

基于激光跟踪仪最佳站位的飞机数字化自动测量

江伟鹏¹, 朱永国¹, 赵倩², 万远¹, 张惠柯¹, 崔伟¹

¹南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌

²南昌航空大学环境与化学工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2024年6月12日; 发布日期: 2024年6月24日

摘要

在飞机数字化测量过程中, 由于飞机尺寸大、结构复杂、水平测量点分散等特点, 只使用单个测量站位很难完成全部测量任务, 通常采用多个测量站位协同完成测量任务。每个测量站位下测量光路的可达性决定了测量任务实现的完整度, 测量光路的可达性主要由测量仪器的有效测量范围和测量光路的遮挡共同约束。因此, 需要合理规划测量站位, 在满足约束条件的情况下, 同时使有效测量范围最大化。首先, 基于GJK碰撞检测算法解算测量光路和障碍物的明可夫斯基差, 进行测量光路遮挡判定, 并结合激光跟踪仪的有效测量范围综合分析测量光路的可达性。然后, 以测量光路的可达性为主要目标, 采用下一最佳观测方位搜寻较优测量站位替代无效测量站位; 最后, 引入改进混合灰狼算法实现最佳测量站位的高效搜索, 完成激光跟踪仪的测量站位。

关键词

飞机数字化测量, 测量站位规划, GJK碰撞检测算法, 激光跟踪仪, 改进混合灰狼算法

Aircraft Digital Automated Measurement Based on Laser Tracker Optimal Station

Weipeng Jiang¹, Yongguo Zhu¹, Qian Zhao², Yuan Wan¹, Huike Zhang¹, Wei Cui¹

¹School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: Mar. 12th, 2024; accepted: Jun. 12th, 2024; published: Jun. 24th, 2024

Abstract

During the process of aircraft digital measurement, due to the large size of the aircraft, complex

文章引用: 江伟鹏, 朱永国, 赵倩, 万远, 张惠柯, 崔伟. 基于激光跟踪仪最佳站位的飞机数字化自动测量[J]. 国际航空航天科学, 2024, 12(2): 105-119. DOI: 10.12677/jast.2024.122013

structure, and dispersed horizontal measurement points, it is difficult to complete all measurement tasks using a single measurement station. Usually, multiple measurement stations are used to jointly complete the measurement tasks. The accessibility of the measuring light path under each measuring station determines the completeness of the measurement task implementation, which is mainly constrained by the effective measurement range of the measuring instrument and the occlusion of the measuring light path. Therefore, it is necessary to reasonably plan the measurement stations to maximize the effective measurement range while satisfying the constraints. Firstly, based on the GJK collision detection algorithm, the Minkowski difference between the measuring light path and obstacles is calculated for the occlusion judgment of the measuring light path, and the accessibility of the measuring light path is comprehensively analyzed in combination with the effective measurement range of the laser tracker. Then, with the accessibility of the measuring light path as the main goal, the next best view is used to search for better measurement stations to replace invalid ones; finally, the improved hybrid grey wolf algorithm is introduced to efficiently search for the optimal measurement station, completing the measurement station of the laser tracker.

Keywords

Aircraft Digital Measurement, Measurement Station Planning, GJK Collision Detection Algorithm, Laser Tracker, Improved Hybrid Grey Wolf Algorithm

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在开展飞机数字化测量前, 需合理规划数字化测量仪器的站位。国外诸多学者已对站位规划进行了多项研究。Maropoulos 等人提出了一种设计评估以装配规划模型实现测量规划, 并证明了测量模型的有效性[1]。Galetto 等人综合分析了数字化测仪器的测角信息和测距信息, 采用了异构数据融合的方法实现站位规划[2]。Franceschini 等人基于数字化测量系统在测距和测角上的不确定度的分析, 确定了多站位协调控制测量场中的测量站位[3]。Mitsi 等人提出了一种基于混合遗传算法优化移动式工业机器人的站位布设[4]。Galetto 等人通过测量现场环境约束、测量特征和测量任务构造目标优化函数, 对数字化测量仪器进行了站位规划[5]。Wang 等人借助模式搜索法对 multilateration 模型测量站位进行了精选布设, 组建了有效的测量方案[6]。

随着数字化测量系统在国内航空企业的广泛应用, 对于站位规划的研究也陆续开展。北航学者景喜双等人采用复合测量技术, 通过对关节臂测量仪的位置规划, 成功获取了大型壁板类组件的完整特征信息[7]。吉林大学任书楠等人基于机械臂基座可行位置规划了机械臂的站位, 实验结果表明, 该方法可有效扩大单次停站的喷涂范围[8]。长安理工大学周娜等人通过激光雷达和室内 GPS 数字化测量系统构建了测量网, 通过分析飞机基准点的测量不确定度和误差依赖性, 提出了飞机数字化测量网络的站位布设方案[9]。天津大学林嘉睿等人采用奇异值分解算法确定了激光跟踪仪各个测量站位的方位, 构建了大空间精密三维坐标控制网[10]。南航学者侯尚基于截断法确定了被测物的最小外接矩形, 通过激光雷达的有效测量范围分割最小外接矩形规划激光雷达站位[11]。南航学者杨晓辉通过 K-means 方法对特征点进行了聚类划分, 采用十字交叉方法运用于测量光路的可达性, 搜寻最优测量站位布设[12]。哈工大学者马守东通过最小位置精度衰减因子方法求解了最优测量站位布局, 将测量系统精度提高 50% 以上[13]。

在飞机数字化测量过程中, 由于飞机尺寸大、结构复杂、水平测量点分散等特点, 只使用单个测量

站位很难完成全部测量任务，通常采用多个测量站位协同完成测量任务。每个测量站位下测量光路的可达性决定了测量任务实现的完整度，测量光路的可达性主要由测量仪器的有效测量范围和测量光路的遮挡共同约束。因此，需要合理规划测量站位，在满足约束条件的情况下，同时使有效测量范围最大化。首先，基于 GJK 碰撞检测算法解算测量光路和障碍物的明可夫斯基差，进行测量光路遮挡判定，并结合激光跟踪仪的有效测量范围综合分析测量光路的可达性。然后，以测量光路的可达性为主要目标，采用下一最佳观测方位搜寻较优测量站位替代无效测量站位；最后，引入改进混合灰狼算法实现最佳测量站位的高效搜索，完成激光跟踪仪的测量站位。

2. 测量光路的可达性分析

2.1. 激光跟踪仪有效测量范围

激光跟踪仪是一种基于球坐标测量的高精度空间坐标测量仪器，其测量模型本身不存在测量盲区，只受限于垂直角、水平角和距离的有效测量范围。如表 1 所示是几个常用型号激光跟踪仪的垂直角、水平角和距离的有效测量范围。对比分析各有效测量范围可看出：除 API Radian 型激光跟踪仪外，各型号激光跟踪仪均能达到 360°的水平测量角；所有型号激光跟踪仪垂直角有效测量范围均无法达到 180°，距离有效距离最远可达 80 m，以 Leica AT402 型激光跟踪仪为代表，设测量点的实测坐标为 (x, y, z) ，则有效测量条件为：

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2} \geq |z| \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq 8 \times 10^4 \end{cases} \quad (1)$$

Table 1. Effective measurement range of vertical angle, horizontal angle and distance of commonly used laser trackers

表 1. 常用型号激光跟踪仪的垂直角、水平角和距离的有效测量范围

激光跟踪仪型号	水平角/°	垂直角/°	距离/m
Leica AT402	360	+145~-145	80
API Radian	320	+79~-60	50
Faro Vantage	360	+77.9~52.1	60

如图 1 所示，根据 Leica AT402 型激光跟踪仪的垂直角有效测量范围，可得在激光跟踪仪下方会出现圆锥形的测量盲区，因此，在布设测量站位时，应该尽可能架设仪器在与测量点偏下方的位置，保证更多的测量点能在仪器有效测量范围内，使得每个测量站位可以观测到更多的测量点。

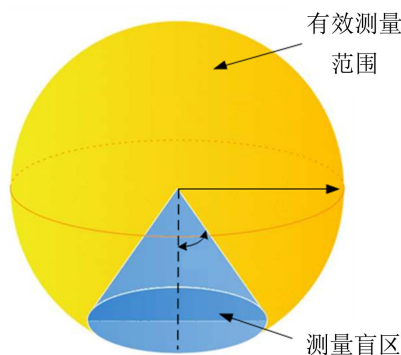


Figure 1. Effective measurement range of Leica AT402 laser tracker

图 1. Leica AT402 激光跟踪仪的有效测量范围

将处于激光跟踪仪有效测量范围内的记为 $v_{lb1}=1$ ；反之，则记为 $v_{lb1}=0$ ，即有：

$$\begin{cases} v_{lb1}=1 & \text{满足有效测量条件} \\ v_{lb1}=0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.2. 基于 GJK 碰撞检测算法的测量光路遮挡判定

在测量现场中，若激光跟踪仪和测量点之间存在障碍物，出现测量光路遮挡现象，则无法获取测量点的三维坐标信息。因此，测量光路遮挡问题成为了测量中影响测量光路可达性的重要因素，在求解激光跟踪仪最佳测量站位过程中必须进行测量光路遮挡判定。

判定测量网中的障碍物与测量光路是否交汇是分析测量光路遮挡的关键，需要注意的是，被测量物本身很大可能成为障碍物。一般采用三角形 M-T 算法，通过量化测量光路和障碍物的几何特征及拓扑信息，障碍物可分解为多个简单的平面多边形，并将所有平面多边形分割成平面三角形，即可将障碍物与测量光路相交的问题简化为测量光路所在线段与平面三角形的相交判定模型，如图 2 所示。

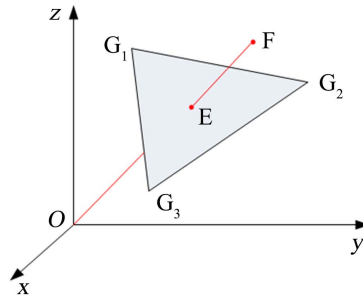


Figure 2. Measurement optical path occlusion determination model
图 2. 测量光路遮挡判定模型

图中原点 O 为激光跟踪仪测量站位坐标， F 点为测量点坐标，将测量现场中的障碍物分割成多个平面三角形，取某个平面三角形的三个顶点 G_1, G_2, G_3 ，设激光跟踪仪和测量点所在向量 \overline{OF} 与三角形所在平面的交点为 $E(x, y, z)$ ，则向量 \overline{OE} 根据共面向量线性表达原则为：

$$\overline{OE} = (1-u-v)\overline{OG_1} + u\overline{OG_2} + v\overline{OG_3} \quad (3)$$

上式中， u 为向量 $\overline{OG_2}$ 的权重， v 为向量 $\overline{OG_3}$ 的权重，而 $(1-u-v)$ 是向量 $\overline{OG_1}$ 的权重，向量 \overline{OE} 与 \overline{OF} 可表示为：

$$\overline{OE} = \lambda \overline{OF} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得矩阵方程为：

$$\begin{bmatrix} \overline{OF} & \overline{G_1G_2} & \overline{G_1G_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ u \\ v \end{bmatrix} = \overline{OG_1} \quad (5)$$

记 $\overline{G_1G_2}$ 、 $\overline{G_1G_3}$ 为 L_1 、 L_2 ，将 $\overline{OF} \times L_1$ 简化为 q ， $\overline{OE} \times L_2$ 简化为 r ，根据线性代数中 Cramer 法则解式(3)~(5)线性矩阵方程，得参数 λ, u, v 为：

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{qL_1} \begin{bmatrix} rL_2 \\ q\overline{OE} \\ r\overline{OF} \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式中, 需满足测量光路与平面三角形不平行, 即 $qL_1 \neq 0$ 。

若交点 E 在三角形 $G_1G_2G_3$ 内部, 则测量光路和平面三角形相交, 参数 λ, u, v 需满足的条件为:

$$\begin{cases} u \geq 0 & v \geq 0 \\ u + v \leq 1 \\ 0 < \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

由于测量现场中测量环境复杂, 测量任务繁琐以及障碍物几何特征及拓扑信息繁复, 将所有障碍物分解成平面三角形, 同时对每一个平面三角形与测量光路进行遮挡判定, 其工作量相对庞大。针对以上问题, 运用 GJK (Gilbert-Johnson-Keerthi) 碰撞检测算法解决测量光路遮挡判定问题, 降低计算时长, 提高测量光路遮挡判定效率。

在运用 GJK 碰撞检测算法解决测量光路遮挡判定问题时, 需将测量光路和障碍物量化为三维模型, 通过凸分解法将障碍物模型预先分解为多凸体组合。障碍物的凸分解过程如图 3 所示。

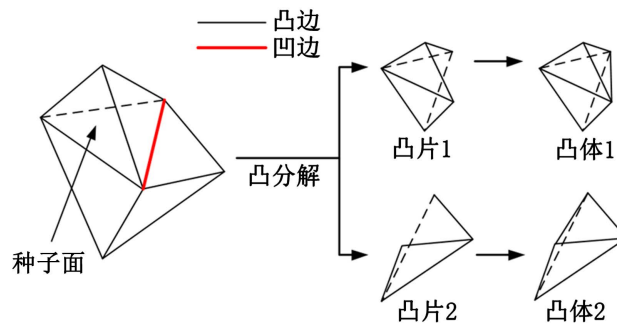


Figure 3. Convex decomposition process
图 3. 凸分解过程

GJK 碰撞检测算法的基本概念如下:

1) 凸体支撑点

对于凸体集 W , 沿给定向量 \vec{c} 方向上最后离开凸体时构成最长线段的点 P 称作凸体的支撑点, 其数学表达形式为: $\vec{c}P = \max \{ \vec{c}V \mid V \in W \}$, 如图 4 所示为两个非同凸体集沿 \vec{c} 方向的凸体支撑点 P , 记为 $S_W(\vec{c})$ 。

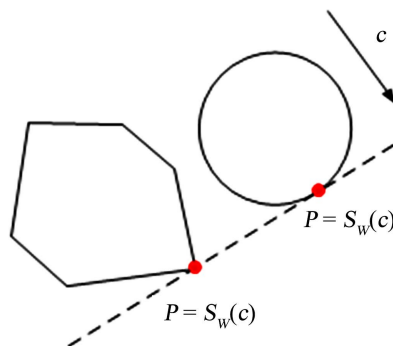


Figure 4. Convex body support points
图 4. 凸体支撑点

2) 支撑映射

支撑映射是计算单纯形凸体集 W 在 \vec{c} 方向上的支撑函数, 单纯形凸体可以是一个点、一条线段或者

一个凸多面体，通过闭合形式约束支撑映射，其中球体是支撑映射为：

$$S_w(\bar{c}) = O + r\bar{c}/\|\bar{c}\| \quad (8)$$

上式中， O 为球体球心， r 为球体半径。

3) 明可夫斯基差

明可夫斯基差表示三维空间中 A 、 B 两个凸多面体模型顶点的点集进行向量减法运算，则运算所得的点集为 W_A, W_B 两个凸多面体明可夫斯基差 Λ ：

$$\Lambda = W_A \ominus W_B = \{w_A - w_B, w_A \in W_A, w_B \in W_B\} \quad (9)$$

上式中， \ominus 为凸多面体 A 、 B 顶点集 W_A, W_B 的明可夫斯基差， w_A 为顶点集 W_A 中的任意点， w_B 为顶点集 W_B 中的任意点。根据明可夫斯基差概念可得，两个凸体的明可夫斯基差的顶点集构成的几何模型依旧是凸体。

明可夫斯基差的主要计算步骤如下：

- ① 计算 A 、 B 两个凸多面体各个面的支撑点集；
- ② 由 A 、 B 两个凸多面体各个面的支撑点集得到平移最小面；
- ③ 获取支撑点集的边界点集记为 W_s ，并计算边界点集对应的分裂边界 U_s ；
- ④ 根据 W_s 和 U_s 对应折边解算两个凸多面体明可夫斯基差。

令激光测量光路的几何模型为 W_l ，障碍物的几何模型为 W_b ，则 GJK 碰撞检测算法判定的测量光路遮挡条件为：

$$|W_l W_b| = \min\{\|w_l - w_b\|, w_l \in W_l, w_b \in W_b\} - \min\{\|\Lambda\|, \Lambda \in W_l \ominus W_b\} < 0 \quad (10)$$

基于 GJK 碰撞检测算法判断测量光路和障碍物是否存在碰撞，就是判断测量光路模型和障碍物模型的顶点集通过明可夫斯基差所得的凸体有无包裹原点，若包裹原点，则检测到测量光路和障碍物之间发生了碰撞；反之，则通过明可夫斯基差求解得到的凸体到原点的最近距离为测量光路和障碍物之间的最小间隙。

为了确定明可夫斯基差构成的模型是否包裹原点，只要明可夫斯基差内部尽可能生成包裹原点的单纯形，则明可夫斯基差构成的模型也必定包裹原点。单纯形迭代生成流程为：计算初始单纯形顶点集中与原点最近的点 P_1 ，若该点正好为原点，则检测到碰撞，算法结束；否则比较支撑点 P_2 是否为原点指向点 P_1 的方向上的极值点，若不是，则无碰撞，反之将 P_2 替代 P_1 形成新的单纯形，循环迭代判定是否存在发生碰撞。因此，对于每个激光跟踪仪和反射镜来说，如果从激光跟踪仪到该反射镜间的测量光路不与任意一个障碍物发生碰撞，则测量光路未被遮挡，记为 $v_{lb2} = 1$ ，反之则 $v_{lb2} = 0$ ，即有：

$$\begin{cases} v_{lb2} = 0 & \text{满足碰撞条件} \\ v_{lb2} = 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

若在任意测量站位下激光跟踪仪的有效测量范围同时不发生测量光路遮挡现象，则该测量站位测量光路可达，记为 $v_{lb} = 1$ ；否则，记为 $v_{lb} = 0$ ，即有：

$$\begin{cases} v_{lb2} = 1 & v_{lb1}v_{lb2} = 1 \\ v_{lb2} = 0 & v_{lb1}v_{lb2} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

3. 基于下一最佳观测方位的站位规划

3.1. 下一最佳观测方位总体思想

下一最佳观测方位(Next Best View, NBV)常应用于视觉测量领域，由于激光跟踪仪可在水平方向上实

现 360°无死角测量，并不存在测量仪器的朝向问题，因此测量网的下一最佳观测方位问题主要关注下一个最佳的测量站位问题。其主要思想是当获取的观测信息不完整时，重点聚焦于测量盲区，确定能最大程度地获取观测信息的下一个测量站位。

在测量过程中，合理可靠的测量站位需要满足激光跟踪仪在各测量站位下的测量光路均能成功到达测量点并且尽可能在测量站位最少的情况下完成全部测量任务。为此，采用 NBV 对规划，降低时间和测量成本的浪费。通过去除无效的测量站位点，搜索最佳测量站位，使得当前处于测量盲区的测量点被最佳测量站位覆盖，每个新增的测量站位无测量盲点且测量站位总数最少的要求。结合式(12)可得站位规划函数为：

$$\begin{cases} v_{lb} = 1 \\ \min D_m \end{cases} \quad (13)$$

上式中， D_m 为测量站位总数量。则基于下一最佳观测方位的站位规划流程如图 5 所示，将测量任务下的所有测量点集经判断划分至测量盲点集和可测点集，通过迭代搜寻最优的测量站位，将新增测量站位点替代无效测量站位以满足测量要求。

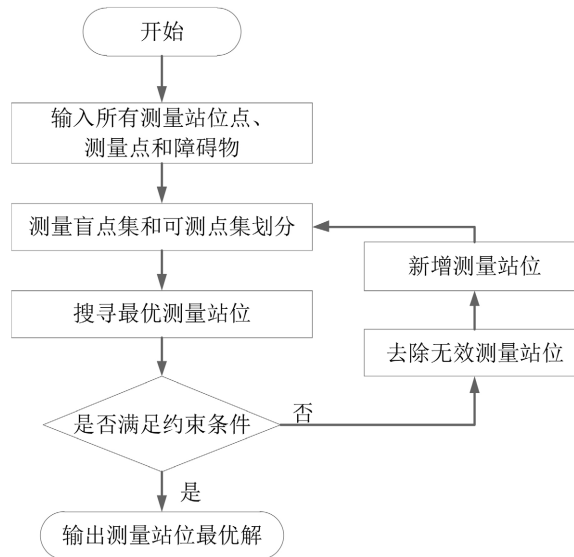


Figure 5. Station planning process chart based on the next best view
图 5. 基于下一最佳观测方位的站位规划流程图

3.2. 基于改进混合灰狼算法的最佳测量站位搜索方法

在基于下一最佳观测方位的测量站位规则中，需要采用一种搜索算法能高效解算新增测量站位的最佳位置。灰狼优化算法(GWO)是一种新颖的群智能优化算法，多应用于求解测量站位的最优位置。灰狼群按照个体适应度的高低可分为 α 、 β 、 δ 和 ω 阶层，适应度由式(13)计算。其中， α 狼为灰狼群的最高统治者享有最高决策权； β 和 δ 狼的领导地位依次递减，共同协助 α 狼管理； ω 狼处在等级最底层，起到平衡内部结构的作用。

在狼群中， α 、 β 和 δ 狼能引领狼群搜索猎物潜在位置，灰狼搜索猎物时会逐渐地接近猎物并在每一次迭代过程中更新狼群位置包围猎物，则灰狼与目标猎物的距离即包围步长为：

$$D = |\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (14)$$

上式中, $\mathbf{X}_p(t)$ 为目标猎物的位置, $\mathbf{X}(t)$ 为当前 ω 狼迭代更新的位置, 则灰狼种群位置更新模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \\ \mathbf{A} = 2\varpi \cdot r_1 - \varpi \\ \varpi = 2 - \frac{2t}{t_{\max}} \\ \mathbf{K} = 2r_2 \end{cases} \quad (15)$$

上式中, \mathbf{A} 为包围步长协同系数向量和 \mathbf{K} 为猎物协同系数向量, ϖ 为距离收敛系数, 取值为 $[0,2]$, 随着迭代次数的增加线性减小, r_1 和 r_2 的模是 $[0,1]$ 之间的随机数。

依照狼群等级制度, 由 α 狼带领狼群包围猎物, β 和 δ 狼在 ω 狼的辅助下捕获猎物。每次迭代过程中, 狼群位置更新公式为:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_\alpha = |\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{X}(t)| \\ \mathbf{D}_\beta = |\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{X}(t)| \\ \mathbf{D}_\delta = |\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_\delta(t) - \mathbf{X}(t)| \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1(t) = \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{D}_\alpha \\ \mathbf{X}_2(t) = \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{D}_\beta \\ \mathbf{X}_3(t) = \mathbf{X}_\delta(t) - \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{D}_\delta \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{X}_2(t) + \mathbf{X}_3(t)}{3} \quad (18)$$

上式中, $\mathbf{X}_\alpha(t)$ 、 $\mathbf{X}_\beta(t)$ 、 $\mathbf{X}_\delta(t)$ 分别为 α 、 β 和 δ 狼所在的位置, \mathbf{D}_α 、 \mathbf{D}_β 、 \mathbf{D}_δ 分别表示当前 ω 灰狼与最优三个狼之间的距离, 当 $|\mathbf{A}| > 1$ 时, 代表狼群远离目标, 灰狼个体需分散在各区域范围内, 大规模搜索目标。当 $|\mathbf{A}| \leq 1$ 时, 表示向目标靠近, 灰狼将集中搜索局部区域, 确定猎物位置。

针对搜索下一最佳测量站位的问题, 需要通过灰狼群中的每一个体狼的当前位置求解狼群中的个体适应度, 于此判定测量站位的性能。由于传统灰狼算法的灰狼个体在位置寻优更新中计算资源消耗高, 且容易陷入局部最优。需要采用遗传算法对传统灰狼算法进行改进。首先, 引入遗传算法对灰狼算法进行优化。如图 6 所示, 利用遗传算法对狼群所处位置范围进行离散化编码, 将狼群区域进行网格划分并编号, 根据实际测量需求设定网格密度。网格点是激光跟踪仪可以出现的测量站位, 在迭代更新激光跟踪仪测量站位的过程中, 需对编码进行圆整处理, 以确保所求激光跟踪仪测量站位处于网格点上。

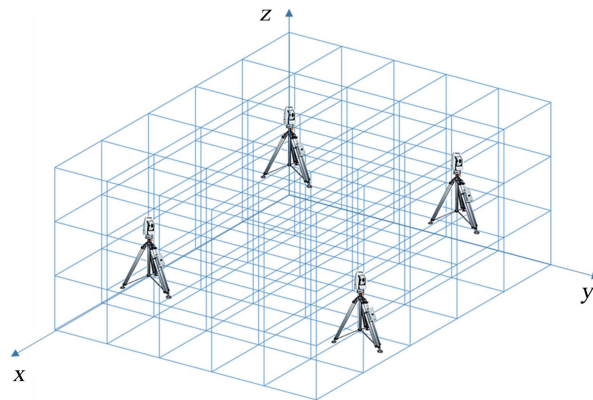


Figure 6. Three-dimensional network discretization
图 6. 三维网络离散化

其次, 为了避免传统灰狼算法易陷入局部最优的问题, 将原算法中的收敛系数 ω 改进为非线性递减的收敛系数。原收敛系数随迭代次数的增加而线性递减, 包围步长的协调系数向量随收敛系数变化, 当在算法迭代初期进行全局搜索时, 由于包围步长急剧下降从而缩小搜索范围, 削弱全局搜索能力; 而当算法迭代后期进行局部收敛时, 包围步长的值较大并且快速减少, 不利于算法的局部细化搜索, 为了最终均衡全局搜索效率和局部搜索效率, 采用反比例函数进行改进:

$$\omega = 2 \left(\frac{\xi}{t/t_{\max} + q_1} + q_2 \right) \quad (19)$$

式(19)反比例函数可使初期收敛因子缓慢下降, 更有利于全局搜索; 在后期搜索时收敛因子快速下降, 具有更优的局部收敛能力, 求解局部最优解。其平移因子 q_1 和 q_2 随比例系数 ξ 的不同而变化, 取 $\xi=1$ 。

最后, 由于 ω 狼的位置根据 α 、 β 和 δ 狼的相对位置信息进行更新, 由式可知 α 、 β 和 δ 狼对 ω 狼位置的影响是等同的, 但实际解算过程中目标猎物与三类狼的距离并非完全一致。基于动态分配指导权重的思想, 将领导狼识别猎物精准位置方位信息予以最高权重, 提高寻找最优解的效率。 α 、 β 和 δ 狼的指导权重公式为:

$$\begin{cases} e_1 = \frac{|\mathbf{X}_1(t)|}{|\mathbf{X}_1(t)| + |\mathbf{X}_2(t)| + |\mathbf{X}_3(t)|} \\ e_2 = \frac{|\mathbf{X}_2(t)|}{|\mathbf{X}_1(t)| + |\mathbf{X}_2(t)| + |\mathbf{X}_3(t)|} \\ e_3 = \frac{|\mathbf{X}_3(t)|}{|\mathbf{X}_1(t)| + |\mathbf{X}_2(t)| + |\mathbf{X}_3(t)|} \end{cases} \quad (20)$$

上式中, e_1, e_2, e_3 分别为 ω 狼对 α 、 β 和 δ 狼的学习权重。

则位置更新公式(18)可优化为:

$$\mathbf{X}(t+1) = e_1 \mathbf{X}_1(t) + e_2 \mathbf{X}_2(t) + e_3 \mathbf{X}_3(t) \quad (21)$$

由公式(20)和公式(21)可知, 权重 e_1, e_2, e_3 会随着每次迭代计算而动态变化, 权重根据收敛情况实现动态调整, 构造高适应性算法环境。

4. 试验分析

为了论证 GJK 碰撞检测算法解决测量光路遮挡判定问题的可行性, 采用飞机机身机翼模拟件模型, 通过 Matlab 软件对激光跟踪仪多个测量站位进行测量光路遮挡判定。将飞机机身机翼模拟件模型以 ply 斯坦福三角形文件的 ASCII 子格式写入, 分解为简单的多边形面片, 其数据存储形式主要为头文件加 mesh 多边形面片元素列表。选用激光跟踪仪为测量单元, 按照原始测量站位坐标放置激光跟踪仪对飞机机身机翼模拟件模型上的测量点进行测量。原始测量站位坐标如表 2 所示。

Table 2. Original measurement station coordinates (mm)

表 2. 原始测量站位坐标(mm)

测量站位	x	y	z
P_{s1}	20867.4561	3360.4783	829.3622
P_{s2}	20824.8262	4558.5637	835.7374
P_{s3}	25208.7067	4560.6939	832.6147
P_{s4}	25338.4563	520.1239	833.9531

通过 GJK 碰撞检测算法迭代判定 22 个测量点与测量站位间是否出现测量光路遮挡。运用 Matlab 软件模拟运算测量光路遮挡判定全过程，其中包含 10,872 个平面多边形面片总共 5386 个顶点，GJK 碰撞检测算法与迭代式三角面的判定结果如表 3 所示。

Table 3. Measurement optical path occlusion determination results

表 3. 测量光路遮挡判定结果

测量光路遮挡判定方法	盲点	计算时长/s
迭代式三角面	P_{c9} 、 P_{c10} 、 P_{c11}	189.152
GJK 碰撞检测	P_{c9} 、 P_{c10} 、 P_{c11}	9.612

从表 3 可以看出，测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 被判定为盲点。采用 Leica AT402 型激光跟踪仪对飞机机身机翼模拟件上的测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 进行现场测量光路遮挡试验，遮挡结果如图 7~10 所示。

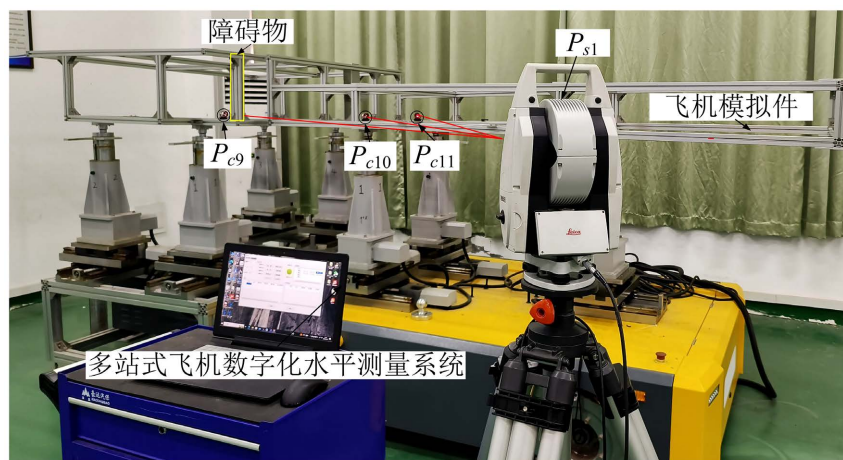


Figure 7. Determination of the occlusion of the measurement optical path of the measurement points P_{c9} , P_{c10} and P_{c11} by the measurement station P_{s1}

图 7. 测量站位 P_{s1} 对测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 的测量光路遮挡判定

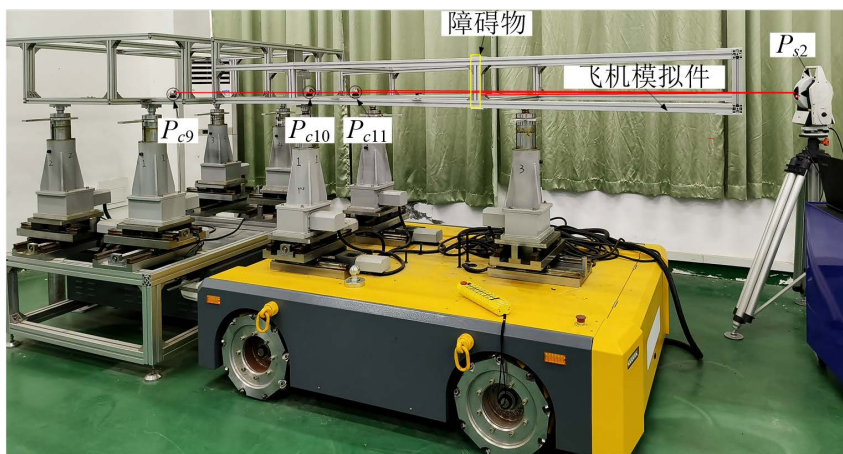


Figure 8. Determination of the occlusion of the measurement optical path of the measurement points P_{c9} , P_{c10} and P_{c11} by the measurement station P_{s2}

图 8. 测量站位 P_{s2} 对测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 的测量光路遮挡判定

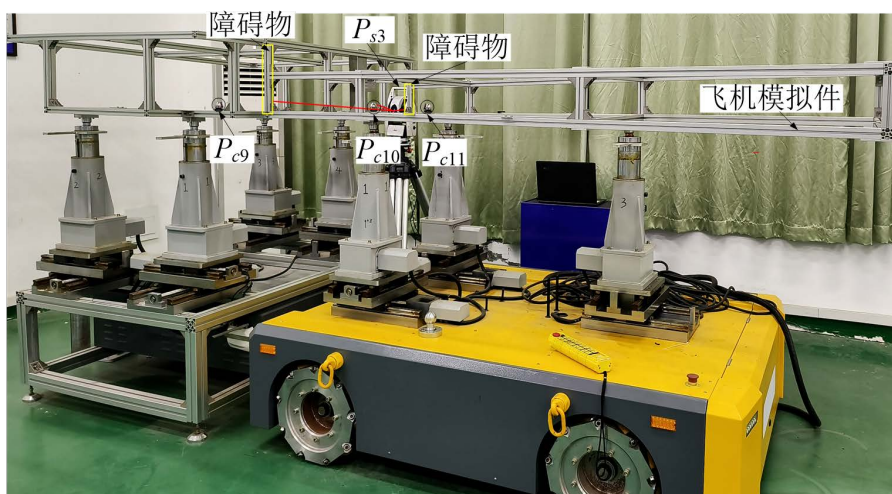


Figure 9. Determination of the occlusion of the measurement optical path of the measurement points P_{c9} , P_{c10} and P_{c11} by the measurement station P_{s3}

图 9. 测量站点 P_{s3} 对测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 的测量光路遮挡判定

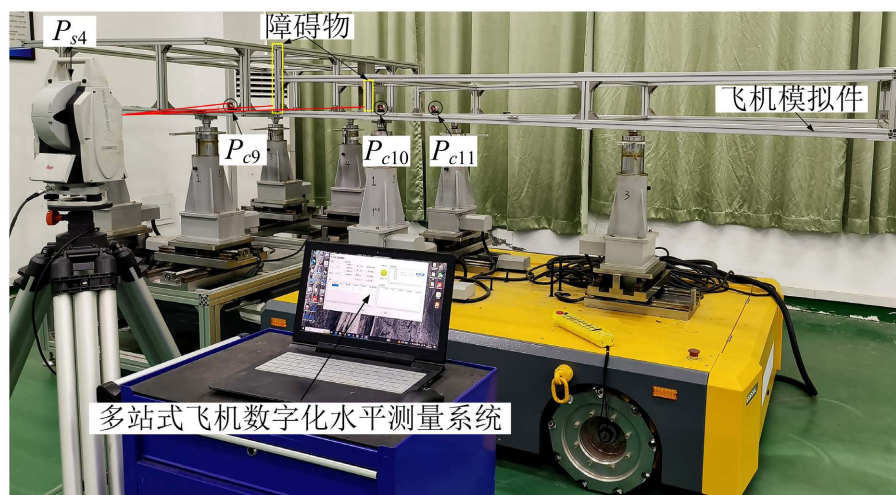


Figure 10. Determination of the occlusion of the measurement optical path of the measurement points P_{c9} , P_{c10} and P_{c11} by the measurement station P_{s4}

图 10. 测量站点 P_{s4} 对测量点 P_{c9} 、 P_{c10} 和 P_{c11} 的测量光路遮挡判定

由图 7 和图 8 可看出, 在测量点 P_{c9} 时, 激光跟踪仪在 P_{s2} 和 P_{s3} 测量站点下发生测量光路遮挡, 测量点 P_{c9} 为盲点; 在测量点 P_{c10} 时, 激光跟踪仪在 P_{s2} 和 P_{s4} 测量站点下发生测量光路遮挡, 测量点 P_{c10} 为盲点; 在测量点 P_{c11} 时, 激光跟踪仪在 P_{s3} 和 P_{s4} 测量站点下发生测量光路遮挡, 测量点 P_{c11} 为盲点。基于以上分析可得, 实验结果与 GJK 碰撞检测算法判定的测量光路遮挡结果一致, 由表 3 可以看出, 与迭代式三角面遮挡判定方法相比, 基于 GJK 碰撞检测算法的测量光路遮挡判定方法总花费时长 9.612 秒, 将判定效率提升了 19 倍, 更具高效性。

为了验证改进混合灰狼算法的性能, 实验比较了传统灰狼算法和改进混合灰狼算法, 设置种群个体数为 22 个, 通过归一化处理两种算法经过 100 次迭代的种群适应度。如图 11 所示是测量站点点求优的归一化种群适应度对比图, 可以看出相比于传统灰狼算法, 改进混合灰狼算法的收敛速度和解算效果大幅提高。

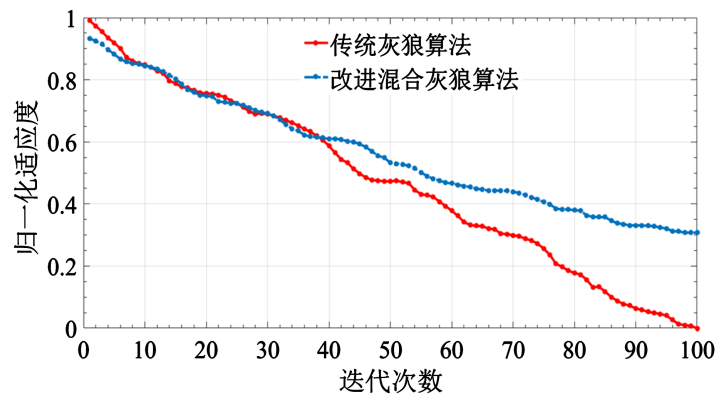


Figure 11. Normalized population adaptation comparison
图 11. 归一化种群适应对比

采用下一最佳观测方位对在原始测量站位的基础上进行规划, 规划后的测量站位坐标位置的如表 4 所示。

Table 4. Measuring station coordinates after planning (mm)
表 4. 规划后测量站位坐标(mm)

测量站位	x	y	z
P_{s1}	21381.2925	131.7722	841.7584
P_{s2}	21371.2141	4854.3471	842.0273
P_{s3}	24455.7189	4398.2716	832.2554
P_{s4}	24028.6473	537.2248	832.6011

以激光跟踪仪为测量仪器, 利用规划前后测量站位对机身机翼模拟件的 22 个水平测量点进行测量仿真实验。原始测量站位下各水平测量点的测量结果如表 5 所示, 可看出在原始测量站位下 P_{c9} 、 P_{c10} 、 P_{c11} 测量点处于测量盲区, 无法成功获取当前任务下全部测量点的坐标值。

Table 5. Measurement results of each horizontal measurement point under the original measurement station (mm)
表 5. 原始测量站位下各水平测量点的测量结果(mm)

测量点	x	y	z
P_{c1}	32.2521	21.0126	0.0226
P_{c2}	2078.4561	579.59798	-511.8917
P_{c3}	5554.0576	593.9981	-798.8919
P_{c4}	7777.5624	591.2983	-1029.4103
P_{c5}	11128.4625	-193.0169	-2668.5035
P_{c6}	12269.5594	409.9962	-3041.1161
P_{c7}	14843.7559	410.0259	-6879.3116
P_{c8}	15738.7524	409.9883	-6650.6768
P_{c9}	-	-	-

续表

P_{c10}	-	-	-
P_{c11}	-	-	-
P_{c12}	18916.0598	64.0864	-0.0252
P_{c13}	18190.2625	-404.6961	1676.9134
P_{c14}	14873.8552	-469.3028	1742.3957
P_{c15}	15959.3536	409.987	5954.5033
P_{c16}	15738.7524	410.0202	6650.6975
P_{c17}	14843.7459	409.9963	6879.3292
P_{c18}	12269.5211	410.0325	3041.1316
P_{c19}	11128.4459	-193.0234	2668.4951
P_{c20}	7777.5467	591.2985	1029.4198
P_{c21}	5554.0473	593.9896	798.9258
P_{c22}	2078.4584	579.6048	511.9104

规划后测量站位下各水平测量点的测量结果，如表 6 所示。

Table 6. Measurement results of each horizontal measurement point under the measurement station after planning (mm)
表 6. 规划后测量站位下各水平测量点的测量结果(mm)

测量点	x	y	z
P_{c1}	32.2483	20.9782	-0.0115
P_{c2}	2078.4551	579.6038	-511.9047
P_{c3}	5554.0458	594.0182	-798.9018
P_{c4}	7777.5626	591.2984	-1029.3961
P_{c5}	11128.4584	-192.9867	-2668.4933
P_{c6}	12269.5563	410.0176	-3041.0956
P_{c7}	14843.7583	410.0103	-6879.2959
P_{c8}	15738.7531	409.9842	-6650.7112
P_{c9}	15959.3407	410.0265	-5954.4984
P_{c10}	14873.8661	-469.2951	-1742.4017
P_{c11}	18190.2584	-404.7026	-1676.8965
P_{c12}	18916.0505	64.1027	0.0211
P_{c13}	18190.239	-404.7109	1676.8937
P_{c14}	14873.8345	-469.2975	1742.4268

续表

P_{c15}	15959.3259	410.0391	5954.4874
P_{c16}	15738.7333	409.9972	6650.7346
P_{c17}	14843.7462	410.0185	6879.2962
P_{c18}	12269.5395	410.0243	3041.0863
P_{c19}	11128.4346	-192.9968	2668.5229
P_{c20}	7777.5439	591.3115	1029.3971
P_{c21}	5554.0441	594.0306	798.8992
P_{c22}	2078.455	579.5942	511.9065

由表 6 可看出, 规划后的测量站位可以获取全部测量点坐标基于下一最佳观测思想规划的测量站位, 实现了测量任务下所有水平测量点的全覆盖, 证明了站位规划的有效性和必要性。

5. 结论

本文以激光跟踪仪测量站位为研究对象, 设计了一种基于激光跟踪仪最佳站位的飞机数字化自动测量方法, 寻求在满足测量精度要求的基础上, 合理规划测量站位开展测量检测工作, 实现测量点的全覆盖。首先, 根据激光跟踪仪的有效测量范围, 运用 GJK 碰撞检测算法解决测量网中测量光路的遮挡判定问题, 有效分析测量光路的可达性; 其次, 将下一最佳观测结合改进混合灰狼算法搜索最优测量站位, 使测量站位的规划更具合理性和可靠性, 减少工作人员对布设测量站位经验的依赖性; 最后, 实验验证了激光跟踪仪站位规划方法的合理性、可靠性, 为测量工作的高效进行奠定基础。

参考文献

- [1] Maropoulos, P.G., Guo, Y., Jamshidi, J., *et al.* (2008) Large Volume Metrology Process MODELS: A Framework for Integrating Measurement with Assembly Planning. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **57**, 477-480. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.017>
- [2] Galetto, M., Mastrogiacomo, L., Maisano, D., *et al.* (2015) Cooperative Fusion of Distributed Multi-Sensor LVM (Large Volume Metrology) Systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **64**, 483-486. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.003>
- [3] Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., *et al.* (2016) Combining Multiple Large Volume Metrology Systems: Competitive versus Cooperative Data Fusion. *Precision Engineering*, **43**, 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.014>
- [4] Mitsi, S., Bouzakis, K.-D., Sagris, D. and Mansour, G. (2006) Determination of Optimum Robot Base Location Considering Discrete End-Effector Positions by Means of Hybrid Genetic Algorithm. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **24**, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.08.003>
- [5] Galetto, M. and Pralio, B. (2010) Optimal Sensor Positioning for Large Scale Metrology Applications. *Precision Engineering*, **34**, 563-577. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.02.001>
- [6] Wang, Z., Forbes, A. and Maropoulos, P.G. (2014) Laser Tracker Position Optimization. *The 8th International Conference on Digital Enterprise (DET)*, Stuttgart, 25-28 March 2014, 22 p.
- [7] 景喜双, 张鹏飞, 王志佳, 等. 数字化组合测量辅助飞机装配质量检测技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1196-1201.
- [8] 任书楠, 杨向东, 王国磊, 等. 大部件喷涂中的移动机械臂站位规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(6): 1995-2002.
- [9] 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. <https://doi.org/10.3788/OPE.20122007.1485>

-
- [10] 林嘉睿, 邾继贵, 郭寅, 等. 现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 6-11.
 - [11] 侯尚. 飞机部件外形数字化检测规划技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
 - [12] 杨晓辉. 面向飞机大部件的数字化测量站位规划方法[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
 - [13] 马守东, 高栋, 路勇. 基于最小 PDOP 的跟踪仪顺次多站测量站位优化[J]. 计量学报, 2023, 44(2): 157-164.