0323	0.0428	0.0416	0.0464
1006	0.0747	0.0737	0.1784	0.1643
1007	0.1888	0.2928	0.2146	0.4178

各组测量数据之间的偏差。

由图 7 可以看出,本文方法的测量精度为 0.16mm,而基于轮廓边缘提取的管路测量方法测量精度为 0.2mm,本文方法在测量精度上有了提高。由表 1 可以看出,本文方法的测量稳定性也更好,测量效率也远高于三坐标测量机。同时相比于文献[2]所述方法,本文方法避免了其他辅助装置对测量精度的影响,适用性也更广泛、通用性更好。

通过分析本文方法的实现流程可知,在相机系统标定情况良好的状态下,其采用了多种处理手段来确保管路测量的精度:(1)通过对管路四周全局点位置的精确测量,获得其空间坐标,可以在采用结构光面扫描测量点云时,快速确定点云在整个视场中的正确位置,有效提高了点云配准效率,减少了误匹配;(2)在处理得到的分布密度基本均匀的点云模型时,为了减少模型精度损失问题以及噪声对点云数据的影响,计算在两幅点云中重叠区域处的密度函数,获得融合点,提高了点云融合的精度。

### 结论

本文提出了基于点云融合的管路精确测量方法,该方法的主要特点是通过提前布置的定位点提高了管路点云的配准精度,同时又采用点云融合技术去除了噪声等干扰因素,避免了由于管路轮廓边缘识别而产生的误差,得到可靠的管路三维模型。

该方法在不借助任何辅助设备、不对管件表面做标记的情况下,实现了对复杂管路参数的精确测量。根据试验验证,该方法对管路空间几何形态的测量值与标准值之间的最大偏差为 0.16mm,对折弯角度参数各组测量数据之间的最大相对偏差为 0.293°,这说明该方法测量稳定性好,而且操作方便,能够满足一般工业场合的测量要求。

### 参考文献

[1] 赵玉芹,张丽艳.基于摄影测量的管路参数确定[J].机械制造与自动化,2008,37(6):114-117.  
 ZHAO Yuqin, ZHANG Liyan. Pipe parameter estimation in photogrammetry[J]. Machine Building & Automation, 2008, 37(6): 114-117.  
 [2] 金鹏,刘检华,刘少丽,等.基于二维靶标的管路端点位置测量方法[J].计算机集成制造系统,2014,20(11):2758-2766.  
 JIN Peng, LIU Jianhua, LIU Shaoli, et al. Measuring method of pipeline endpoints based on two-dimensional point-target[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(11): 2758-2766.  
 [3] 张天,唐承统,刘检华.基于多目视觉的弯管空间参数测量方法[J].仪器仪表学报,2013,34(2):260-267.  
 ZHANG Tian, TANG Chengtong, LIU Jianhua. Bend tube spatial parameters measurement method based on multi-vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 260-267.  
 [4] LEE J, SON H, KIM C, et al. Skeleton-based 3D reconstruction of as-built pipelines from laser-scan data[J]. Automation in

Construction, 2013, 35: 199-207.

[5] TANGELDER J, ERMES P, VOSSelman G, et al. CAD-based photogrammetry for reverse engineering of industrial installations[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18(4): 264-274.  
 [6] 张学昌,杨峰.融合图像域信息的面结构光测量点云数据三角化处理[J].机械科学与技术,2008,27(4):421-424.  
 ZHANG Xuechang, YANG Feng. Point cloud data triangulation processing of structural light measurement using image field information[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(4): 421-424.  
 [7] 吕乃光,孙鹏,娄小平,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(自然科学版),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 & Technology University, 2010, 25(1): 1-5.  
 [8] 严剑锋,邓喀中,邢正全.基于最小二乘拟合的三维激光扫描点云滤波[J].测绘通报,2013(5):43-46.  
 YAN Jianfeng, DENG Kazhong, XING Zhengquan. 3D laser scanning point cloud filtering based on least squares fitting[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(5): 43-46.  
 [9] 刘俊焱,云挺,周宇,等.基于最小二乘的点云叶面拟合算法研究[J].西北林学院学报,2014,29(5):70-77.  
 LIU Junyan, YUN Ting, ZHOU Yu, et al. Leaf surface fitting of point cloud based on least square method[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(5): 70-77.  
 [10] 刘大峰,廖文和,戴宁,等.散乱点云去噪算法的研究与实现[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(6):1108-1112.  
 LIU Dafeng, LIAO Wenhe, DAI Ning, et al. Research and implementation for denoising noisy scattered point data[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(6): 1108-1112.  
 通讯作者:梁晋,教授,博士生导师,研究方向为机器视觉,E-mail:liangjin@mail.xjtu.edu.cn.

## Point Cloud Fusing-Based Measuring Method for Curved Pipes

ZHANG Hengwei, LIANG Jin, MENG Fanchang, XU Jinglan, LI Wenpan

(下转第59页)

于小型零件(尺寸 <2m)的高精度表面测量,建议采用粘贴反光标识点方式测量。

### 参考文献

[1] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al. Large-scale metrology— an update[J]. *Annals of the CIRP*, 2002, 51(2): 587–609.

[2] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(6): 571–595.

[3] 刘胜兰, 罗志光, 谭高山, 等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 409–418.

LIU Shenglan, LUO Zhiguang, TAN Gaoshan, et al. 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assemblies[J].

*Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 409–418.

[4] 刘胜兰, 张丽艳. 三维数字化综合测量及其关键技术[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(21): 83–86.

LIU Shenglan, ZHANG Liyan. Integrated solution and key technology for 3D coordinate measuring[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(21): 83–86.

[5] 胡宝海. 基于EMSCON的多激光跟踪仪协同测量关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

HU Baohai. EMSCON-based collaborative measurement technologies of multi-laser tracker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[6] ZHANG H, ZHANG L Y, WANG H T, et al. Surface measurement based on instantaneous random illumination[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(3): 316–324.

[7] 朱永国, 黄翔, 方伟, 等. 机身调姿方法及误差分析[J]. *南京航空航天大学学报*,

2011, 43(2): 229–234.

ZHU Yongguo, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Fuselage automatic position and pose adjustment method and its error analysis[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(2): 229–234.

[8] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 Part 1, Optical 3D measuring systems: imaging systems with point-by-point probing[S]. Düsseldorf, 2002.

[9] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 part 2, Optical 3D measuring systems: optical systems based on area scanning[S]. Düsseldorf, 2002.

[10] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2634 part 3, Optical 3D measuring systems: multiple view systems based on area scanning[S]. Düsseldorf, 2008.

通讯作者: 赵建国, E-mail: zjg\_5352@163.com。

## Research of Three Dimensional Collaborative Measurement of Aircraft Large Complicated Components

ZHAO Jianguo, LIU Xinyu, YU Siyang

(AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the difference of measuring technology needed for the assembly of large and complex aircraft structural parts, a collaborative measurement method based on Metronor dual-camera tracking system, hand-held light pen and Aicon scanner was developed. The hand-held light pen and three-dimensional scanner measurement were proposed, the technical scheme omits the work of attaching and removing the reflective mark points, and the testing process in the space of 4m×3m×2m with the measurement error of no more than 0.075mm, which can realize the measurement of internal hidden features, hole position information, axis, mating surface, aerodynamic profile and the gap step, meets the requirements of three-dimensional digital measurement for large complex structures assembly on aircraft.

**Keywords:** Aircraft assembly; Structural part; Collaborative measurement; Tracking scan; Hand-held light pen

(责编 逸飞)

(上接第54页)

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[ABSTRACT]** To improve the accuracy of curved pipes measurement, a point cloud fusing-based measurement method was proposed. The principle of machine vision was utilized to extract coordinate of the marked points from images taken from cameras, and the marked points were used as fixed points in the process of 3D scanning to obtain the uniform point cloud. Point cloud fusion technology was used to obtain the 3D digital model of curved pipes. Experimental results showed that the maximum absolute deviation between measured values and standard value was 0.16mm. This method can effectively improve the accuracy of curved pipes measurement.

**Keywords:** Pipeline measurement; Global point acquisition; Structured light measurement; Point cloud fusion;

Discrete point model

(责编 逸飞)