

激光与光电子学进展

一种面向大型结构件的激光雷达测量规划方法

赵子越¹, 魏亚飞², 李沈杲^{2*}, 曾琪², 陈芳²

¹航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

²南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 使用激光雷达对大型结构件实施测量时往往需要通过布设多个测量站位构建大尺寸测量网络, 其中激光雷达的站位及其数目是影响测量结果的关键因素。针对飞机大部件外形测量需求, 设计了一种面向大型结构件的激光雷达测量规划方法。以测量精度为约束, 以测量站位数目和测量区域划分结果为评价目标, 对待测数模进行特征离散并提取离散点法矢信息, 利用基于区域生长算法的测量站位规划方法获取初始站位及数量, 引入测量不确定度, 优化测量站位和测量区域的划分结果。实验表明, 相较于基于经验的人工测量规划, 该方法更易得到大范围、少数量的测量区域划分结果以及合理的激光雷达测量站位, 具有良好的可行性和有效性。

关键词 测量; 激光雷达; 站位规划; 区域生长; 测量不确定度

中图分类号 TN247; TP205

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2112002

Measurement Planning for Large Structural Parts Using Laser Radar

Zhao Ziyue¹, Wei Yafei², Li Shuanggao^{2*}, Zeng Qi², Chen Fang²

¹AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

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

Abstract When a laser radar is used to measure large structural parts, it is often necessary to establish multiple measurement stations to construct a large measurement network, for which the station positions and the number of laser radars are key factors affecting the measurement results. A method for laser radar measurement planning of large structural parts is designed for large component contour measurements of large aircraft component. The measurement accuracy is considered as a constraint, and the method considers the number of measurement stations and the division results of measurement area as the evaluation target. Further, a measurement mathematical model reflects the characteristics of discrete information and establishes a discrete point method. Using the method of measurement station planning based on the region growing algorithm, the initial number and location of stations are determined. Moreover, measurement uncertainty optimization considering the division of the measurement area and results is adopted. Experimental results show that compared with experience-based manual measurement planning, the proposed method is more feasible and effective in performing large-area measurements with a small number of measurement area divisions and a reasonable number of measurement stations.

Key words measurement; laser radar; station planning; region growing; measurement uncertainty

OCIS codes 120.3930; 120.3940; 140.3460

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-12-15; 录用日期: 2020-12-27

通信作者: *lishuanggao@nuaa.edu.cn

1 引言

随着制造向数字化、智能化方向发展,数字化测量技术由于其效率高、精度高、成本低、通用性强等优势被广泛应用于现代飞机的装配测量,成为现代飞机数字化装配的基础^[1]。激光雷达测量技术目前多用于气象监测^[2]、高空测绘^[3]、环境感知^[4]、三维测量^[5]等领域,而民用飞机大部件结构复杂、尺寸大,且外形表面多为自由曲面,在使用激光雷达对其表面进行测量时,难以在单一站位下对所有待测特征进行有效测量,故需要对其进行区域划分,构建多站位的全方位检测网络。

目前有关数字化测量设备的站位规划研究主要集中在两个方向,一类^[6]是从测量目标出发,通过分析待测特征和设备测量属性来规划测量设备布设,另一类^[7]是通过构建测量不确定度模型来寻找合适的测量站位。Franceschini等^[8]提出了构建多测量设备协同测量场的方法,为每个测量设备建立了测量约束和不确定度模型,分别研究了多系统测量设备的合作融合测量与竞争融合测量的不确定度,并通过研究融合测量不确定度指导测量设备的站位布设。任瑜等^[9]研究了激光跟踪仪多站位大尺寸测量网络,以覆盖能力、测量精度及总体成本作为多目标评价函数,基于遗传学算法优化了激光跟踪仪的布设,此方法对大尺寸测量网络的构建具有指导意义,但未根据实际测量需求对特定部件进行站位布设调整。周娜等^[10]通过结合激光雷达和全球定位系统(iGPS)构建了数字化测量网络,并提出了测量网络的最优布站设计,但其主要探究了混合测量网络的不确定度,因其凭借经验来人为规划测量设备站位,缺乏普适性。杨晓辉等^[11]基于混合距离、利用K-Means聚类算法实现了对待测特征的测量区域划分,但此方法需估计聚类数量。张阳等^[12]通过空间几何映射实现了对特定构件表面的测量区域划分,进而得到测量站位,此方法适用于边缘相对规则的大曲率半径构件表面,对于特殊形状和大曲率表面效果并不理想,区域划分结果不稳定。

本文针对飞机大部件表面测量需求,提出一种面向大型构件的激光雷达测量规划方法。根据特征表面的特性使测量特征离散,利用基于区域生长法的测量站位规划方法得到初始测量站位及数量。由于受到区域生长过程中初始点的影响,测量规划结果具有不稳定性,测量区域划分效果较差,因此

通过引入平均测量不确定度建立优化目标,利用多次迭代选择实现待测特征区域的合理划分,在满足测量精度要求的前提下输出合理的测量站位和测量区域。

2 测量模型预处理

2.1 测量约束模型构建

对飞机大部件表面实施测量时,需要通过布设测量站位构建一个包络部件外形的多站位全方位测量网络,构建正确的测量约束模型是实现合理布设测量站位的前提。建立如图1所示的测量约束模型,点A为测量设备光源出射点,点B、点D为构件表面待测点,沿点B法向反方向延长,与点D法线反方向延长线交于点C,点A、点B、点C、点D共面。测量设备的最大俯仰范围为 α ,测量设备入射角最大为 θ ,则经几何运算可知 β 值的范围为 $0^\circ \sim 2\theta$ 。将测量设备有效精度内的测量半径设为 d ,则计算可知在单站位测量范围内任意两点间欧氏距离应不大于 $2d\sin\frac{\alpha}{2}$ 。

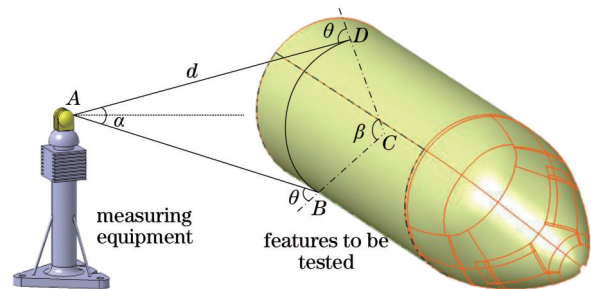


图1 测量设备测量约束模型

Fig. 1 Measurement constraints model of measure equipment

确定待测点是否满足测量约束的判断机制如下:

1) 根据测量站位 p_i ,测量点位置 c_i ,测量点方向 r_k ,俯仰约束角 α ,入射约束角 θ ,测量距离约束 d ,精度约束 F ,计算测量设备俯仰角度 α_i 、入射角度 θ_i 、测量距离 d_i 和测量精度 F_i ,其中 i 和 k 分别为测量站位和测量点的序号。

2) 若同时满足 $\theta_i \leq \theta$, $\gamma_i \leq \gamma$, $d_i \leq d$ 和 $F_i \leq F$,则认为该测量点可以被站位 p_i 有效测量;否则,该测量点不能被站位 p_i 有效测量。

2.2 特征模型离散

测量站位规划的难点在于根据待测模型特点对待测曲面进行区域划分。本研究采取先离散后

拼接的方法对待测曲面进行测量区域划分,以面片中心点代替三角面片进行计算。将三角网格剖分所得模型记为 M , 用顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 和三角片集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 组成的二元组 (V, F) 表示, 三角面片 M 内的边记为 $s_{i,j}$, 由顶点 v_i 和 v_j 连接构成。三角网格模型 M 中选择面片 f_i , 其三个顶点分别为 v_x, v_y, v_z , 则三角面片中心点为 $c_i = (v_x + v_y + v_z)/3$, 遍历 M 中三角面片, 得到面片的中心点集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_t\}$, t 为面片中心点的总数量。

常用的估算离散点法矢的方法有平面拟合法和平面估算二次曲面拟合法^[13]。前者通过在某一离散点的邻域内取点并拟合成平面, 以平面的法向作为曲面在该点处的法向。后者则使用三角剖分后的点云数据, 按照角度计算权因子来初步估计法矢, 采用最小二乘法进行二次曲面拟合修正, 通过得到的二次曲面计算法矢, 其精度相较于平面拟合法更高, 具体过程如下:

在图 2 三角网格模型中选择顶点 v_i , 找出所有包含顶点 v_i 的邻边 $s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,j}$, 假定其另一端点为 $v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,j}$, 则各边的单位方向法矢为

$$s_{i,j} = (v_{i,j} - v_i) / |v_{i,j} - v_i|, \quad (1)$$

任意相邻两边的夹角为

$$\delta_{i,j} = \arccos \left[(s_{i,j} \cdot s_{i,j+1}) / (|s_{i,j}| \times |s_{i,j+1}|) \right], \quad (2)$$

夹角权因子表示为

$$\omega_{i,j} = \delta_{i,j} / \sum_{k=1}^j \delta_{i,k}, \quad (3)$$

任意相邻两边所在平面的法矢表示为

$$n_{i,j} = s_{i,j} \times s_{i,j+1}, \quad (4)$$

则点 v_i 的初始法矢为

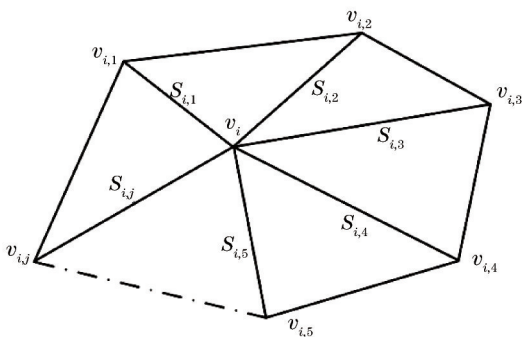


图 2 三角网格模型局部示意
Fig. 2 Part of the triangular mesh model

$$n_i = \sum_{k=1}^j (\omega_{i,k} \cdot n_{i,k}). \quad (5)$$

为计算每一顶点的修正法矢, 可在顶点 v_i 处建立曲面 $S(u, w) = [u, w, h(u, w)]^{[14]}$, 其中 $h(u, w) = au^2 + buw + cw^2$ 。 P_{huv} 坐标系是以 v_i 为原点, 以曲面在 v_i 点法矢 n_i 的方向为 h 轴, u, w 相互正交且在 v_i 的切平面内, O_{xyz} 为特征模型默认坐标系, P_{huv} 坐标系由默认坐标系 O_{xyz} 经以下变换而得: O 平移至 P , 经旋转使得 z 轴与 h 轴重合, u, w 分别可取 x 轴和 y 轴。 $v_i (1 \leq i \leq j)$ 在局部坐标系 P_{huv} 下的坐标值为 (u_i, w_i, h_i) , 由 j 个邻点得到的线性方程组为^[15]

$$\begin{bmatrix} u_1^2 & u_1 w_1 & w_1^2 \\ u_2^2 & u_2 w_2 & w_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_j^2 & u_j w_j & w_j^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_j \end{bmatrix}. \quad (6)$$

用最小二乘法构建各点到曲面距离的平方和方程, 即可求得曲面 $S(u, w)$, 进而求得修正后的顶点法矢 n_i 。遍历三角模型内所有顶点, 得到顶点法矢集合 $N_v = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 。面片中心点 c_i 所在三角面片的顶点法矢记为 n_a, n_b, n_c , 则面片中心 c_i 的法矢记为 $n_{c_i} = (n_a + n_b + n_c)/3$, 遍历所有面片中心得中心点法矢集合 $N = \{n_{c_1}, n_{c_2}, \dots, n_{c_m}\}$ 。

3 基于区域生长法和测量不确定度的测量站位规划

3.1 基于区域生长的初始测量站位规划

区域生长算法^[16]多被应用于图像处理, 其基本思想是先指定一个种子点为生长起点, 通过一定的判别依据, 将具有相似性质的点合并起来构成一个区域。借助区域生长算法的思想对待测曲面进行区域划分, 首先选取某一待测点为种子生长点, 根据待测点(集)坐标和法矢计算得到测量站位, 由测量站位反求所有满足测量约束的测量点集, 由测量点集便可计算新的测量站位, 如此往复迭代, 测量区域和测量站位趋于稳定。重复上述过程, 便可实现对待测曲面的区域划分, 得到对应区域的测量站位。

根据待测点集坐标和法矢求取测量站位的过程如下: 如图 3 所示, 计算点集的位置中心 c_k 和方向中心 r_k , 以位置中心 c_k 为起点, 方向中心 r_k 为偏置方向, 距离 d 为偏置距离, 即可得到由起点 c_k 沿偏置方向 r_k 移动偏置距离 d 后的测量站位 p_k 位置。其中,

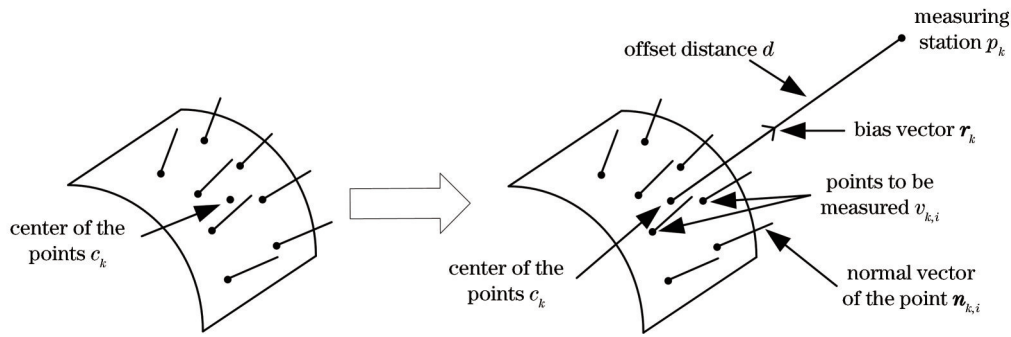


图 3 测量站计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement station calculation

待测点集中心的计算公式为

$$c_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_{k,i}, \quad (7)$$

$$r_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_{k,i}, \quad (8)$$

式中, c_k 、 r_k 分别为待测点集的位置中心和方向中心, $v_{k,i}$ 、 $n_{k,i}$ 、 m 分别为第 k 个待测点集包含测量点的坐标、法矢和测量点数目。

以三角面片的中心点代替此三角面片进行测

量站运算(图 4), 若三角面片中心点可以被某测量站在约束范围内测量得到, 则认为该三角面片映射曲面面积内任一点均满足该测量站的测量约束要求。三角面片作为测量范围的最小划分区域, 单一测量区域内往往包含多个三角面片, 这里将测量站 p_i 对应的测量区域记为 Ω_{MF_i} , 对应的待测点集合记为 $P_{J,i}$, 未分配测量站位的三角面片集合记为 F_E , 未分配测量站位的待测点集合记为 P_E 。

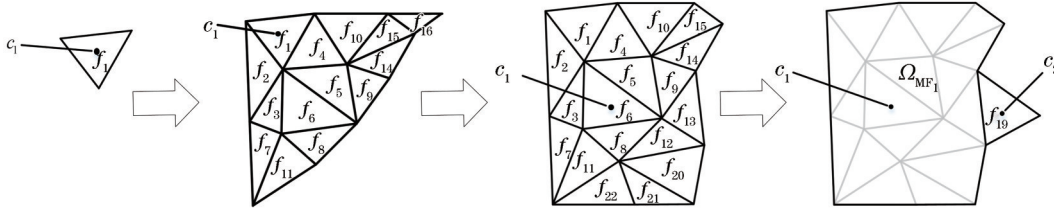


图 4 区域生长法站规划过程

Fig. 4 Process of method station planning with regional growing

区域生长法站规划流程如下。

输入: 三角网格模型 M , 包括三角面片集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 面片中心点集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 顶点法矢集合 $N = \{n_{c1}, n_{c2}, \dots, n_{cm}\}$ 。

1) 初始化测量站个数 $i=1$, 初始化 $F_E = F$, $P_E = C$, 定义每个面片集合的初始面片为 f_s ;

2) 若 $i=1$, 选取面片 f_1 记为 f_s , 否则选取面片集 $\Omega_{MF_{i-1}}$ 相邻边界的三角面片为 f_s 。将 f_s 加入面片集 Ω_{MF_i} , 将其中心点加入测量点集 $P_{J,i}$, 根据(7)式和(8)式分别计算点集 $P_{J,i}$ 的方向中心 r_i 和位置中心 c_i , 将位置中心沿着方向中心进行偏置计算得到面片 Ω_{MF_i} 对应的测量站位 p_i ;

3) 以测量站位 p_i 为测量站, 依次对剩余面片集合 F_E 中的三角面片依照 2.1 节内容进行测量约束判断。若面片中心点不在测量站位 p_i 测量范围内, 则对下一面片进行约束判断; 若该点在 p_i 的测量范围内, 则将该点所在面片加入面片集 Ω_{MF_i} , 将测量点加入待测点集 $P_{J,i}$ 。遍历 F_E 中所有三角面片, 得到新的面片集 Ω_{MF_i} 和待测点集 $P_{J,i}$;

4) 计算点集 $P_{J,i}$ 的方向中心 r_i 和位置中心 c_i , 将位置中心沿着方向中心进行偏置计算得到面片 Ω_{MF_i} 对应的新测量站位 p_i ;

5) 判断 Ω_{MF_i} 内三角面片数量是否发生变化, 若发生变化, 则转至步骤 3), 扩大测量区域; 若面片集 Ω_{MF_i} 内三角面片数量不再增加, 则完成本次测量站

位计算,输出测量站位 p_i 、面片集 Ω_{MF_i} 和剩余面片集 F_E ;

6) 若剩余面片集 F_E 不为空,则令 $i=i+1$,并转至步骤 2),进行下一测量站位的计算;若剩余面片集 F_E 为空,则转至步骤 7);

7) 输出测量站位个数 i ,站位坐标 $p_1 \sim p_i$,待测区域 $\Omega_{MF_1} \sim \Omega_{MF_i}$

3.2 基于测量不确定度的测量站位优化

采用上述站位规划流程对特定模型进行站位规划时,初始面片的选择不同往往会导致站位数量和布设结果不同,站位规划过程存在不稳定性。为增强站位规划结果的稳定性,在站位规划过程引入测量不确定度和站位数量为优化目标,提出引入不确定度的测量站位迭代算法,其中以最小站位数量为主要优化目标,测量不确定度为次要优化目标。

测量设备测量的原始数据为球坐标系下数据,对于空间任一测量点 P ,其坐标可表示为

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l \cos \alpha \sin \beta \\ l \sin \alpha \sin \beta \\ l \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中, l 为测量距离, α 为水平角, β 为俯仰角。

激光雷达的不确定度来源包括测量设备传感单元测量值误差、加工安装等系统误差和环境干扰误差。文献[17]认为设备生产商校准设备后用户仅需考虑仪器传感单元测量值对坐标不确定度的贡献,因此本文仅考虑设备传感单元测量值误差,并构建如图 5 所示不确定度椭球模型描述测量点的测量不确定度^[18-19]。从测量坐标系的坐标原点出发,沿激光方向为椭球 w 轴, v 轴垂直于 w 轴为椭球的极半径方向, u 轴垂直于 w 轴和 v 轴, u 轴、 w 轴、

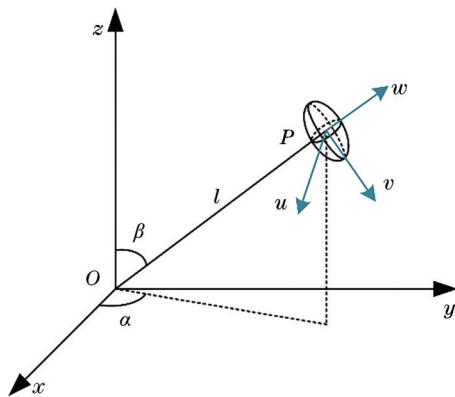


图 5 测量不确定度椭球

Fig. 5 Uncertainty ellipsoid

v 轴两两之间相互垂直。

测量值协方差矩阵可表示为

$$D_P = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_z & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\mu\nu}$ 表示 μ 和 ν 之间的相互不确定度; $\mu = \alpha, \beta, l; \nu = \alpha, \beta, l$, 且 $\mu \neq \nu$ 。

一般认为水平角测量、垂直角测量,及测距仪测量是两两相互独立的,因此激光跟踪仪原始采集数据的协方差矩阵可表示为

$$D_X = \begin{bmatrix} \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l^2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中, $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_l$ 分别为 α, β, l 的方差值。

坐标转换为非线性变换,对应的映射关系可表示为雅可比矩阵,即

$$J = \frac{\partial P}{\partial X}, \quad (12)$$

对测量值协方差矩阵进行特征分解^[17],可得

$$D_P = J \cdot D_X \cdot J^T, \quad (13)$$

其中特征值矩阵和特征值矩阵为

$$D_X = [\sigma_u^2 \quad \sigma_v^2 \quad \sigma_w^2] = \begin{bmatrix} (l \sin \beta)^2 \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 \\ 0 & l^2 \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$J = [u \quad v \quad w] = \begin{bmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中, u, v, w 为不确定度椭球坐标系的三坐标法向量, $k\sigma_u, k\sigma_v, k\sigma_w$ 为椭球半轴长度, k 为包含因子,可通过置信度查询得到。

测量标准点位的不确定度为

$$U = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}, \quad (16)$$

定义最大平均不确定度为

$$U_A = \frac{\sum_{k=1}^n U_{\max}^k}{n}, \quad (17)$$

式中, k 为站位序号, n 为站位个数, U_{\max}^k 为测量第 k 个站位时的最大不确定度。

以站位数量为主要优化目标,测量不确定度为次要优化目标,以 3.1 节所得测量站位为种子生长点进行区域生长算法迭代,得到 i 组不同的测量站

位规划结果。若其中站位数目最少的结果只有一组,则选取站位最少的一组结果;若其中站位数目最少的结果有多组,则计算其平均不确定度 U_A ,选取平均不确定度最小的一组结果。再将得到的结果作为输入量,进行迭代,直到连续两次迭代结果中站位数量不变时,从测量站位最少的结果中挑选最小的平均不确定度为最终的测量站位规划结果。具体步骤如下:

输入:由 3.1 节得出初始测量站位个数 i ,初始站位坐标 $p_1 \sim p_i$;

1) 分别以 $p_1 \sim p_i$ 为初始站位进行区域生长算法迭代,得到 i 组站位规划结果,根据 (17) 式计算各组最大平均不确定度 U_A ;

2) 选取 i 组规划中测量站位最少的结果,其站位数目记为 n ,站位数目为 n 的结果组数记为 d ;

3) 判断 n 是否大于 i ,若 n 大于 i ,转至步骤 1), 否则转至步骤 4);

4) 判断 d 是否等于 1,若 d 等于 1,转至步骤 6), 否则转至步骤 5);

5) 在站位个数均为 n 的 d 组结果中选取最大平均不确定度 U_A 最小的一组,其站位个数为 n ,站位记为 $p_1 \sim p_n$;

6) 判断 n 是否小于 i ,若 n 小于 i ,令 i 等于 n ,转至步骤 1), 否则输出测量站位个数 n ,测量站位 $p_1 \sim p_n$,待测区域 $\Omega_{MF_1} \sim \Omega_{MF_n}$ 。

4 实验验证

为实现飞机大部件测量站位规划的自动化和可视化,基于 MFC(微软基础类库)和开源三维造型库 Open CASCADE 编写测量站位自动规划软件^[20-21],实现流程如图 6 所示。

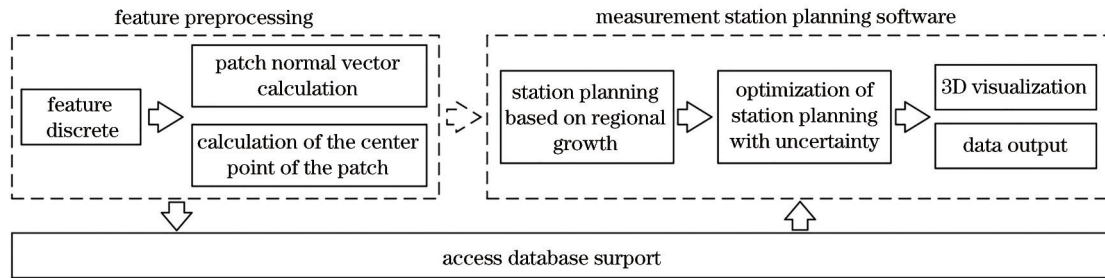


图 6 测量站位规划流程

Fig. 6 Process of measuring station planning

以 MA700 机头和前机身段外表面测量为例,测量设备选用 MV330 激光雷达(测角精度为 $1.4''$,测距精度为每米 $10 \mu\text{m} + 2.5 \mu\text{m}$),采用厂家技术手册给定的测量不确定度和文献 [12] 实验所得的精度 $F(\theta, d) = (0.019 \cdot \theta^2 + 5.07 \cdot d - 0.0476 \cdot \theta \cdot d - 5.69) \times 10^{-3}$ 为评价标准,对本文测量站位规划和优化结果进行评估。通过 CATIA(交互式 CAD/CAE/CAM 系统)分析与模拟平台的网格划分模块,设定网格尺寸为 200 mm,相对垂度为 0.1,最小网格尺寸为 50 mm,绝对垂度为 10 mm,共离散得到 2823 个三角面片和 1502 个网格顶点;设置测量设备参数,俯仰角约束为 $\pm 45^\circ$,测量站位的偏置距离为 4000 mm,入射角约束为 60° ,测量精度约束为 0.05 mm,得到如图 7 所示的测量站位规划结果。

图 7(a)为基于区域生长的初始站位规划(方法一)的结果,由于区域生长算法对生长点敏感,测站 S7 和 S11 对应的测量区域被划分为狭长区域,划

分结果不合理。而图 7(b)为引入不确定度后对站位规划结果进行优化(方法二)的结果,从中可以看出测量站位数量由 14 减为 10,单个测量区域划分更加均匀。

分析图 8(a)可知,引入测量不确定度作为优化目标后,测量站位减小导致单站测量区域面积和测量点数量增加,且各站位下测量点数量更加均匀。从图 8(b)中可以看出:测量精度受入射角和距离的双重影响,对入射角度的变化更为敏感,测量点数量增加导致测量点入射角有所增大,进而导致平均测量精度略有增加,但仍满足测量精度要求;而平均不确定度来自设备自身误差,最终取决于测量距离,两种方法下测量站位偏置距离相同,故同一站位下测量点测量距离波动较小,导致两种方法下平均不确定度均波动较小且数值相近。

表 1 给出引入不确定度的测量规划优化方法(方法二)和基于区域生长的初始站位规划方法(方法一)的结果对比分析,可知方法二规划结果中的

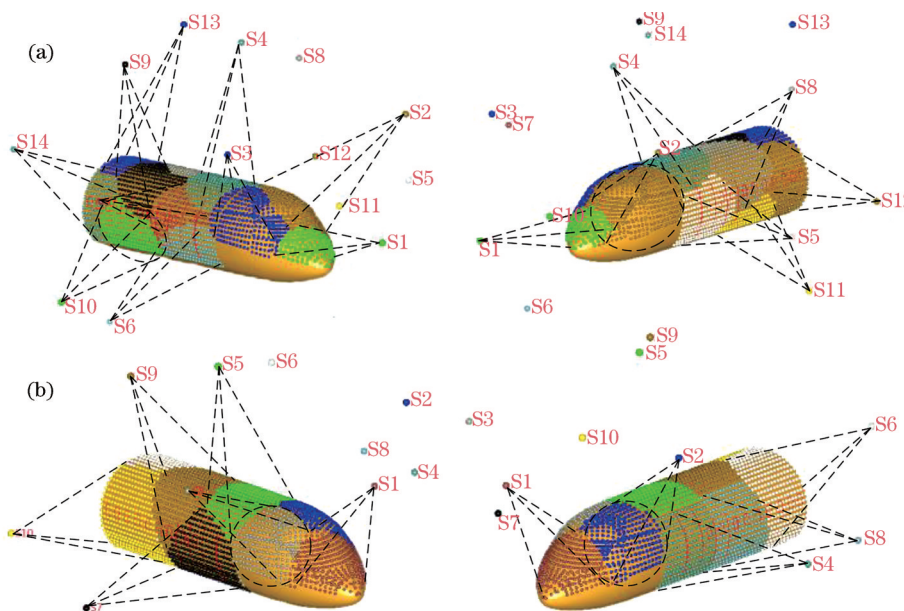


图 7 不同站位规划方法下测量区域划分结果对比。(a)基于区域生长的初始站位规划;(b)引入测量不确定度下的站位规划
Fig. 7 Comparison of regional division based on different measurement station planning. (a) Initial station planning based on regional growth; (b) station planning under measurement uncertainty

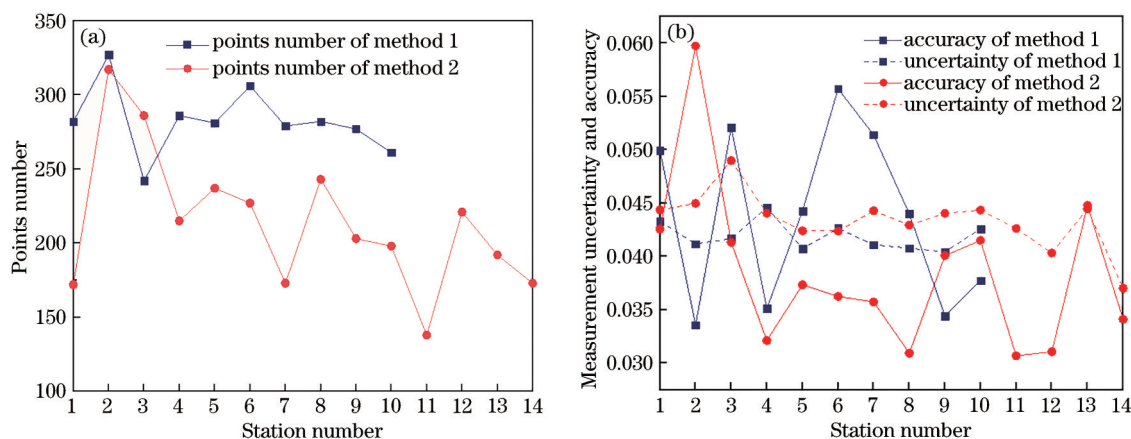


图 8 测量站位规划结果对比。(a)单个站位测量点数量对比;(b)单个站位平均测量不确定度和测量精度对比
Fig. 8 Comparison of results based on different measurement station planning. (a) Comparison of the number of measuring points for a single station; (b) comparison of average measurement uncertainty and measurement accuracy for a single station

表 1 不同测量站位规划方法结果对比

Table 1 Comparison of measurement results based on different measurement station planning method

Planning method	Number of measuring stations	Average station measurement accuracy /mm	Average station measurement uncertainty /mm
Method 1	14	0.0384	0.0434
Method 2	10	0.0438	0.0419

测量站位数量更为合理,每个站位的平均测量区域面积更大,在单个站位测量区域面积增加的情况下,方法二的平均站位测量精度略有增加,但仍满足测量需求,同时平均站位测量不确定度基本持平,达到了对飞机大部件测量规划的目的,充分体现了本文测量站位规划的可行性和有效性。

5 结 论

针对飞机大部件等大型构件外形测量需求,在数模特征离散和构建测量约束的基础上,研究了激光雷达站位规划的理论依据和规划方法,基于区域生长算法提出了一种“先离散后拼接”的测量区域

划分方法。同时,以测量站位数目和测量区域划分结果为评价目标,提出了基于测量不确定度的测量规划优化方法。结果表明:相较于聚类算法的测量区域划分方法,本文所提方法的规划过程无须给定初始站位数量,省去多次调整过程;相较于经验布设法,本文所提方法更易得到大范围、少数量的测量区域划分结果,降低了对操作人员的经验要求。

同时,由于本研究未考虑工装遮挡和测量设备区域约束等现实因素,规划条件较为理想,因此后期将从站位空间约束、测量干涉检测,以及站位空间寻优等方面进行优化,以期更好地为工程应用服务。

参 考 文 献

- [1] Zou A L, Wang L, Li D S, et al. Application of digital measuring system in aircraft assembly[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(21): 72-75.
邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(21): 72-75.
- [2] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 240101.
庄全风, 王一萌, 王章军, 等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 240101.
- [3] Yin H F, Guo L, Yang L C, et al. Full aperture imaging algorithm of airborne synthetic aperture lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0928002.
尹红飞, 郭亮, 杨利超, 等. 机载合成孔径激光雷达全孔径成像算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0928002.
- [4] Jiang J F, Li Q Z, Huang M H, et al. Real-time detection of obstacles and passable areas based on three-dimensional lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 242801.
蒋剑飞, 李其仲, 黄妙华, 等. 基于三维激光雷达的障碍物及可通行区域实时检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 242801.
- [5] Wu Z L, Cheng X J, Xin P K, et al. Calculation method of complex tank capacity based on laser point cloud and building information modeling technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 052802.
邬镇伦, 程效军, 辛佩康, 等. 基于激光点云与建筑信息模型技术的复杂船舱容积计算方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 052802.
- [6] Maropoulos P G, Guo Y, Jamshidi J, et al. Large volume metrology process models: a framework for integrating measurement with assembly planning[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(1): 477-480.
- [7] Muelaner J E, Wang Z, Martin O, et al. Estimation of uncertainty in three-dimensional coordinate measurement by comparison with calibrated points [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2): 025106.
- [8] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, et al. Combining multiple large volume metrology systems: competitive versus cooperative data fusion[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 514-524.
- [9] Ren Y, Liu F F, Fu Y X, et al. Placement optimization of laser multilateration network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011201.
任瑜, 刘芳芳, 傅云霞, 等. 激光多边测量网布局优化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011201.
- [10] Zhou N, An Z Y, Li L J, et al. Design of multi-station network arrangement for aircraft digital measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1485-1491.
周娜, 安志勇, 李丽娟, 等. 飞机数字化测量网络布站设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1485-1491.
- [11] Yang X H. Research on station planning technology of digital measuring metrology for aircraft large component [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
杨晓辉. 面向飞机大部件的数字化测量站位规划方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [12] Zhang Y. Research on station planning of digital measurement for large-scale part of aircraft based on the laser radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
张阳. 基于激光雷达的飞机大型构件测量站位规划研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [13] Huang Y T. An algorithm for accurately estimating the normal and curvature of scattered points cloud[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005(6): 8-9.
黄宇婷. 点云模型的法矢和曲率的精确计算方法[J]. *机械设计与制造*, 2005(6): 8-9.
- [14] Liu S L, Zhou R R, Zhang L Y. Feature line extraction from triangular mesh model[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*,

- 2003, 15(4): 444-448, 453.
- 刘胜兰, 周儒荣, 张丽艳. 三角网格模型的特征线提取[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(4): 444-448, 453.
- [15] Sun Q. Study on the theory and technology of quadric surface feature extracting based on point cloud[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- 孙庆. 基于点云的二次曲面特征提取理论和技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [16] Cao G P, Liu X S, Liu N, et al. Segmentation of subway tunnel wall surface objects based on laser 3D point cloud[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2110001.
- 曹桂萍, 刘行思, 刘念, 等. 基于激光三维点云分割地铁隧道壁表面物体[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2110001.
- [17] Ren Y. Research on accuracy analysis and algorithm of heterogeneous-network coordinate measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- 任瑜. 异构网络坐标测量精度分析与算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [18] Deng Z P, Li S G, Huang X. Coordinate transformation uncertainty analysis and reduction using hybrid reference system for aircraft assembly [J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 487-496.
- [19] Zeng Q, Li S G, Deng Z P, et al. An error similarity-based error-compensation method for measurement in the nonuniform temperature field[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(8): 085008.
- [20] LI S Z, Zhang Y. Research and development of virtual 3D modeling platform based on Open CASCADE[C]//Proceedings of the first China graphics conference and the 10th Annual Conference of engineering graphics in six provinces and one city of East China, August 1, 2007, Yantai, China. Beijing: China Graphics Society, 2007: 280-281.
- 李绍珍, 张渊. 基于OpenCASCADE的虚拟三维建模平台的开发研究[C]//第一届中国图学大会暨第十届华东六省一市工程图学学术年会论文集, 烟台, 中国. 北京: 中国图学学会, 2007: 280-281.
- [21] Lin X Z. Assembly and joint measurement method and experimental study of large aircraft components based on full 3-D model[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- 林雪竹. 基于全三维模型的飞机大部件装配对接测量方法及实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.