

# 基于激光扫描的飞机蒙皮下陷特征点提取<sup>\*</sup>

李 栋<sup>1</sup>, 李泷杲<sup>2</sup>, 李 琦<sup>2</sup>, 高 瑞<sup>2</sup>

(1. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 飞机蒙皮下陷加工质量对飞机的整体重量有较大影响,对维持外形表面也有着重要作用,在大型飞机蒙皮的制造中,对飞机蒙皮下陷的加工精度也提出了较高的要求。提出了一种基于激光扫描的蒙皮下陷特征点提取方法,以达到实现飞机蒙皮下陷特征数字化检测的目的。首先,对扫描线点云数据进行扫描线的识别区分,并进行三维数据降维处理;然后,通过一阶差分计算每一点的前后一阶导数,通过判断矢量角度提取下陷点,并通过比较下陷点的曲率寻找到下陷位置的边界点;最后,将边界点向上表面数据点拟合的直线进行投影,将获得投影点作为蒙皮下陷特征点。该方法直接处理 T-Scan 扫描获取的扫描线点云数据。通过对实际蒙皮件测量处理,试验表明该方法有较好的实用性,下陷特征点的提取精度较高。

**关键词:** 激光扫描; 蒙皮下陷; 扫描线点云; 一阶差分; 下陷特征点

## Feature Points Extraction of Aircraft Skin Sag Based on Laser Scanning

LI Dong<sup>1</sup>, LI Shuanggao<sup>2</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, GAO Rui<sup>2</sup>

(1. AVIC Hongdu Aviation Industry Group Ltd, Nanchang 330024, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** The quality of aircraft skin subsidence has great influence on the overall weight of aircraft, and plays an important role in maintaining the appearance of the surface. In the manufacture of modern aircraft skins, the accuracy of the aircraft skin subsidence is also raised. In this paper, a method of extracting the feature points of the skin subsidence based on T-Scan measurement is proposed in order to achieve the purpose of digital detection of the plane subsidence characteristics of the aircraft. Firstly, scanning lines are identified from point clouds, and the 3D point cloud data is reduced to two dimensional data. Subsequently, the first and last derivatives of each point are computed by first order difference, the sag points are extracted by judging the vector angle, and the the boundary points are found by comparing the curvature of the sag points; Finally, the boundary points are projected to the line, which is fitted with data points on upper surface, projection points will be obtained as feature points of skin sag. The method directly deals with the scan line cloud data obtained by T-Scan scanning; Through the measurement and processing of actual aircraft skin, the experiment shows that the method has good practicability, the extraction precision of sag feature points is higher.

**Keywords:** Laser scanning; Aircraft skin sag; Scanning point cloud; First order difference; Feature points of skin sag

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.096

飞机蒙皮件的加工质量将直接影响飞机的性能,因此飞机蒙皮件的检测是飞机制造生产过程中的重要环节。飞机蒙皮件的主要检测特征有外形、轮廓、下陷等,传统的检测方式是采用样板、模胎等人工比对的方式,测量精度受人为操作的影响较大。

蒙皮下陷特征一般通过数控机床端铣加工完成,主要起到对蒙皮零件减重的作用,在传统的加工制造中,

<sup>\*</sup> 基金项目: 航空科学基金项目(2016ZE52053)。

对加工精度要求并不高,但对于大型飞机来说,一块蒙皮下陷加工质量影响较小,但所有蒙皮的整体加工精度则对飞机产生较大的影响;同时由于蒙皮下陷特征比较微小,传统的检测方式难以进行。随着数字化测量设备的迅速发展,为实现飞机蒙皮下陷的数字化测量提供了测量方式。本文提出了一种基于 Leica T-Scan5(简称 T-Scan)测量的飞机蒙皮下陷特征提取方法,为实现数字化检测奠定基础。

一般的点云特征提取主要集中在两个方面,一种是基于三角网格模型点云特征提取,另一种是从散乱点云中提取特征。

基于三角网格模型的特征提取。Yang等<sup>[1]</sup>通过拟合局部二次曲面并计算二次曲面的主曲率与主方向,实现特征线的提取,该方法对噪声点云或稀疏点云不适用。刘倩等<sup>[2]</sup>采用高斯聚类的方法处理三角网格,将法矢与曲率突变的数据点作为特征点。刘胜兰等<sup>[3]</sup>采用追踪投影法确定初始特征线,通过Sanke变形满足主动轮廓能量最小实现特征线优化。但是点云模型的网格重建耗时长,网格的成形质量对特征线的提取影响较大。

直接从散乱点云中提取特征。Gumhold<sup>[4]</sup>通过邻域点协方差矩阵的特征值变化程度给每一点赋予一个权重,将点区分为不同类型的特征点(边界点、折点、平面点和角点),采用最小生成树的方法提特征线;Weber等<sup>[5]</sup>提出了基于高斯映射的点云聚类的方法提取尖锐特征的方法,通过构造某一点及其邻域点的局部三角网格的方式计算法矢,将法矢信息映射到高斯球后采用统计的方式判断是否为特征点;该算法受噪声影响较大,噪声对点云聚类的影响加大;吾守尔·斯拉木等<sup>[6]</sup>提出了一种基于平均曲率运动的尖锐特征提取方法,需要人工调节自由参数。Pang等<sup>[7]</sup>提出了采用拟合局部最小二乘曲面求取数据点的主曲率,并将主曲率绝对值较大的点判别为特征点,该方法计算复杂,但对稀疏点云模型有较好的处理效果;王小超等<sup>[8]</sup>提出了基于局部重建的点云特征提取算法,在局部区域进行三角网格重建,通过法向聚类的方式进行特征点的识别。

基于以上分析,本文提出一种基于激光扫描的飞机蒙皮下陷特征点提取的方法。不同于上述两种一般的特征点提取方法,本文同样是直接处理点云数据,但充分利用T-Scan扫描点云数据呈线性的特点,无需复杂的网格重建等工作,处理效率相对较高。通过对实际蒙皮件的测量处理,验证本文方法的特征点提取精度较高,为蒙皮下陷特征数字化检测提供一种测量方法。

## 1 蒙皮下陷特征测量分析

### 1.1 蒙皮下陷特征定义

飞机蒙皮下陷是由于采用数控端铣进行加工浅槽时形成的。浅槽一般由上顶面、过渡面与下底面构成,其中过渡面与下底面之间基本上是平滑过渡,如图1所示。

将浅槽( $S$ )定义如下:

$$S=S_{\text{GEO}} \cup S_{\text{ATTR}} \quad (1)$$

$$S_{\text{GEO}}=S_{\text{TOP}} \cup S_{\text{STRAN}} \cup S_{\text{BOT}} \quad (2)$$

式中: $S$ 表示浅槽, $S_{\text{GEO}}$ 是加工浅槽的几何特征, $S_{\text{ATTR}}$ 是加工制造的属性信息,包括加工类型、加工厚度及加工

材料等信息。 $S_{\text{TOP}}$ 是浅槽的上表面几何特征, $S_{\text{STRAN}}$ 是过渡面几何特征, $S_{\text{BOT}}$ 是下底面几何特征。

由于过渡面与下底面之间基本属于平滑过渡,下陷特征一般由上表面与过渡面构成。为了便于实现下陷特征的数字量表达,将上表面与过渡面之间的交线作为检测对象,本文称之为检测线 $l_s$ ,如图2所示。蒙皮下陷特征定义如下:

$$l_s=S_{\text{TOP}} \cap (S_{\text{STRAN}} \cup S_{\text{BOT}}) \quad (3)$$

### 1.2 T-Scan扫描测量分析

本文选用的测量工具为T-Scan,T-Scan的测量方式是一种非接触式测量,对测量材质、光照强度及环境噪声等影响因素并不敏感。T-Scan扫描获得的数据是呈离散点云数据,点云数据呈线性有序排列。首先选定扫描的开始方向,在该方向垂直面内按照垂直角度的步频率获取起始扫描线上的各离散点,然后沿着扫描方向增加角度步频率,获取下一列扫描线上的离散点,依次对特征扫描直至获取覆盖特征的全部离散点数据<sup>[9]</sup>。T-Scan具有较高的数据采集效率,IS中最多能够采集210000个点<sup>[10]</sup>,平均数据采集率为7000点/s。高效高精度的数据采集特点在微小特征的测量方面具有较大的优势。

利用T-Scan在蒙皮下陷位置处进行扫描,测量的点云数据如图3所示。图4显示了其中单条扫描线的数据点分布特点,可以看出,蒙皮下陷位置处的高度差较小,同时下陷的下表面是由铣刀铣出来的,下表面的

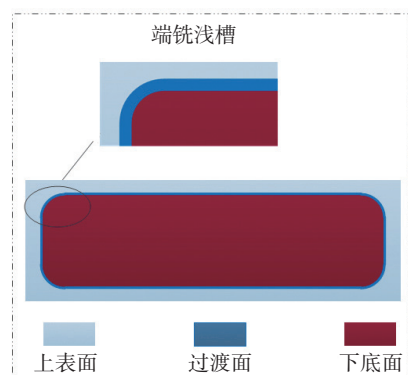


图1 端铣浅槽  
Fig.1 Milling slots

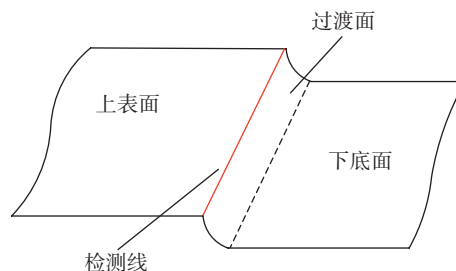


图2 下陷特征定义  
Fig.2 Definition of aircraft skin sag

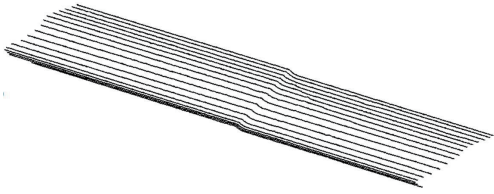


图3 下陷特征测量点云

Fig.3 Measurement point cloud of aircraft skin sag

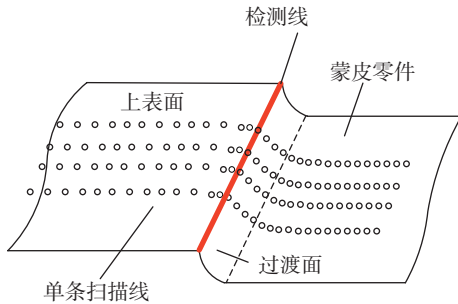


图4 单条扫描线测量数据点分析

Fig.4 Data points of single scan line

曲率变化较小,下表面上的点云平滑过渡,故仅在下陷位置处有微小的曲率变化。因此,蒙皮下陷特征点的提取主要针对蒙皮下陷上表面与过渡面相交处的特征点。

## 2 下陷特征点提取算法

### 2.1 算法基本原理

首先,根据 T-Scan 扫描线点云呈线性的特点,识别梳理区分各根扫描线;然后,对每条扫描线上的三维数据点进行平面拟合并转换到  $XOY$  平面上的二维数据点,实现三维数据的降维;对转换后的二维数据点求取数据点的离散一阶差分,根据曲率的变化获得下陷处的数据点,将曲率最大点作为该扫描线的分界点;最后,距分界点  $(0.3 \times 2) \text{ mm}$  的上顶面数据点使用最小二乘法进行直线拟合,获取分界点在直线上的投影点,将该投影点作为蒙皮下陷特征点。提取流程如图 5 所示。

### 2.2 算法分析及具体实现

对蒙皮下陷扫描点云数据处理包括:扫描线识别;点云降维处理;下陷段数据点识别;下陷分界点获取;下陷特征点提取。

#### 2.2.1 扫描线识别

首先识别点云数据中所有的扫描线<sup>[11]</sup>。T-Scan 扫描线的数据点有序排列且序号首尾相接,对于两条扫描线来说,一条扫描线的尾点与另一条扫描线的首点之间的距离要远大于扫描线内的点间距。因此,首先设定识别阈值  $d_r$ ,一般  $d_r$  大于 10 倍的扫描点间距,即  $d_r > 10d'$ ,  $d'$  为 T-Scan 的扫描点间距,然后按照以下步骤进行识别:

步骤 1: 依次遍历点云所有数据点,并计算相邻两点间  $p_i, p_{i+1}$  的欧拉距离  $d_{i+1,i} = \|p_{i+1} - p_i\|$  ( $i=0,1,\dots,n-1$ );

步骤 2: 比较  $d_{i+1,i}$  与  $d_r$  的大小,若  $d_{i+1,i} > d_r$ ,则点  $p_{i+1}$  为扫描线的起始点;反之,重读步骤 1;直至遍历完所有的数据点,获得每条扫描线的起始点坐标,得到扫描线总数。

#### 2.2.2 点云降维处理

点云降维处理是指将三维的点云数据转换为二维数据点,以减小处理误差,提高点云数据的处理效率。

处理过程包括 3 方面:空间平面拟合、投影变换和平面转换。

(1)空间平面拟合。

对下陷扫描点云每条扫描线上的点采用稳健特征值法进行空间平面拟合<sup>[12]</sup>,最终获取平面方程的方程参数。

设空间平面方程为:

$$ax+by+cz+d=0 \quad (4)$$

式中,  $a, b, c$  为平面的单位法矢,  $a^2+b^2+c^2=1$ ;  $d$  为坐标原点到平面的距离。确定空间平面则需要确定  $a, b, c, d$  4 个参数。

设每条扫描线上的数据点为  $p_i(x_i, y_i, z_i)$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 由点到平面的距离公式可知,则任一数据点  $p_i(x_i, y_i, z_i)$  到该平面的距离为

$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i + d| \quad (5)$$

获取的最佳拟合平面应该满足所有数据点至拟合平面的距离的和最小,即满足:

$$e = \sum_i d_i^2 = \sum_i (ax_i + by_i + cz_i + d)^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

不同于采用最小二乘的方法求取参数,本文采用更加稳健的特征值法求解平面参数,方法为:

$$\text{令 } C = \begin{pmatrix} \Delta x_0 & \Delta x_1 & \dots & \Delta x_n \\ \Delta y_0 & \Delta y_1 & \dots & \Delta y_n \\ \Delta z_0 & \Delta z_1 & \dots & \Delta z_n \end{pmatrix}$$

式中,  $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ ,  $\Delta y_i = y_i - \bar{y}$ ,  $\Delta z_i = z_i - \bar{z}$ ,  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  为点

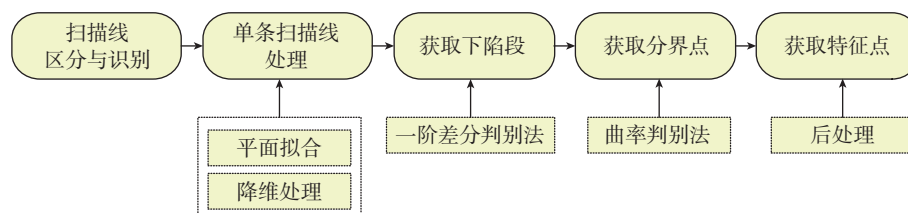


图5 下陷特征点提取流程

Fig.5 Extraction process of aircraft skin sag feature points

云数据点的几何中心。再令  $A=CC^T$ , 其中  $A$  为  $3 \times 3$  的实对称矩阵, 其最小特征值  $\lambda_{\min}$  对应的特征向量即为平面方程参数  $a, b, c$ 。

由公式(2)和(3)可知, 拟合平面对异常点比较敏感, 为了降低点云数据中的异常点的影响, 本文在特征值法求解的基础上, 再加入 T-Scan 平面测量不确定度这一参数, 识别并提出异常点。具体步骤如下:

步骤 1: 首先由特征法确定初始值  $a, b, c$ 。

步骤 2: 利用初始值  $a, b, c$  计算每个点到拟合平面的距离  $d_i$ , 当  $d_i > u$  ( $u$ : T-scan 平面测量不确定度) 时, 剔除该点, 反之, 保留该点。

步骤 3: 重复步骤 1, 2, 直至所有点的  $d_i$  满足 T-Scan 平面测量不确定度的要求, 即  $d_i < u$ , 此时  $a, b, c$  即为拟合平面的最佳参数。

### (2) 投影变换。

通过上述方法获得空间平面的方程为:

$$ax+by+cz+d=0 \quad (7)$$

设测量点  $p_i(x_i, y_i, z_i)(i=0, 1, \dots, n)$  在拟合平面上的投影点为  $p'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ , 且满足:

$$\begin{cases} x'_i = x_i - ak \\ y'_i = y_i - bk \\ z'_i = z_i - ck \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $k=ax_i+by_i+cz_i+d$ 。

### (3) 平面转换。

为了降低数据处理的难度, 将三维的投影点进一步降维成二维数据点。将拟合的空间平面进行旋转变换, 使其与某一坐标平面重合, 三维数据中的一个坐标分量相同。本文方法将空间平面旋转至与  $XOY$  平面平行。

将空间拟合平面旋转至与  $XOY$  平面平行。设旋转矩阵为  $R$ , 平面  $XOY$  的单位法矢为  $\gamma=[0, 0, 1]^T$ , 空间拟合平面的单位法矢为  $\beta=[a, b, c]^T$ , 则利用下面的公式进行求解旋转矩阵。

$$R=I-2ss^T \quad (9)$$

式中,  $I$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵,  $s=(\gamma-\beta)/\|\gamma-\beta\|$ 。

则空间拟合平面上的投影点  $p'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$  旋转至  $XOY$  平面上的点坐标为:

$$[x''_i, y''_i, z''_i]^T = R \cdot [x'_i, y'_i, z'_i]^T \quad (10)$$

式中,  $[x'_i, y'_i, z'_i]^T$  为原始空间坐标;  $[x''_i, y''_i, z''_i]^T$  为旋转后的平面坐标。

### 2.2.3 下陷段数据点识别

经点云降维处理后, 三维空间扫描数据转换为二维平面坐标点。该扫描线由一系列曲线连续阶的数据点组成, 这些数据点在一定程度上反映了扫描线所在位置处的下陷的特征分布情况<sup>[13]</sup>。蒙皮下陷处的高度差较小, T-Scan 的扫描数据点在蒙皮下陷处一般有 4~6 个

数据点, 这些数据点反映了蒙皮下陷特征信息。

由于蒙皮下陷处存在微小的曲率变化, 因此本文采用离散一阶差分计算每条扫描线上的每个数据点的一阶导数。设数据点  $P_j$  出的一阶导数为  $C$ , 每隔  $k=5-8$  个点采用离散一阶差分计算在数据点处的  $P_j$  一阶导数:

$$C'(P_j-) = (P_{j-k} - P_{j-2k}) + (P_j - P_{j-2k}) \frac{\|P_j - P_{j-k}\| + \|P_{j-k} - P_{j-2k}\|/2}{\|P_j - P_{j-k}\|/2 + \|P_{j-k} - P_{j-2k}\|/2} \quad (11)$$

$$C'(P_j+) = (P_{j+2k} - P_{j+k}) + (P_{j+2k} - P_j) \frac{\|P_{j+k} - P_j\| + \|P_{j+2k} - P_{j+k}\|/2}{\|P_{j+k} - P_j\|/2 + \|P_{j+2k} - P_{j+k}\|/2} \quad (12)$$

由于下陷处存在微小的曲率变化, 因此该处数据点的前后导数存在一个较小角度变化。通过判断该点处角度大小进行判别是否为下陷点。矢量  $C'(P_j-)$  和矢量  $C'(P_j+)$  的角度大小可以表示为:

$$\theta = \text{angle}(C'(P_j-), C'(P_j+)) > \alpha \quad (13)$$

式中,  $\alpha$  为由实际经验给定的角度阈值, 一般可取  $6^\circ \sim 8^\circ$ 。

对扫描线上的数据点依据公式(11)和公式(12)求解一阶导数, 并进行公式(13)的角度判断, 若满足要求即为蒙皮下陷点。通过上述过程即将扫描线上的下陷位置处的数据点提取出来。

### 2.2.4 分界点获取

蒙皮下陷处下表面是通过铣切形成的, 该区域的过渡较为平滑, 曲率变化较小; 下陷处上表面的曲率变化较大, 因此, 上表面曲率最大的位置点即为蒙皮下陷的边界点。由于离散数据点没有任何拓扑信息, 本文通过构建局部三角形的方式求解每一数据点的曲率值, 具体求解方法如下:

下陷位置数据点集  $(P_i)_{i=1}^{N-1} = (P_1, P_2, \dots, P_{N-2}, P_{N-1})$ ,

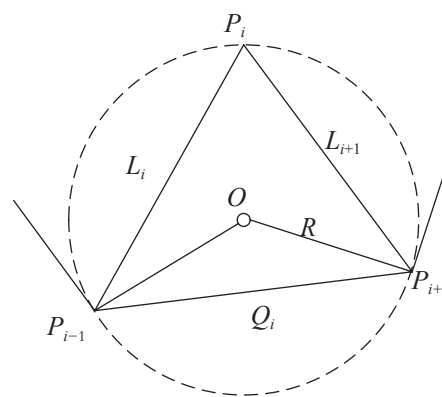


图6 基于外接圆的曲率计算

Fig.6 Curvature calculation based on circumcircle

点  $P_i$  与其相邻的 3 个数据点  $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$  构建一个三角形,见图 6。每个三角形构建一个外接圆,则外接圆的曲率即是数据点  $P_i$  的曲率<sup>[13]</sup>:

$$K_i = \frac{2\Delta P_{i-1} P_i P_{i+1}}{L_i L_{i+1} Q_i} \quad (14)$$

式中,  $L_i = \|P_i - P_{i-1}\|$ ;  $Q_i = \|P_{i+1} - P_{i-1}\|$ ;  $\Delta P_{i-1} \Delta P_i \Delta P_{i+1}$  为带符号的三角形面积;  $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$  逆时针为正,顺时针为负。

通过上述方式求解所有数据点的曲率,比较每条扫描线上的数据点的曲率大小,曲率最大的点即为该扫描线上的边界点。由于扫描线的一系列处理过程没有改变数据点原来的排列顺序,因此只需在原扫描线中找出相同位置处的点即为扫描线的边界点。对每条扫描线进行上述处理,即可获得蒙皮下陷出的所有边界点。

### 2.2.5 下陷特征点提取

蒙皮下陷是铣切加工形成的,需要检测的下陷特征是铣切面与上表面的交线;由于扫描设别 T-Scan 扫描精度的原因(最小点间距为 0.075mm),交线位置处的测量点不是精确的特征点。针对上述问题,本文通过将下陷位置上表面的点进行直线拟合,将获得边界点向直线投影,处理获得的投影点视为下陷特征点,如图 7 所示。具体步骤如下:

步骤 1: 首先取与边界点相距两个点距的前后两点,并比较两点曲率的大小,曲率小的点即为上表面点;

步骤 2: 在每条扫描线的上表面取离边界点 0.3~2mm 的数据点采用最小二乘法拟合空间直线;

步骤 3: 将边界点向直线投影,最终获得投影点即为需要获得下陷特征点。

## 3 试验验证

为了验证本文方法的实用性与特征点的提取精度,在实际加工的合格蒙皮零件上进行了试验验证。本文方法在 Matlab R2014 编程环境下编程实现, T-Scan 扫描点间距为 0.075mm,扫描线点间距为 0.1mm。

利用激光跟踪仪测量工装上的基准点,将基准点的理论值与测量值进行坐标系拟合转换,将测量坐标系转换到工件坐标系下。建立测量坐标系是拟合转换误差如表 1 示。坐标系拟合转换的最大误差为 0.040mm。根据蒙皮件检测要求,大型蒙皮件检测的公差范围为

$\pm 0.5\text{mm}$ ,基准误差值小于蒙皮最小公差一个数量级,因此测量坐标系的建立误差满足测量要求。

用 T-Scan 对实际蒙皮件的下陷位置进行扫描,如图 8 所示。采用本文提出的方法对扫描后的线性点云数据进行处理,扫描数据及特征点提取的效果如图 9 所示。

为了验证本文方法的提取精度与不同位置处的适用性。试验在 6 个不同位置处的蒙皮下陷采用 T-Scan 进行扫描测量,并 SpatialAnalyzer 软件中计算各个下陷处的提取特征点与理论检测线之间的偏差。分别统计下陷特征点与理论检测线之间的最小偏差  $e_{\min}$ 、最大偏差  $e_{\max}$ 、平均偏差  $e_{\text{av}}$  与标准偏差  $e_{\text{std}}$ ,如表 2 所示。从表 2 可以看出,对于不同位置处的蒙皮下陷,采用本文方法进行特征点提取时,下陷特征点的提取精度较高(图 10),同时算法的适用性较高,可以满足实际测量需要。

特征点提取误差分析:

(1) 设备因素。

本文选用的是 Leica T-Scan5,其空间长度的测量

表1 基准点坐标拟合误差 mm

基准点	dx	dy	dz	dI
1	-0.024	0.015	-0.021	0.021
2	0.034	0.018	0.040	0.040
3	-0.025	0	0.025	0.025

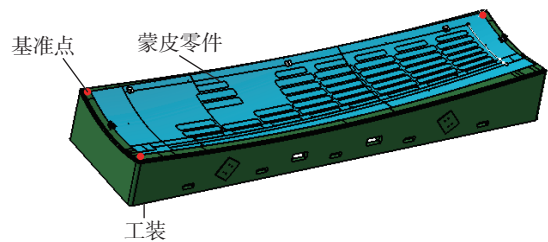


图8 蒙皮零件与工装

Fig.8 Aircraft skin parts and tooling



图9 T-Scan测量

Fig.9 T-Scan measuring

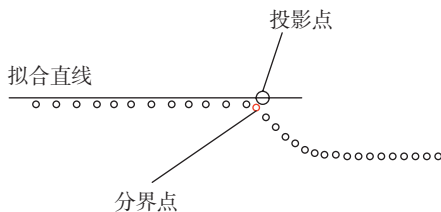


图7 下陷特征点提取

Fig.7 Extraction of feature points

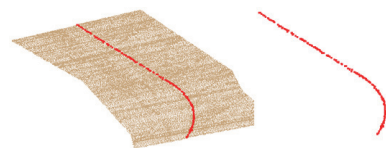


图10 下陷特征点提取效果

Fig.10 Extraction result of feature points of sag

表2 不同位置处下陷特征点提取精度分析 mm

位置	点云数目 / 个	扫描线数 / 条	$e_{\min}$	$e_{\max}$	$e_{\text{av}}$	$e_{\text{std}}$
1	30923	171	0.131	0.272	0.151	0.032
2	40056	245	0.145	0.282	0.162	0.041
3	30876	165	0.129	0.264	0.143	0.030
4	35686	189	0.135	0.283	0.156	0.035
5	30978	171	0.126	0.273	0.145	0.028
6	40127	223	0.139	0.277	0.153	0.034

误差为  $U_L=60\mu\text{m}(L<8.5\text{m})$ , 而整个蒙皮零件的长度小于 8.5m。因此, 只从设备自身的角度来看, 点云数据的测量误差对下陷特征提取的影响较小, 可以忽略不计。

#### (2) 提取算法因素。

本文是通过一阶差分求导与曲率判别法进行分界点的识别, 然后进行下陷特征的重构提取。该方法比较依赖于分界点判别的准确与否。在实际测量时, 由于手持操作的影响, 可能会引入一些异常点, 如离群点及小尺度噪声点等。

## 4 结论

本文提出了对飞机蒙皮下陷特征的数字化测量与测量数据处理的新方法: 采用激光扫描仪 T-Scan 对蒙皮下陷进行扫描获得扫描线点云数据; 首先通过降维处理, 将三维点云数据转换至二维平面点云数据; 然后都过离散一阶差分计算点云数据的一阶导数, 设置阈值将下陷段数据点识别出来; 最后通过计算每一点的曲率值, 并比较曲率的大小将下陷处的边界点提取出来; 以最大曲率边界点作为分界点, 将分界点前的上表面数据点拟合直线, 将边界点向直线投影获得投影点作为下陷特征点。通过对实际蒙皮件进行测量处理, 将提取出的特征点与理论数模进行比对, 试验结果表明, 本文提出的方法有较高的提取精度与较强的适应性, 对飞机蒙皮下陷特征的数字化检测有较大的应用价值。但在实际的测量过程中, 需要注意 T-Scan 的扫描方向, 扫描线应近似垂直于下陷特征线, 当与下陷线平行时, 无法进行测量数据的处理。

## 参考文献

- [1] YANG M, LEE E. Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(7): 449-457.
- [2] 刘倩, 耿国华, 周明全, 等. 基于三维点云模型的特征线提取算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 933-937.
- LIU Qian, GENG Guohua, ZHOU Mingquan, et al. Algorithm for feature line extraction based 3D point cloud models[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(3): 933-937.
- [3] 刘胜兰, 周儒荣, 张丽艳. 用主动轮廓模型优化网格曲面上的

特征线[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4): 439-443.

LIU Shenglan, ZHOU Rurong, ZHANG Liyan. Feature line optimization on triangular surfaces using active contour model[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2004, 16(4): 439-443.

[4] GUMHOLD S. Feature extraction from point clouds[C]//Proc of Imr. 2001: 293-305.

[5] WEBER C, HAHMANN S, HAGEN H. Sharp feature detection in point clouds[C]// Shape Modeling International Conference. IEEE Computer Society, 2010: 175-186.

[6] 吾守尔·斯拉木, 曹巨明. 一种新的散乱点云尖锐特征提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 1-5.

WUSHOUR Slam, CAO Junming. An extraction algorithm for sharp feature from point clouds[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12): 1-5.

[7] 庞旭芳, 庞明勇, 肖春霞. 点云模型谷脊特征的提取与增强算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1073-1083.

PANG Xufang, PANG Mingyong, XIAO Chunxia. An algorithm for extraction and enhancing valley-ridge feature from point sets[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1073-1083.

[8] 王小超, 刘秀平, 李宝军, 等. 基于局部重建的点云特征点提取[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5): 659-665.

WANG Xiaochao, LIU Xiuping, LI Baojun, et al. Feature detection on point cloud via local reconstruction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(5): 659-665.

[9] 朱宁宁, 姚方芳. 点云密度设置在激光扫描中的应用研究[J]. 河南城建学院学报, 2014, 23(1): 63-66.

ZHU Ningning, YAO Fangfang. Application of laser scan point cloud density setting[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2014, 23(1): 63-66.

[10] 张川. 飞机钣金特征数字化检测预处理技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

ZHANG Chuan. Research of digital inspection pre-planning technology for feature of aircraft sheet metal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[11] 周富强, 张广军, 江洁. 空间圆几何参数的非接触高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 604-607.

ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun, JIANG Jie. High accurate non-contact method for measuring geometric parameters of spatial circle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(5): 604-607.

[12] 刘增艺, 江开勇, 林俊义. 曲面孔位检测方法研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(7): 1048-1053.

LIU Zengyi, JIANG Kaiyong, LIN Junyi. Research on detection method of holes position for curved surface[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(7): 1048-1053.

[13] 杨伟, 陈家新, 李济顺. 基于投影的二阶段空间圆线拟合算法[J]. 工程设计学报, 2009, 16(2): 117-121.

YANG Wei, CHEN Jiashun, LI Jishun. Two-step spatial circle fitting method based on projection[J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(2): 117-121.

通讯作者: 李泷泉, 博士, 副教授, 研究方向为航空宇航制造、机械工程, E-mail: lishuangao@nuaa.edu.cn. (责编 大漠)