

基于光栅投影测量的蒙皮对缝检测技术研究*

陈松林^{1,2}, 夏仁波¹, 赵吉宾¹, 张洪瑶^{1,2}, 胡茂邦^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室, 沈阳 110016;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 针对飞机蒙皮对缝阶差与间隙的数字化检测问题,以光栅投影测量技术为基础,对阶差与间隙的测量技术进行了研究,提出了一种新的阶差与间隙的测量方法。首先采用光栅投影测量技术,获取待测面的稠密点云数据;然后从图像中对接缝区域进行定位,根据点云与图像之间的对应性,获得对缝区域的点云数据;对对缝区域点云数据进行分析,确定对缝两侧直线段的终点对缝的边缘点,从而计算出对缝的阶差与间隙。相对于线结构光扫描,所提方法获得的数据更加密集,并且一次测量即可完成视场内所有对缝的分析,效率较高。试验分析表明,所提方法检测结果均值误差小于0.03mm,最大误差小于0.05mm,可以满足飞机蒙皮对缝检测的要求。

关键词: 飞机蒙皮; 光栅投影测量; 对缝; 阶差; 间隙

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.032



陈松林

中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生,研究方向为三维测量技术。

在飞机装配过程中,存在许多阶差与间隙,如蒙皮对缝之间、蒙皮与结构之间、舵面与结构之间、机身部段之间等。对飞机装配存在的间隙与阶差进行严格控制关系到飞机的气动特性、飞行安全性、飞行成本以及战斗机的隐身性等^[1-4]。

目前,国内航空制造企业主要借助检测塞尺、专用量具和人工观测等手段对飞机装配时的阶差与间隙进行测量,这种检测方法基于模拟量的合格与不合格,难以精确地描述零部件状态,并且效率低、自动化程度不高、人为因素多、精度没有保障。当测量较长的蒙皮接缝时费时费力,一些复杂结构的阶差与间隙因放入塞尺困难而无法测量,而且这种测量方法只能进行静态测量,无法实现实时在线测量,更无法将测量数据快速导入计算机,进行在线分析。

随着测量技术的快速发展,国

外已经开发了许多数字化检测设备用于相关领域,例如美国 Origin Technologies 公司的 Laser Gauge 系列产品、德国 Micro-Epsilon 公司的 scanCONTROL/gapCONTROL 系列产品、德国 8 Tree 公司的 GAPCheck 等都可以对飞机表面阶差和间隙进行快速测量。

近年来,随着航空工业的蓬勃发展,国内一些学者对飞机蒙皮装配间隙与阶差的检测技术也进行了许多研究。南京航空航天大学的张卡^[5]、沈昌力^[6]、马张健^[7],航空工业成飞的吴兴江^[8]、北京航空航天大学的许大帅等^[4],对基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术进行了研究,但是由于需要手动对接缝区域进行定位测量,要求投射的结构光与接缝近似垂直,如果结构光与接缝夹角过大,则会使测得的结果偏大^[4],因此对使用者的要求较高。另外,由

* 基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAF08 B01-01); 国家自然科学基金项目(5137 5476)。

于无法自动对接缝区域进行定位,不容易实现自动化测量。南京航空航天大学严成等^[9]开发了一套基于三维激光扫描的对缝检测设备,避免了线结构光方法中结构光与接缝不垂直对测量结果造成的影响,但是由于该设备所用的扫描仪实际上仍为二维线结构光扫描仪,需要附加跟踪设备对扫描仪进行实时跟踪,因此成本比较高,不利于推广使用。

针对这些问题,本文采用实验室自主开发的光栅投影测量设备,对飞机蒙皮对缝检测技术进行研究,克服了线结构光测量技术的缺点,并且可以自动对接缝区域进行定位测量,易于实现自动化;测量效率高,单次扫描可在3s内对视场内的多条接缝进行分析。

光栅投影测量原理

光栅投影测量是结构光测量技术的一种,属于面结构光测量技术。图1为光栅投影测量技术原理图,测量时使用投影仪向被测物体表面投射一系列预先设计好的正弦光栅图像,该图像经被测物体表面调制后会

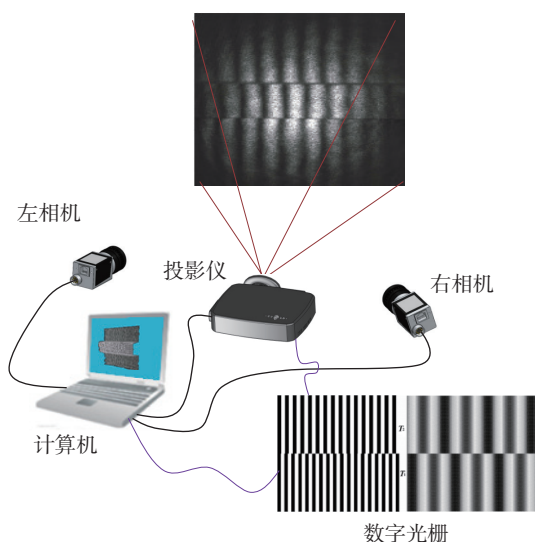


图1 光栅投影测量技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of the grating projection measurement system

一点所对应的相位,并将其作为被测物体表面的特征点,根据三角测量的原理即可获得物体表面的三维点云数据。相对于线结构和点结构光测量技术,光栅投影测量一次即可获得待测面的稠密三维点云数据,无须点云拼接,因此具有高精度、高效率的特点,已成为一种非常重要的三维测量方法。

阶差间隙测量原理及方法

1 待测面点云数据获取

待测面点云数据的获取采用中科院沈阳自动化研究所研制的Super-Scan三维扫描仪,如图2所示。该扫描仪基于光栅投影测量原理,由两个200万像素的CCD相机与1个DLP投影仪构成,扫描视场大小可调,扫描精度在 $20\mu\text{m}$ 。采用该设备对图3(a)所示的工件进行三维扫描,所得结果如图3(b)所示,可以看出,所得点云数据光滑稠密,满足测量要求。

2 接缝区域自动定位

目前基于线结构光的接缝检测方法,均需要手动对接缝区域进行定位扫描,要求投射的结构光与接缝近似垂直,如果结构光与接缝夹角过

大,则会使测得的结果偏大,因此对使用者的要求较高。而在光栅投影测量中,由于一次测量即可得到待测面的所有点云数据,如果能对接缝区域进行自动定位,则可实现阶差与间隙的自动化评价。

由于在散乱的点云数据中,缺乏有效、实时提取点云边界的方法,因此直接从点云数据中进行接缝区域的提取比较困难。但是,在二维图像处理中,各种特征提取的算法已较为完善,可以满足工业应用。因此本文首先对二维图像进行分析,快速提取出接缝区域,根据图像中像素点与三维点云数据的对应性,提取出接缝区域所对应的点云数据。

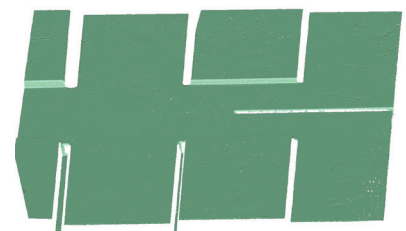
观察图3(a)可知,接缝区域均



图2 Super-Scan三维扫描仪
Fig.2 Super-Scan 3D scanner



(a) 待测件



(b) 点云数据

图3 工件与扫描结果
Fig.3 Workpiece and scanning result

具有一定的宽度,另外由于光照的原因,接缝与周边区域具有较强的对比度。如果采用传统的边缘检测算法,不仅会将接缝区域的边缘检测出来,也会将待测面上其他的边缘检测出来,造成一定的干扰。图4(a)为采用Canny边缘检测算法得到的结果,其中红色部分代表检测到的边缘,可以看出,检测结果明显存在许多杂乱的边缘,对接缝区域的定位造成了很大的干扰。由于接缝区域具有一定的宽度,如果将该信息考虑进来,只提取具有一定宽度的边缘区域,则可达到较好的效果。Steger C算法^[10]是Steger于2002年提出的用于提取具有一定宽度区域的中心线的算法,用该算法对图3(a)所示图像进行处理,结果如图4(b)所示,可以看出,接缝区域中心均可被正确提取出来,并且没有图4(a)中杂乱的边缘,可以满足要求。

3 接缝区域点云数据处理

在图像中定位出接缝中心后,沿其垂线方向取一系列图像像素点,对应到点云数据中,得到一系列点云数据,如图5中红色空心圆所示,记这列点云数据为 $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 。由于图像中的直线所对应的空间点并不一定在一条直线上,再加上图像中像素点的离散性,所取得的像素点亦不严格在一条直线上,因此导致 P 中点云数据并不在同一条直线上,也不在同一个平面上,如果对其直接进行分析,则会造成一定的误差。为了解决这个问题,可以对其进行平面拟

合,将点云数据投影到平面上进行分析。由于 P 中点云数据近似在一条直线上,如果直接对其进行平面拟合,则拟合出的平面法向量无法确定,从图5中可以看出,只有在拟合平面垂直于待测面的时候,才能进行正确的分析。

为了达到这个目的,可以在接缝一侧取一部分点云数据,对其进行空间平面拟合,记拟合出的平面为基准面 α ,如图5所示,其表达式为:

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \quad (1)$$

则其法向量为 $[A_1 \ B_1 \ C_1]$, x, y, z 为平面上的点云数据。 P 中点应位于与基准面 α 垂直的平面 β 上,则平面 β 应满足公式(2)的约束方程:

$$\begin{cases} A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \\ A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ 为 β 的平面方程, $[A_2 \ B_2 \ C_2]$ 为平面 β 的法向量, $A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2 = 0$ 保证了平面 β 与基准面 α 相互垂直。将 P 中点云数据代入式(2)中,可得到一线性方程组,采用最小二乘法,对其进行求解,可求得 A_2, B_2, C_2 的值。

将 P 中点投影到 β 上,记投影点为 P' ,在平面 β 上建立参考坐标系,使其坐标原点位于平面上, z 轴垂直于平面,将 P' 中点变换到参考坐标系下,记变换后的点为 P'' ,则 P'' 中点的 z 坐标值均为0,在下文分析时仅使用其 x 与 y 坐标,变换后

的点如图6所示。由于扫描仪测量原理的限制,对于硬转角(即尖锐角)边界区域的测量存在一定的误差,另外由于零件的边界区域通常会存在倒角,因此在接缝周围测量出的点云数据会存在一定的圆弧过渡,如图6所示。

理论上的阶差为接缝两边两条平行直线的距离,但是由于接缝周围测量出的点云数据会存在一定的圆弧过渡,如果直接对接缝两边的点云进行直线拟合,则会造成较大的误差,因此首先需要寻找对接缝两边直线段的端点。设 P'' 中点的坐标为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$,对 P'' 中的点进行自适应分段直线拟合,如公式(3)所示。其中 m 表示分段的数量,由算法自动确定; $f_i(x) (i=1, 2, \dots, m)$ 表示每段的直线方程。若设最大拟合误差为 ε ,则调节 ε 的大小可以调节拟合的精细程度与分段的数量。

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x) = k_1x + b_1, x \in (x_1, x_r) \\ f_2(x) = k_2x + b_2, x \in (x_r, x_s) \\ \dots \\ f_m(x) = k_mx + b_m, x \in (x_r, x_n) \end{cases} \quad (3)$$

对图6的点云进行直线拟合,将点云分为 AB, BC, \dots, HI 共7段。为

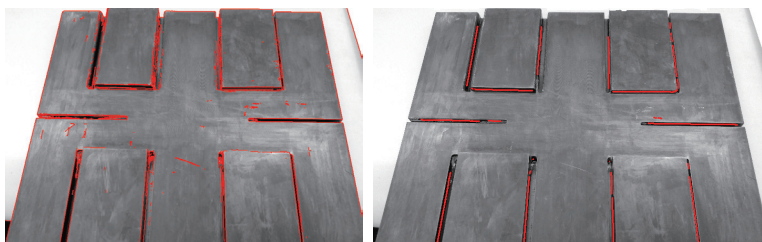


图4 边缘检测结果
Fig.4 Edge detection results

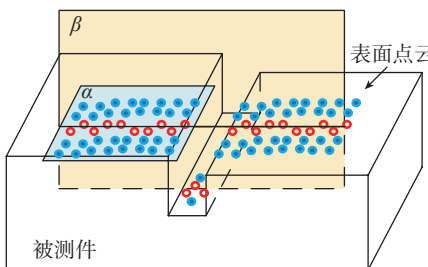


图5 点云采样模型
Fig.5 Model of sampling point cloud

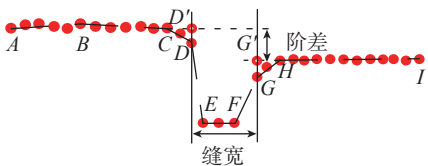


图6 点云数据
Fig.6 Point cloud data

了确定接缝两侧两条直线段的终点,从直线 AB 开始,依次计算两条相邻直线之间的夹角,若夹角大于阈值 θ ,则认为这两条直线属于同一条直线,将这两条直线合并,并依次计算下一个夹角,直到夹角小于 θ 为止,则该点可认为是直线段的终点。如图 6 所示,设 $\theta=160^\circ$, $\angle ABC > 160^\circ$ 、 $\angle BCD < 160^\circ$,因此点 C 为左侧直线段的终点,将 AB 与 BC 点云合并,并重新拟合为直线 AC ,则 AC 为接缝的左侧直线段。同理,可得 HI 为接缝的右侧直线段, H 为直线段终点。在获得直线段的终点后,需要寻找到接缝的真实边缘点,对于左侧边缘点,可认为点 C 右侧相连的最后一个端点 D 为边缘点,对于右侧边缘,则为点 H 左侧相连的最后一个端点 G 为边缘点。本文中相连指的是两相邻点之间的距离小于 5 倍的直线段平均点间距。

在获得直线段终点与接缝边缘点后,可进行阶差与缝隙宽度的计算。在实际测量中,由于 AC 与 HI 并不严格平行,因此无法直接计算两条直线之间的距离。将边缘点 D 与 G 分别投影到 AC 与 HI 上,得到 D' 、 G' ,定义接缝处的阶差为:

$$\text{flush} = \frac{d_D + d_G}{2}$$

$$d_D = \frac{|A_3x_D + B_3y_D + C_3|}{\sqrt{A_3^2 + B_3^2}} \quad (4)$$

$$d_G = \frac{|A_4x_G + B_4y_G + C_4|}{\sqrt{A_4^2 + B_4^2}}$$

式中, $d_{D'}$ 与 $d_{G'}$ 分别为点 D' 与点 G' 到 HI 与 AC 的距离, A_3 、 B_3 、 C_3 为直线 HI 的方程系数, A_4 、 B_4 、 C_4 为直线 AC 的方程系数,阶差 flush 定义为两距离的平均值。由于 D' 与 G' 分别为点 D 与点 G 的投影点,因此, $DD' \perp AC$ 、 $GG' \perp HI$ 。则缝宽的定义为:

$$\text{gap} = \frac{d_D + d_G}{2}$$

$$d_D = \frac{|A_5x_D + B_5y_D + C_5|}{\sqrt{A_5^2 + B_5^2}} \quad (5)$$

$$d_G = \frac{|A_6x_G + B_6y_G + C_6|}{\sqrt{A_6^2 + B_6^2}}$$

式中, d_D 与 d_G 分别为点 D 与点 G 到 GG' 与 DD' 的距离, A_5 、 B_5 、 C_5 与 A_6 、 B_6 、 C_6 分别为直线 GG' 与 DD' 的方程的系数, gap 定义为两距离的平均值。

对每一条接缝,可以每隔几个点取一列点云数据进行分析,因此相对于线结构光扫描,光栅投影测量的方法获得的数据更加密集,并且一次测量即可完成视场内所有接缝的分析,效率较高。

试验验证

为了验证本文所提算法的有效性,采用 Super-Scan 三维扫描仪,按照上文所提方法,对图 4 中标准件缝隙进行测量,其中标准件上共加工了边缘有倒角和无倒角两种类型的缝隙。无倒角缝隙包括 4 种不同规格,有倒角间隙包括 2 种不同的规格,如表 1 所示。其中,缝隙与阶差的尺寸加工精度均为 0.005mm。扫描仪的测量幅面是 200mm × 150mm,单次测量时间小于 3s。

对每个缝隙,均在不同位置取了 15 组点进行分析,所得结果如表 1 及图 7 所示。从表 1 中可以看出,在不同缝宽与阶差的条件下,所得结果的平均值误差均小于 0.03mm,并且最大误差均小于 0.05mm。另外,由于阶差是指两条拟合直线之间的

距离,理论上对边缘点的选取不敏感,因此阶差的提取精度高于缝隙宽度的提取精度,从表 1 的结果可以很明显看出。缝隙宽度的提取精度与边缘点的选取和点距有关,如果点距过大,在边缘点选取有误的情况下,缝隙宽度误差可能会达到一个点距的大小。本文中所用设备点距在 0.04mm 左右,从表 1 可以看出,有 4 组缝隙的最大误差在 0.04mm 左右,这些误差即是由边缘点的选取错误造成的。因此,在条件允许的情况下,应该尽可能降低点距,可以通过增大相机分辨率、减小测量视场或减小测量距离来实现,但是这样又会造成测量效率的降低和成本的增加,所以应当根据测量的精度要求,来合理规划设备的硬件配置和测量条件。

对于有倒角和无倒角的情况,从表 1 中可以看出,其精度并没有明显的不同,因此本文所提方法,具有较强的适应性。

结论

本文基于光栅投影测量技术,对飞机蒙皮对缝间隙与阶差测量方法进行了研究,建立了间隙与阶差的计算模型。相对于线结构光扫描,本文方法可实现接缝区域的自动定位与分析,并且一次测量即可完成视场内所有接缝的分析,效率较高。试验分

表 1 测量结果

mm

倒角类型	标准值	均值	均值误差	标准差	最大误差
无倒角	缝宽:2	1.981	0.019	0.011	0.022
	阶差:0	0.003	-0.003	0.001	0.004
	缝宽:2	2.005	-0.005	0.016	0.040
	阶差:2	2.002	-0.002	0.004	0.006
	缝宽:3	2.970	0.030	0.011	0.044
	阶差:2	2.006	-0.006	0.010	0.024
	缝宽:4	4.005	-0.005	0.015	0.016
	阶差:3	2.996	0.004	0.030	0.034
有倒角	缝宽:2	1.999	0.001	0.018	0.036
	阶差:0	0.007	-0.007	0.003	0.011
	缝宽:2	2.000	0	0.018	0.037
	阶差:2	2.007	-0.007	0.013	0.020

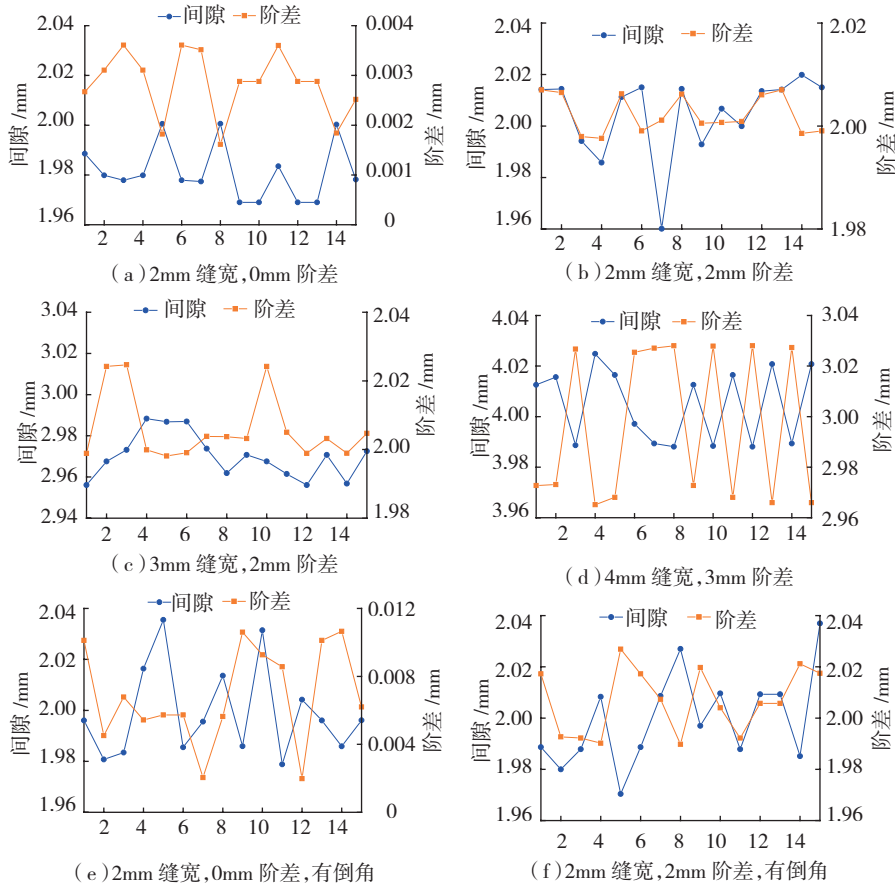


图7 不同缝宽与倒角接缝测量结果

Fig.7 Measurement results of seams with different width and chamfer

析表明,本文所提检测方法均值误差小于0.03mm,最大误差小于0.05mm,可以满足飞机蒙皮接缝检测的需求。

参考文献

[1] 蒋滔,方辉,董秀丽.飞机蒙皮铆接质量视觉检测系统的构建[J].航空制造技术,2017,60(6):88-91.

JIANG Tao, FANG Hui, DONG Xiuli. Construction of visual inspection system for riveting quality of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 88-91.

[2] 吴丽丽,王燕,刘胜兰,等.飞机蒙皮零件三维光学测量技术条件研究[J].航空制造技术,2016,59(19):105-109.

WU Lili, WANG Yan, LIU Shenglan, et

al. Research on technical specification for 3D optical measurement on aircraft skin parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(19): 105-109.

[3] 岳胜,代多兵,安鲁陵.飞机结构装配间隙超差分析与对策[J].航空制造技术,2013,56(12):81-84.

YUE Sheng, DAI Duobing, AN Luling. Analysis and countermeasure for out-of-tolerance clearance in structural assembly of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 81-84.

[4] 许大师,杜福州.基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究[J].航空制造技术,2017,60(5):77-81.

XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference

and gap between aircraft skins based on linear structural light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.

[5] 张卡.面向飞机蒙皮接缝的线结构光检测技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.

ZHANG Ka. Study of detecting aircraft skin joint based on structured light vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[6] 沈昌力.飞机装配阶差与间隙视觉测量技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.

SHEN Changli. Research on aircraft assembly stepped difference and gap vision measurement technique[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[7] 马张健.飞机蒙皮接缝信息自动提取技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.

MA Zhangjian. Study of the aircraft skin information automatic extraction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[8] 吴兴江.基于激光的便携式飞机装配接缝质量检测仪及应用[J].计测技术,2011,31(5):22-26.

WU Xingjiang. A portable laser instrument for inspecting airplane assembly seam[J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(5): 22-26.

[9] 严成,黄翔,李泷泉,等.基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究[J].航空制造技术,2017,60(10):70-74.

YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuangqiao, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74.

[10] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 20(2): 113-125.

通讯作者:夏仁波,副研究员,主要从事三维测量、目标识别、数字图像处理等方面的研究, E-mail: xiarb@sia.cn.

Research on Measurement Technique of Flush and Gap Between Aircraft Skins Based on Grating Projection Technology

(下转第50页)

Research on Application Framework of Measurement Planning Based on Model Definition and Quality Evaluation

DU Fuzhou, GUO Ruizhen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The technology of three-dimensional inspection planning for parts is studied. An inspection planning and quality assessment framework based on multi-geometric characteristics is proposed. Then it is introduced through measurement requirements expression based on MBD, inspection planning, measurement execution and data preprocessing, and quality assessment. Finally, the prototype system was developed in the CATIA secondary development platform and the preliminary verification was carried out. The research provides technical support and methodological guidance for engineering and comprehensive evaluation of model-based measurement planning technology.

Keywords: Measurement plan; Quality assessment; CATIA; MBD; Digital test

(责编 逸飞)

(上接第36页)

CHEN Songlin^{1,2}, XIA Renbo¹, ZHAO Jibin¹, ZHANG Hongyao^{1,2}, HU Maobang^{1,2}

(1. Equipment Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] Aiming at dealing with the problem of digital detection of flush and gap between aircraft skins, the measurement technology of detection method is studied based on the grating projection technology. Firstly, the dense point cloud data of surface to be measured is obtained using the technology of grating projection; Then, the seam area is positioned from the image, and the point cloud data of the seam area is obtained according to the correspondence between the point cloud and the image; After that, the point cloud data is analyzed and the joint on both sides of a straight line segment is determined. And based on them, the flush and gap are calculated. Compared to the structure line technology, the proposed method can obtain more data. Besides, we can analyze all seams during one measurement and thus, the detection efficiency is very high. The experimental results show that the mean error of the proposed method is less than 0.03mm and the maximum error is less than 0.05mm, which can meet the requirements of aircraft skin seam testing.

Keywords: Aircraft skin; Grating projection measurement; Seam; Flush; Gap

(责编 李丹)

(上接第43页)

machine tool carried the vision sensor to each pre-determined position to grab image of each connection hole. The system software extracted and located the actual information of the connection holes from the image in a parallel processing way. An error evaluation procedure was developed in the software to finally complete the non-contact rapid connection hole inspection. The work flow, software and hardware architecture of the system were introduced. The key techniques such as the calibration of system parameters, the generation of NC inspection codes and the error evaluation method were discussed in detail. The inspection results of actual aircraft parts demonstrate that the efficiency of the developed on-machine vision inspection system is as high as 5s/hole, and the precision is about 0.01mm. It well satisfies the inspection requirements of large quantity of small size connection holes distributed on complex surfaces.

Keywords: Connection hole; On-machine inspection; Vision inspection; Image acquisition; Error evaluation

(责编 逸飞)