

引文格式: 周新房, 许斌. 飞机装配中激光雷达测量场布局规划方法探讨 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 72-77.

ZHOU Xinfang, XU Bin. Discussion on layout planning method of laser radar measurement field in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 72-77.

飞机装配中激光雷达测量场布局规划方法探讨

周新房, 许斌

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 激光雷达可以较为精确地测出物体空间轮廓, 在飞机制造业中具有重要作用。激光雷达因对光路可达性、光路距离、光路入射角等参数有要求, 其位置摆放必须满足一定条件。首先建立了激光雷达布局规划的几何约束要求, 分析了碰撞干涉的实现方法; 基于空间圆锥曲面和曲线, 研究了激光雷达的可放置区域的表示方法和规划方法。最后为了满足工程可实现性, 基于网格法反向推导了激光雷达布局规格的点位。所实现的布局规划方法对激光测量设备的位置规划具有一定的指导意义。

关键词: 测量场规划; 激光雷达; 飞机装配; 光路; 网格法

Discussion on Layout Planning Method of Laser Radar Measurement Field in Aircraft Assembly

ZHOU Xinfang, XU Bin

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Laser radar can accurately measure the spatial contour of objects, which plays an important role in aircraft manufacturing. Due to the requirements of laser path accessibility, optical path distance, optical path incident angle and other parameters, the location of lidar must meet certain conditions. In this paper, firstly, the geometric constraint requirements of laser radar layout planning are established, and the realization method of collision interference is analyzed. Then, based on the spatial conic surface and curve, the representation method and planning method of the placement area of lidar are researched. Finally, in order to meet the engineering feasibility, the points of the layout specification of laser radar are deduced based on the grid method. The layout planning method implemented in this paper has a certain guiding significance for the location planning of laser radar measurement equipment.

Keywords: Measurement field planning; Laser radar; Aircraft assembly; Optical path; Grid method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.08.072

在飞机制造中, 激光雷达^[1]发挥着重要作用, 工装安装、模具和复合材料检验、飞机外形检测等均需要在激光雷达辅助下完成, 其精度是影响飞机制造质量的重要因素之一。图 1 为飞机装配中激光雷达某测量站位测量示意图。激光雷达需要通过反射光确定待测物体的位置, 所以必须保证光路的可达性, 测量设备俯仰角、入射角度也必须在一定范围内。在测量时, 为了满足以上这些条件, 必须将激光雷达放置到合适位置。此外, 由于飞机产品尺寸较大, 飞机在装配过程中会有上百个测量点分布在不同部位, 所以一个站位往往难以完

成测量, 通常需要进行转站。基于以上原因, 在进行测量活动前, 必须进行测量规划, 确定各个测量站位的具体位置^[2]。

国内外对于测量测量布局规划有一定研究。王莉等^[3]对工业环境下各类测量方法进行了对比; 许振璞^[4]研究了基于遗传算法的激光跟踪仪测量点数量及位置确定方法, 受限于遗传算法本身特点, 该方法没有确定的收敛时间; 赵乐乐^[5]利用 OpenCASCADE 软件的三维可视化功能确定测点位置可行性; 金涨军^[6]建立了测量场转站误差传递模型并运用蒙特卡洛算法对该过

程进行了仿真;朱峻可等^[7]分析了激光雷达的布站规划和转站方法;张阳^[8]对测量区域划分、测量特征点集路径规划等进行了研究,提高了测量效率;栗辉^[9]对测量流程进行了优化,提高了效率。可以看出,目前相关研究并没有从原理分析测量场布局规划的核心算法。激光雷达在工程上使用,往往需要能够快速、较为精确地确定可行的布局规划方案。

目前,尚无广泛使用的激光雷达测量布局规划软件,某些激光雷达厂商开发了一些适用于特定环境的激光雷达布局仿真软件,但并不开放。本文着重分析激光雷达布局的理论模型和数学建模方法,确定激光雷达布局的工程可实现方法,以期设计出具有通用性的激光类测量设备的布局仿真分析软件。

1 规划约束

激光雷达在进行测量时,受限于自身测量原理和产品空间位置,需要遵守测量一些约束条件。站位规划的核心问题就是在这些约束条件下确定激光雷达的站位数量和位置布局。

1.1 测量约束

假设在某项测量活动中,需要测量的点位是 P_i ($i=1\cdots N$), P_i 处产品法向为 N_i ,激光雷达(理论上该位置应该为激光雷达测头所在位置,为便于讨论,本文不区分激光雷达位置和测头位置,二者只是一个偏移关系)的参考位置为 Q 。在测量时,直线段($\overline{QP_i}$)表示了光路,激光雷达对测量的要求体现在对该直线的要求。具体地,测量时需要保证以下条件(图2):

(1) 距离约束: $|\overline{QP_i}| < L$ 。 L 为激光雷达有效半径,这是受激光雷达测量范围限制的。

(2) 角度约束: $\arccos \frac{N_i \cdot \overline{QP_i}}{|N_i| \cdot |\overline{QP_i}|} < \theta$, 即 N_i 与 $(\overline{QP_i})$

的夹角在一定范围内,这是受激光雷达工作时反光特点所决定的。

(3) 干涉约束: 直线段($\overline{QP_i}$)与环境无干涉(即碰撞检测)。

满足以上条件的任何 Q 都是可以对 P_i 进行测量的。激光雷达布局就是需要找到满足所有点位要求的位置,当然,可能一个位置无法满足所有点位的要求,此时就需要多个布局点位。

1.2 碰撞检测

在几何约束中,条件距离约束和角度约束是比较容易处理的,而条件干涉约束是比较复杂的。为了处理碰撞检测,首先需要将模型表示为一种通用格式,本文选

择了 STL 格式^[10]。该格式用一系列三角面片表示实体,每个面片由 3 个点表示,结构简单,易于处理,且大多数建模软件都支持这种格式的导出。这种格式虽然丢失了产品数模的一些信息(如颜色、材料等),但其外形的几何尺寸都保留了下来,对于激光雷达而言,最重要的就是其外形结构和尺寸,所以选择 STL 是完全能够满足使用要求的。

因为在 STL 格式里,产品是由三角面片表示的,对 STL 格式进行碰撞检测,本质就是对三角面片进行碰撞检测。所以只需要求出直线段 $\overline{QP_i}$ 与三角面片是否碰撞即可。

如图 3 所示,三角面片与直线碰撞就是三角面片与直线相交。三角面片的 3 个点 S_1 、 S_2 、 S_3 确定了一个平面 S , 平面的法向为 $\overline{S_1S_2} \times \overline{S_2S_3}$, 假设直线段 $\overline{QP_i}$ 和三角面片交于点 C , 若激光雷达与三角面片碰撞,则需要满足以下条件:

(1) C 位于 $\overline{QP_i}$ 之间。

(2) C 位于三角形内部。

其中,(1)表示 \overline{CQ} 与 $\overline{QP_i}$ 的夹角为钝角,可以利用以下方法判断:

$$\overline{CQ} \cdot \overline{QP_i} < 0 \quad (1)$$

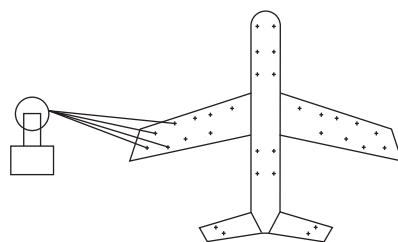


图1 飞机装配某站位测量示意图

Fig.1 Diagram of measurement station in aircraft assembly

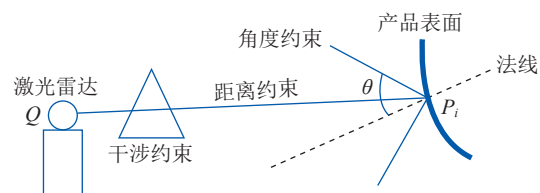


图2 约束示意图

Fig.2 Diagram of constraints

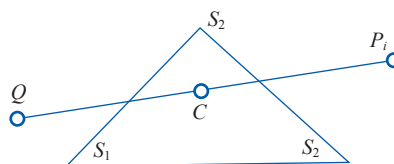


图3 三角网格与直线段相交

Fig.3 Intersects of triangle and line

对于(2), C 位于三角形内部即 C 和三角面片任一顶点位于该点所对应的边的同侧。点位于直线的哪一侧, 可以利用叉积判断, 如对 S_3 点, $\overline{S_3S_1} \times \overline{S_1S_2}$ 的第 3 个分量的正负就表示了其位于 $\overline{S_1S_2}$ 的哪一侧。当 S_3 与 C 位于 $\overline{S_1S_2}$ 同侧时, 有 $\overline{CS_1} \times \overline{S_1S_2}$ 和 $\overline{S_3S_1} \times \overline{S_1S_2}$ 的第 3 个分量同号。即:

$$\begin{aligned} z_1 &= \overline{CS_1} \times \overline{S_1S_2} \cdot (0, 0, 1) \\ z_2 &= \overline{S_3S_1} \times \overline{S_1S_2} \cdot (0, 0, 1) \\ z_1 \cdot z_2 &> 0 \end{aligned} \quad (2)$$

依次对三角面片的三个点和 C 做同样的判断, 就可以判断点 C 是否位于三角形内部。

利用以上原则就可判断直线与三角面片是否发生碰撞。在实际计算时, 需要对 STL 格式的每一个面进行判断。测量规划需要在满足几何约束的条件下确定激光雷达的位置, 该位置本质是一块空间区域, 但实际计算时, 对该区域进行表示是比较困难的, 所以一般应进行简化。下文将建立该位置的表示方法。

2 测量场数学模型

2.1 满足约束的几何图形

假设待测量点 P_i 与其法向 N_i 已知, 以 P_i 为原点, N_i 为中心线, θ 为顶角的圆锥曲面记为 S_1 。以 P_i 为原点, L 为半径生成的球面记为 S_2 。则 S_1 与 S_2 的包络体 S_i 是一个底部为圆锥面, 顶部为球面围成的几何体(图 4), 在该几何体内任一点都满足激光雷达的距离和角度约束, 称为激光雷达的可放置区。

如图 5 所示, 假设 $L=15$, $\theta=25^\circ$, 则圆锥底面距离球面的长度为 $\Delta=L-L \cdot \cos(\theta) \approx 1.4$, 该值与 L 相比较小, 所以在粗略计算时, 可将 S_i 近似为 S_1 (底部封闭, 即为空间圆锥体), 由于 $S_1 \in S_i$, 这样做相当于减少了激光雷达的可放置区, 使得计算结果为可放置区的子集。

2.2 空间圆锥曲面方程

由上一节可知, 针对任意一点 P_i , 激光雷达的可放置区为空间圆锥体, 本节将建立该区域的表示方法。假

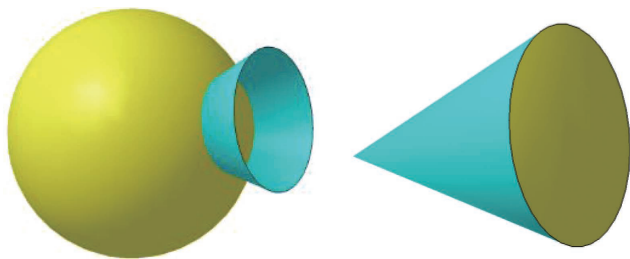


图 4 激光雷达可放置区
Fig.4 Laser radar placement area

设圆锥面半顶角为 α , 则顶点在原点, 中心线沿 z 轴(设为 N' , 且为单位向量)的圆锥曲面方程为:

$$z^2 = a^2 (x^2 + y^2) \quad (0 < z < z_{\max}) \quad (3)$$

其中, $a = \cot(\alpha)$, z_{\max} 表示激光雷达测量半径。现将圆锥移动至如图 6 所示新位置, 即顶点移动至 P , 坐标为 (P_x, P_y, P_z) , 中心线变为 $N(m_0, n_0, p_0)$, 则在此新坐标系中, 为:

$$z^2 = a^2 (x^2 + y^2) \quad (4)$$

其中, N' 与 N 夹角为 $\theta = \arccos(N' \cdot N)$, 新坐标系相当于绕着原坐标系的 $\omega = N' \times N = (-n_0, -m_0, 0)$ 旋转了 θ 角(并平移了 \vec{P}), 根据 Rodriguez 公式^[11]:

$$e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega}\sin(\theta) + \hat{\omega}^2(1 - \cos(\theta)) \quad (5)$$

其中 $\hat{\omega}$ 是 ω 反对称矩阵, 即:

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据坐标系变换为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [e^{\hat{\omega}\theta}] \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 $(e^{\hat{\omega}\theta})^{-1} = (e^{\hat{\omega}\theta})^T$ 得:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = [e^{\hat{\omega}\theta}]^T \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

将上式带入式(10)可求得空间圆锥面, 再加上其底面的平面所形成的包络体, 就是 P_i 可放置区域。

2.3 单点规划

为了便于激光雷达的安装及测量, 一般将激光雷达直接放置到地面上, 其初始放置区域是一个在平面上的区域 S_0 。假设任意点 P_i 确定的可测量包络体为 S_i ,

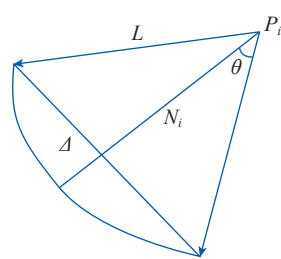


图 5 区域简化
Fig.5 Simplification of area

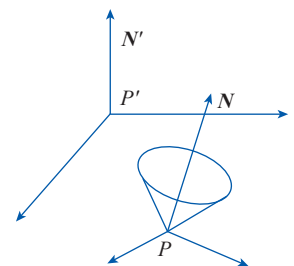


图 6 空间圆锥曲面
Fig.6 Spatial conic surface

S_i 与 S_0 的相交区域 M_i (M_i 必然是连续区域) 是满足 P_i 点的距离约束和角度约束的放置区域(暂不考虑几何约束 3)。若 S_i 与 S_0 不相交, 表示 S_0 区域无法测量 P_i , 需要针对该点另行规划测量平面(即不在默认的平面上)。

由上一节得到的空间圆锥曲面方程, 该方程与 S_0 平面交线为一圆锥曲线:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (9)$$

激光雷达在平面上的可测量区域为各种圆锥曲线围成的区域 M_i , 典型形状如图 7 所示, 为针对单点的激光雷达可布局区域。

2.4 多点规划

因为单点的可测量区域为圆锥曲线围成的, 所以多点的可测量区域是由多段圆锥曲线围成的区域。设 T_{ij} 表示 M_i (此处以圆形为例) 与 M_j 相交区域, $T_{i,j,k}$ 表示 M_i, M_j, M_k 相交区域(图 8), 以此类推。

用 T_* 表示所有相交区域, 所以, 进行站位规划就是选取数量尽可能少的集合 $\{T_*^1, T_*^2, T_*^3, \dots\}$, 使其覆盖所有 M_i 。如图 8 所示的激光雷达布局规划的结果就是 $T_{1,2,3}$ 和 $T_{4,5}$ 。

所以, 正向计算多个测量点位的激光雷达布局结果步骤如下:

(1) 针对每个待测量点建立空间圆锥曲面; (2) 求所有空间圆锥曲面与测量平面的相交圆锥曲线所围成的区域; (3) 对所有区域计算相交情况, 得到覆盖所有区域的最少数量的交集。

以上计算过程都是非常复杂的, 特别是计算多段圆锥曲线的相交结果, 在实际工程中难以处理。而在实际工程应用中, 为满足现场装配要求, 往往希望快速得到可行的激光雷达布局方案, 所以需要有一个简捷快速的方法。虽然正向求解是非常复杂的, 但验证一个点是否满足激光雷达布局结果却相对简单, 下文将基于这种思路提出一种测量规划方法。

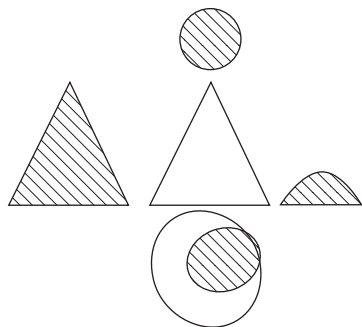


图 7 单点可测量区域

Fig.7 Measurable area of single point

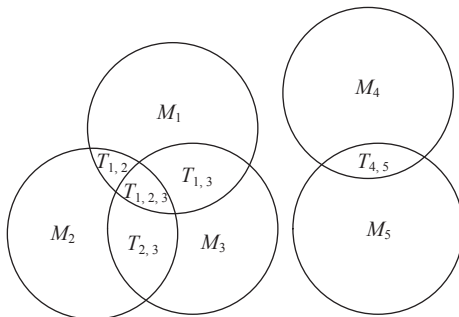


图 8 相交区域

Fig.8 Intersection area

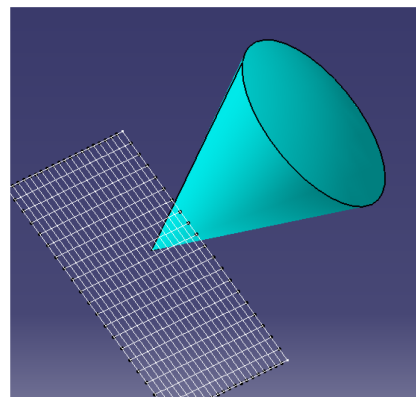


图 9 网格划分

Fig.9 Division of grid

3 基于网格划分的测量规划

基于网格划分的测量规划, 不直接求解规划点, 而是将规划平面划分成网格点, 再对各个点进行验证, 直到满足所有测量点的测量要求。

3.1 基于网格法的逆向求解

正向求解是困难的, 但给定一个点, 对该点校验是非常容易的。为此将激光跟踪仪放置平面划分为网格点(图 9), 针对每个网格点进行反向校验, 验证该点对任意测量点是否可用。具体如下:

(1) 对网格点进行几何约束校验, 将结果放入矩阵 W , $W_{i,j}$ 定义如下:

$$\begin{cases} W_{i,j} = 1 & \text{网格点 } P_i \text{ 能满足测量点 } P_j \text{ 的几何约束} \\ W_{i,j} = 0 & \text{网格点 } P_i \text{ 不满足测量点 } P_j \text{ 的几何约束} \end{cases}$$

(2) 计算 W 每一行的和, 值最大的那一行 (>0) 所对应的点 P_i 就是一个规划点。该行和最大, 表示网格点 P_i 能够满足较多测量点需求。

(3) 将 W 中, 由(2)计算的那一行和其该行中所有值为“1”的列删除。这表示网格点 P_i 对应的测量点已经得到规划, 只需要考虑余下的点;

(4) 返回(2), 直到 W 行和为零。

在计算过程中, 若 W 行和为零, 说明所设计的网格点无法满足这些计算点的要求, 此时需要重新规划网格点。以上计算过程, 本质是采用贪心的算法, 逐步在网格中查找满足要求的规划点位。

3.2 初始网格划分

由以上算法可以看出, 初始的网格点的选择十分重要, 可以通过以下方法选择初始网格点。

对于任意待测量点 $P(x_0, y_0, z_0)$, 其法向为 N_i , 其可测量区域可表示为图 10, 其侧面为圆锥曲面, 顶部为圆弧。任取可测量区域内一点, 令 r 表示 P 至该点的距离 ($r < L$), m 为单位向量, 表示 P 到该点的方向, 且 m

满足 $m \cdot N_i < \cos(\theta)$ 。

则圆锥体内任一点的参数化方程 $f(x, y, z)$:

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cdot m_x \\ y = y_0 + r \cdot m_y \\ z = z_0 + r \cdot m_z \end{cases} \quad (10)$$

设激光雷达放置平面方程 $S_0 : ax+by+cz+d=0$, 以上点还必须满足该平面约束。由于 m 受两个方程约束(长度为 1 且与 N_i 夹角小于 θ), 所以点的参数化方程只有两个自由变量(r 和 m_x 或 m_y)。对这两个变量进行离散扫描, 就可以得到激光雷达在 S_0 上的可放置点, 该点已经满足了所有约束。

在扫描时, 可令 m 为驱动变量。首先令 $m=N_i$, 得到可测量区域中心点位置。然后令 $m \cdot N_i = \cos(\theta)$ 且 $m_x=0$, 计算得到 m_y (因对称性一般为两个) 和 r , 由此得到可测量区域的两个点。对应的, 再令 $m_y=0$, 可再得到两个点。实际上, 该过程类似于手电筒将光照射到了墙上(图 11)。计算得到的 5 个点分别位于投影的中心和

四周, 可依次对初始网格进行划分。值得注意的是, 根据 2.3 节的理论分析, 投影可能不是椭圆, 但投影点依然位于边界上。

对所有点进行相同的离散扫描, 就可以得到所有点对应的测量点的初始值。再对这些初始点进行综合并做以上的逆向求解, 就可以确定最终激光雷达的布局。

4 测量规划试验

为验证以上设计的可行性, 设计如下试验。如图 12 所示, 某曲面上有 4 个点需要测量, 曲面前面有一个可能遮挡的平面。此处为简化起见, 将平面划分为两个三角面片。需要测量 4 个测量点与三角形面片数据如表 1 和表 2 所示。同时将规划平面划分为网格, 取部分网格点如表 3 所示(受限于篇幅, 本文没有采用 3.2 节的方法进行初始网格点的选取)。

假设激光雷达距离限制 $L=15000\text{mm}$, 角度限制 $\theta=80^\circ$, 对于网格点 Q_1 , 其计算结果如表 4 所示。

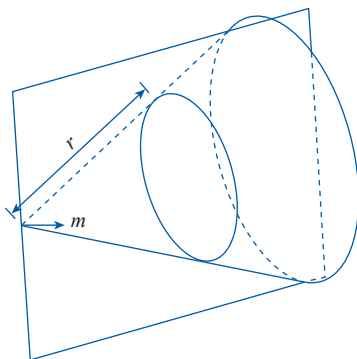


图 10 圆锥曲面示意图
Fig.10 Conical surface

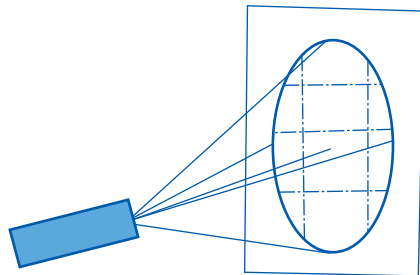


图 11 可测量区域的投影
Fig.11 Projection of measurable area

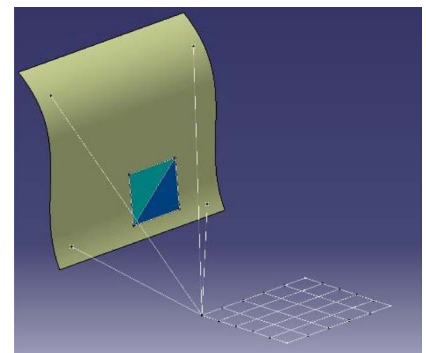


图 12 测量试验
Fig.12 Measurement experiment

表 1 曲面上需要测量的点的坐标及法向

Table 1 Coordinates and normal direction of points to be measured on curved surface

mm

待测点编号	坐标	法向
P_1	25.61, 3040.3, 6170.0	-0.80, 0.00, 0.50
P_2	-18.9, 3107.2, 675.1	-0.97, 0.00, 0.23
P_3	-80.3, -3317.4, 454.2	-0.95, 0.00, 0.30
P_4	196.1, -3540.7, 6450.6	-0.82, 0.00, 0.57

表 2 面片点坐标

Table 2 Point coordinates of patched surface

mm

面片编号	点 1	点 2	点 3
1	-4225.0, 3442.7, 4455.1	-4225.0, 3442.7, 2471.2	-4225.0, 1224.0, 2471.2
2	-4225.0, 3442.7, 2471.2	-4225.0, 1224.0, 2471.2	-4225.0, -3317.4, 454.2

表3 网格点
Table 3 Points of grid mm

规划网格点编号	坐标
Q_1	-7910.8, 3472.7, -200.0
Q_2	-12910.8, 3472.7, -200.0
Q_3	-12910.8, -1527.3, -200.0
Q_4	-7910.8, -1527.3, -200.0

可见对于 Q_1 而言,无法满足 P_4 的测量要求,在后续遍历中可发现, Q_4 满足 P_4 的测量要求,所以这种情况下,激光雷达的站位布局为点 Q_1 、 Q_4 。

5 结论

在飞机装配的测量活动中,往往有大量数据需要测量,所以必须在测量前规划好测量设备的位置,以便在尽可能少的工位里以高效率、低误差完成测量。本文基于几何方法,通过空间圆锥曲面围城的包络体表示激光雷达布局区域,以图形集合的手段求解单点/多点规划结果,从理论角度探讨了激光雷达布局方法。但受限于求解的复杂性,又提出了基于网格划分的反解法,该方法计算过程易于工程实现。相关研究内容也可应用于其他类似的测量设备的布局规划。

参考文献

- [1] 刘玉松,刘琦,谭清中.基于激光雷达的数字化装配检测技术研究[J].航空制造技术,2017,60(21):91-93,101.
- LIU Yusong, LIU Qi, TAN Qingzhong. Research on digital assembly detection technology based on laser radar[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 91-93, 101.
- [2] 陈哲涵,杜福洲.飞机数字化装配测量场构建关键技术研究[J].航空制造技术,2012,55(22):77-80.
- CHEN Zhehan, DU Fuzhou. Research on key measurement field building technology for aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(22): 77-80.
- [3] 王莉,方伟,邢宏文.大尺寸空间测量方法的实施及应用[J].南京航空航天大学学报,2012,44(Z1):48-51.
- WANG Li, FANG Wei, XING Hongwen. Implementation of measurement method for large scale roomage[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(Z1): 48-51.
- [4] 许振瑛.面向任务的激光跟踪测量场规划[D].长沙:国防科学技术大学,2015.
- XU Zhenying. Mission oriented laser tracking measurement field planning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [5] 赵乐乐.飞机大部件装配数字化测量场构建技术研究[D].

表4 计算结果
Table 4 Calculation results

点	角度/(°)	距离/mm	碰撞检测	是否满足
P_1	75.5	10555.3	无碰撞	满足
P_2	20.0	7946.4	无碰撞	满足
P_3	45.6	10385.1	无碰撞	满足
P_4	76.7	12615.1	碰撞	不满足

南京:南京航空航天大学,2013.

ZHAO Lele. Research on digital measurement field construction technology for aircraft large parts assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[6] 金涨军.飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D].杭州:浙江大学,2016.

JIN Zhangjun. Establishment and optimization technology of large size measurement field in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[7] 朱峻可,李丽娟,林雪竹.激光雷达测量系统的测量场规划研究[J].激光技术,2021,45(1):99-104.

ZHU Junke, LI Lijuan, LIN Xuezhu. Research on the measurement field planning of lidar measurement system[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 99-104.

[8] 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.

ZHANG Yang. Research on measurement station planning of large aircraft components based on lidar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[9] 栗辉.基于iGPS和激光雷达的飞机水平测量设计与实现[D].成都:电子科技大学,2019.

LI Hui. Design and implementation of aircraft level measurement based on iGPS and lidar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[10] 黄丽.基于STL模型的分层算法研究与软件实现[D].泰安:山东农业大学,2016.

HUANG Li. Research and software implementation of hierarchical algorithm based on STL model[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.

[11] 韩博,韩媛媛,许允斗,等.基于螺旋理论的四面体可展机构运动特性与动力学分析[J].机器人,2020,42(1):21-28,38.

HAN Bo, HAN Yuanyuan, XU Yundou, et al. Kinematic characteristics and dynamics analysis of the tetrahedral deployable mechanism based on the screw theory[J]. Robot, 2020, 42(1): 21-28, 38.

通讯作者:周新房,高级工程师,主要从事飞机制造装备设计、工装控制系统、数字化测量和检测等方向研究, E-mail:1208545539@qq.com.

(责编 一元)