

大尺寸分布式测量网络重构关键技术研究

马慧宇, 林嘉睿*, 张饶, 程东源, 郝继贵

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 大尺寸分布式测量系统是基于多观测测量交会融合的测量网络, 网型结构是提升网络性能的关键, 对测量精度、效率甚至成本都有重要影响。为了解决遮挡物、测量对象、任务需求不断变化而产生的网络结构重构问题, 首先基于网络节点的覆盖特性, 研究了基于快速碰撞检测的光路遮挡判定方法, 解决了测量盲点判断问题。其次, 研究了基于下一最佳观测方位(NBV)思想的测量网络重构算法。同时, 为了提高组网效率, 利用改进的灰狼算法作为最优位置搜索算法, 重新规划了网络中的节点数量和位置以实现高效组网, 提升重构精度。最后, 以室内空间测量定位系统(wMPS)为验证平台, 通过改变不同测量条件和需求, 从测量覆盖性、精度以及组网效率三个方面验证了所提方法的有效性。

关键词 测量; 分布式测量; 网络重构; 光路遮挡; 灰狼算法

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1112001

Research on Key Technologies for Large-Scale Distributed Measurement Network Reconstruction

Ma Huiyu, Lin Jiarui*, Zhang Rao, Cheng Dongyuan, Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The large-scale distributed measurement system is a measurement network based on multiple measurement fusion. The network structure is the key to improve the network performance, which has an important impact on the measurement accuracy, efficiency and even cost. To solve the network structure reconstruction caused by the changing of obstacles, measurement objects and requirements, based on the coverage performance of the network nodes, the method to determine the lost-of-light issue based on the fast collision detection algorithm is first investigated and the problem of blind spot judgement is solved. Then, the network reconstruction algorithm based on Next-Best-View (NBV) is studied. At the same time, in order to improve the networking efficiency, the improved grey wolf optimization algorithm is used as the best location search algorithm to rearrange the numbers and positions of nodes, and thus efficient networking is realized and the reconstruction accuracy is improved. Finally, with the workshop Measurement Positioning System (wMPS) as the verification platform and from three aspects of measurement coverage, accuracy and networking efficiency, the effectiveness of the proposed method is confirmed by changing measurement conditions and requirements.

Key words measurement; distributed measurement; network reconstruction; lost-of-light; grey wolf algorithm

OCIS codes 120.3940; 120.4640; 150.3045

1 引言

近年来,随着大型装备制造行业对大尺寸测量

要求的提高,大尺寸分布式测量网络因其测量精度高、可灵活扩展等优势而得到了广泛的应用。分布式测量系统是通过多测量单元获取多个观测量,并

收稿日期: 2020-11-27; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51775380, 51835007, 51721003)

* E-mail: linjr@tju.edu.cn

利用角度、长度交会原理实现测量定位的网络^[1-2],目前已经发展出不同类型系统。如基于视觉原理的多相机测量系统^[3-4]、多经纬仪系统^[5],基于光电扫描原理的室内GPS系统(iGPS)^[6]、室内空间测量定位系统(wMPS)^[7-8]和基于超声测距的超声定位网络^[9]等。

分布式测量网络一般由测量节点(仪器设备)、待测节点(被测对象)以及外部控制信息(标志与工装)等网络节点组成,网络节点的变化会导致网络拓扑结构的改变,使得原网络结构无法适应新的测量要求,整体测量性能下降。因此,有必要针对任务对系统结构进行组网重构,优化测量节点站位。但网络重构过程面临以下几个问题:1)仪器自身的测量范围特性、现场复杂的工装设备及遮挡物等会对测量过程造成光路遮挡,影响测量场覆盖率以及测量定位精度,重构过程中需要一种有效的光路遮挡判断方法。2)针对变化的测量任务进行组网重构时,要求重构方法对测量需求具有良好的适应性,能够综合考虑组网过程中的覆盖率、精度和成本等因素。3)重构方法需要能够高效组网,传统人为经验设计方法的重构效率低下,测量精度无法满足当下智能测量的要求。

以测量场中障碍物造成的光路遮挡为考虑因素规划测量节点的布局,在视觉测量方面,Zhang等^[10]研究了监控地铁施工过程中侧壁支架等造成的动态遮挡问题,优化了摄像机的放置。文献^[11]研究了激光跟踪仪网络中的复杂被测模型的光路遮挡问题。但目前仍没有有效的判断光路遮挡的方法。在遮挡检测中,光线追踪(Ray-Tracing)是主要手段之一,通过追踪视点发出的光线是否与物体存在交点以确定是否产生遮挡。在虚拟场景中,碰撞检测技术常被应用于研究刚性物体之间是否存在“穿透”或“重叠”现象^[12]。在游戏引擎Unity3D中,碰撞检测算法函数也被应用于检测光线与物体是否相交从而产生碰撞^[13]。

对于任务需求变化时的有效重构算法,Olague等^[14]针对多相机网络提出了全局优化的策略,分别对测量点分布在1~3个相交平面上的情况进行了组网测量。文献^[15]为了优化场景覆盖,对于重构PTZ相机网络的问题,提出了贪婪方法和强化学习方法的分散重构策略,提高了现场覆盖率和分辨率适应度。任瑜等^[16]针对激光跟踪仪测量网络,采用了全局搜索和局部搜索相结合的方法优化了激光跟踪仪位置,有效提高了测量覆盖率和测量精度。

为了提高组网效率,元启发式算法被广泛应用。乔玉晶等^[17]利用多目标遗传算法优化了多相机网络布局。岳翀等^[18]利用模拟退火-粒子群算法搜索wMPS的发射节点位置,相比于粒子群算法,有效提高了收敛速度,实现了较好的布局结果。文献^[19]提出了灰狼优化算法,与粒子群算法和差分进化算法等元启发式算法相比,在部分工程实际问题中表现出收敛快的良好性能。文献^[20]应用灰狼算法布置相机网络以监控空间,与基于遗传算法和粒子群算法的组网方法相比,实现了更快的收敛速度和更小的计算量。

室内空间测量定位系统是天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自研的分布式测量系统,具有高精度、并行测量、自动测量等优点^[7-8]。本文即以wMPS为平台,针对分布式测量网络重构中的站位优化问题,在测量需求变化的情况下,提出了综合考虑光路遮挡、测量精度、组网效率和成本问题的网络重构算法。针对光路遮挡,首先利用节点覆盖范围特性对光路遮挡进行判断,包括测量节点的有效测量范围和待测节点的有效接收范围。然后研究了障碍物遮挡的影响,提出了利用GJK(Gilbert-Johnson-Keerthi)快速碰撞检测算法判断光路遮挡的方法。接着建立了无测量盲点,在提高或维持测量精度的同时维持成本,利用下一最佳观测方位(Next-Best-View, NBV)思想,删除原有网络的无效发射节点,对增加节点的数量和位置进行规划。针对NBV算法中下一发射节点的最佳位置搜索工具,选定改进收敛因子的灰狼算法进行全局搜索,提高了组网效率。最后,在测量场遮挡物变化和测量任务变化的情况下,对上述方法进行了实验验证。结果表明,本文提出的方法能快速重构测站布局,实现测量任务全覆盖并提高测量精度。

2 节点覆盖范围特性

分布式测量系统的节点覆盖范围特性包括测量节点的有效测量范围特性和待测节点的有效接收范围特性。对于测量节点来说,各测量仪器都有其测量量程,存在一定的测量盲区,导致部分待测节点无法被覆盖。对于待测节点来说,如用球形光电接收器或球形反射镜等信号接收器件,同样会受到接收角度和距离的限制,存在有效接收范围的约束。因此,当待测节点无法接收足够多的光路信息时,则无法解算其三维坐标,其成为测量盲点。以下以wMPS典型的立式发射站和球形接收器为例,分析

节点覆盖范围对待测节点是否为测量盲点的影响。根据 wMPS 特性,以下分别将测量节点和待测节点描述为发射节点和接收节点。

2.1 发射节点的有效扫描范围

wMPS 的发射站的结构示意图和有效扫描范围如图 1 所示。两个激光器随转台同步旋转,对周围空间进行扫描,以提供发射节点信息。由于激光器发射的激光平面与发射站转轴方向有一定倾斜角度 φ_1 和 φ_2 ,通常为 45° ,且激光平面的扇形角 2η 约为 120° ,发射节点的实际测量角度范围为水平方向上为 $0^\circ \sim 360^\circ$,垂直方向上为 $55^\circ \sim 125^\circ$,在发射节点的上下两端会形成圆锥形的扫描盲区。同时,发射节点的有效测量距离为 $3 \sim 50$ m,处在此范围外的接收节点也为测量盲点。

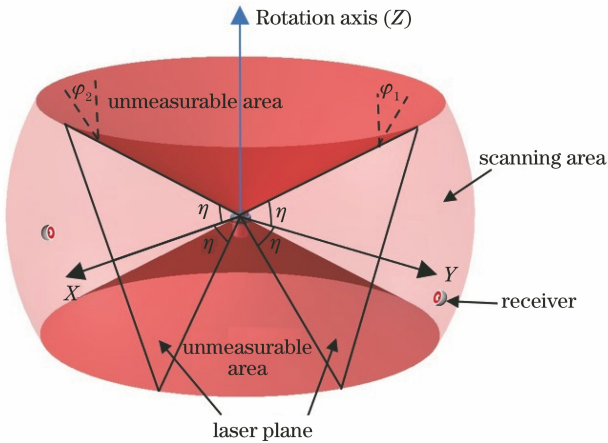


图 1 发射节点的有效扫描范围

Fig. 1 Effective scanning area of transmission node

综上,设在发射节点坐标系下,接收节点的坐标为 (x, y, z) ,则其处于有效扫描范围内的条件为

$$\begin{cases} 3 \text{ m} \leq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq 50 \text{ m} \\ \sqrt{x^2 + y^2} \geq \frac{|z|}{\tan 35^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

对于任意一个接收节点 P ,若其处于第 j 个发射节点的有效扫描范围内,则记 $v_{i1}^j = 1$,否则 $v_{i1}^j = 0$,其中 i 为接收节点编号,即有

$$\begin{cases} v_{i1}^j = 1, & \text{satisfy to Eq. (1)} \\ v_{i1}^j = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 接收节点的有效接收范围

wMPS 的典型信号接收器件为球形光电接收器,其有效接收范围为以接收器朝向向量为中心轴,接收角为 120° 的圆锥形,如图 2 所示。若发射节点处于该圆锥形范围内,则其信号可以被接收节点接收。当接收器处于每一个朝向时,若接收到的有效发射节点信

号的数量不少于 2,则该接收节点能够被测量,否则即为测量盲点。因此,良好的接收器朝向不仅能够使该接收节点可测,同时能保证测量精度。

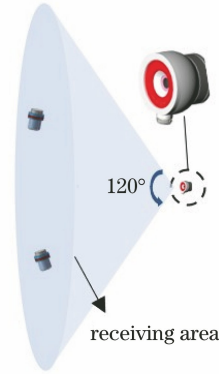


图 2 接收节点的有效接收范围

Fig. 2 Effective receiving area of receiving node

图 3 以俯视图的方式表达了接收器的朝向选择对测量效果的影响。在图 3 中,接收节点(圆形)均位于 5 个发射节点(三角形)的有效扫描范围内,当接收器的朝向分别如图 3 中实线(接收器朝向向量为 μ_1)、点划线(接收器朝向向量为 μ_2)以及虚线(接收器朝向向量为 μ_3)所示时,接收器分别能够被 3、2、0 个发射节点测量。对于任意一个接收节点 P_i ,若存在某一个接收器朝向,在这个朝向下有效接收范围内,发射节点的数量 n_i 满足 $n_i \geq 2$,则该接收节点可测,记 $v_{i2} = 1$,同时认为 n_i 最大时的接收器朝向为最优朝向,否则 $v_{i2} = 0$,即有

$$\begin{cases} v_{i2} = 1, & n_i \geq 2 \\ v_{i2} = 0, & n_i < 2 \end{cases} \quad (3)$$

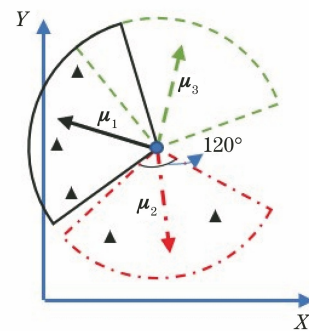


图 3 接收器的朝向选择

Fig. 3 Orientation selection of receiver

3 基于 GJK 碰撞检测算法判断光路遮挡问题

对于任意的发射节点和接收节点,若其中间存在障碍物,发射节点到接收节点的光路被遮挡,则接收节点无法接收到该发射节点的测量信息。因此,

判断接收节点是否为测量盲点还需要考虑发射节点和接收节点之间障碍物导致的光路遮挡问题。

判断测量过程中是否会发生光路遮挡,即是判断光路与障碍物是否相交。通常可以通过判断从发射节点到接收节点的有向线段与遮挡物的任意一个平面三角形是否有交点来判断是否产生遮挡^[21]。

如图 4 所示,设发射节点为坐标原点 O ,在发射站坐标系下,接收节点为 P , $\Delta V_1V_2V_3$ 为遮挡物的某一个三角面片, \vec{OP} 为发射节点到接收节点的光路向量。若 \vec{OP} 与 $\Delta V_1V_2V_3$ 相交,设交点为 T ,可知向量 \vec{OT}, \vec{OP} 可表示为

$$\vec{OT} = (1 - u - v)\vec{OV}_1 + u\vec{OV}_2 + v\vec{OV}_3, \quad (4)$$

$$\vec{OP} = w\vec{OT}, \quad (5)$$

式中: u, v, w 为比例系数,若满足

$$\begin{cases} 0 \leq u \leq 1 \\ 0 \leq v \leq 1, \\ 0 \leq w \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

则 \vec{OP} 与 $\Delta V_1V_2V_3$ 相交,即光路 OP 被遮挡物遮挡,发射节点无法对接收节点进行测量。

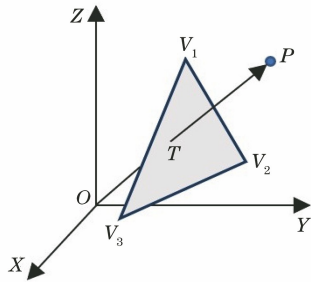


图 4 光路与遮挡物三角形面片的相交判断

Fig. 4 Judgment of intersection between light path and triangular face of obstacle

对于复杂的测量环境和任务,障碍物的几何信息复杂,待检测的障碍物繁多,虽然某一个可能的障碍物不产生光路遮挡,但仍需要使该障碍物的每一个分解的三角面片与光路进行相交判断,计算量庞大。针对这个问题,采用 GJK 碰撞检测算法判断光路遮挡问题,提高检测相交的效率,降低时间复杂度。碰撞检测算法用于 3D 物体的相交检测时,同样需要先将光路和遮挡物量化为 3D 模型^[22]。由于 GJK 算法适用于凸体之间的碰撞检测,因此遮挡物模型可预先分解为多个凸体的组合。以遮挡物为凸体为例,利用 GJK 算法判断光路和遮挡之间是否发生碰撞,即检测两个物体模型的顶点集合的明科夫斯基(Minkowski)差是否包含原点。设光路模型的顶点集为 L ,遮挡物模型的顶点集为 H ,则两个顶点集的明科夫斯基差 M 为

$$M = L \ominus H = \{l - h, l \in L, h \in H\}, \quad (7)$$

式中: \ominus 表示对顶点集 L 和 H 求明科夫斯基差; l 为顶点集 L 内的任意一点; h 为顶点集 H 内的任意一点。可得这两个点集的明科夫斯基差仍然是凸体^[23]。

当且仅当这个凸体包含原点时,两物体之间发生碰撞,即同时满足

$$\min\{d_m : m \in M\} = 0, \quad (8)$$

式中: m 为 M 中的任一元素; d_m 为元素 m 与原点的距离。

若不包含原点,则明科夫斯基差构成的集合中的元素到原点的最近距离,即为两个物体模型之间的最近距离。判断明科夫斯基差构成的模型是否包含原点,只需在其内部迭代生成一个单纯形,使其尽量包含原点,若单纯形包含原点,则明科夫斯基差构成的模型也必然包含原点^[22]。迭代生成单纯形的过程为:计算初始单纯形顶点中距离原点最近的点 S_1 ,若这个点恰好为原点,可知原点属于该单纯形,判断产生碰撞,算法终止;反之则求解 S_1 相反方向上的支撑点 S_2 ,并与 S_1 作比较,若其在由原点指向 S_1 的方向上不是极值点,则不产生碰撞,否则用其替代 S_1 更新单纯形,如此循环迭代判断是否产生碰撞^[24]。因此,对于任意一个接收节点和发射节点来说,若发射节点到该接收节点的光路与任意一个遮挡物之间无遮挡,则记 $v_{i3}^j = 1$,否则 $v_{i3}^j = 0$,即有

$$\begin{cases} v_{i3}^j = 0, & \text{satisfy to Eq. (8)} \\ v_{i3}^j = 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

结合第一节,对于一个确定的网络拓扑结构和任意一个接收节点 P ,在处于接收节点有效接收范围内的发射节点中,同时满足接收节点处于发射节点有效扫描范围内且无遮挡物遮挡的发射节点个数不小于 2,则该接收节点可以被测量,记 $v_i = 1$,否则 $v_i = 0$,为测量盲点,即

$$\begin{cases} v_i = 1, & v_{i2} \cdot \sum_{k=1}^{N_{ie}} (v_{i1}^k \cdot v_{i3}^k) \geq 2 \\ v_i = 0, & v_{i2} \cdot \sum_{k=1}^{N_{ie}} (v_{i1}^k \cdot v_{i3}^k) < 2 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: k 为第 k 个处于有效接收范围内的发射节点; N_{ie} 为处于有效接收范围内的发射节点总数。

4 基于下一最佳观测方位思想的网络重构算法

当测量任务改变时,测量网络的重构算法需要

综合考虑组网过程中的光路遮挡、测量精度、成本等因素,适应变化的任务需求。NBV^[25-27]多用于视觉测量领域,其核心思想是相机在获得一定量不完整的物体信息的基础上,聚焦于测量盲区以决定相机的下一个最佳位姿,使得相机在下一个位姿可以最大程度地获取未知信息。利用这个思想,对 wMPS 网络拓扑结构进行重新配置,解决在新的任务输入下原有网络覆盖率和测量精度下降的问题。

4.1 利用 NBV 思想的网络重构算法流程

对 wMPS 网络进行重构,即针对新的测量任务对节点站位进行重新规划。为了避免时间和成本的浪费,在原有结构的基础上,只去除无效的发射节点,在合适的位置增加新的发射节点,以达到更优的网络性能。当每增加一个合适的发射节点时,需要满足或接近以下要求:1)无测量盲点;2)整体测量精度最高;3)发射节点数量最少。因此,在进行网络重构时,目标为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{N_r} d_{p_i} \\ \min N_t \\ \text{s. t. } d_{p_i} \leq \epsilon_i \\ v_i = 1 \end{cases}, \quad (11)$$

式中: N_t 为发射节点的数量; d_{p_i} 为第 i 个接收节点的测量不确定度; N_r 为接收节点的数量; ϵ_i 为第 i 个接收节点的测量不确定度要求。本文定义能够解算三维坐标但无法达到测量精度要求的接收节点

也为测量盲点。接收节点的测量不确定度可直接通过实验数据或精度分析获得^[28]。

在进行网络重构时,首先认为网络中的无效发射节点已被删除,对其进行拓扑结构的重新规划,只需考虑增加发射节点的数量和其位置。重构网络时针对新的测量任务下的所有接收节点,将其分为测量盲点集和其余点集,其中测量盲点集分配较高的优先级,意味着需要优先考虑这些接收节点的测量效果。基于下一最佳观测方位思想,每次只增加一个发射节点,利用改进的灰狼算法搜索发射节点的最优位置以重构网络。对于每次增加发射节点后的测量网络,判断其网络性能是否达到(11)式的约束条件,若达到则停止增加发射节点,网络重构完成,未达到则更新当前结构下的测量盲点集和其余点集,针对该点集再继续增加一个发射节点,重复这一过程直至满足约束条件。由于该算法能够满足成本最低,因此对于网络性能的评价,主要考虑测量覆盖率和测量精度。则重构目标变为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{N_r} d_{p_i} \\ \text{s. t. } d_{p_i} \leq \epsilon_i \\ v_i = 1 \end{cases} \quad (12)$$

经过上述基于 NBV 思想的网络重构算法计算后,最终的网络拓扑结构能够在保证无测量盲点的基础上提高测量精度,同时成本最低,其流程图如图 5 所示。

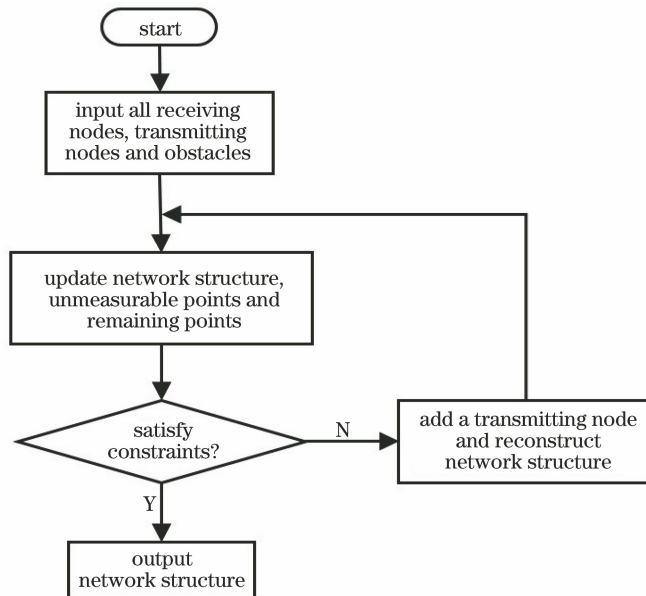


图 5 基于 NBV 的网络重构算法流程图

Fig. 5 Flow chart of network reconstruction algorithm based on NBV

4.2 基于改进灰狼算法的下一最佳发射节点位置

在基于 NBV 的网络重构过程中,需要一种搜索算法实现高效求解新增发射节点的最佳位置。灰狼算法^[19]在 2014 年被提出,是一种模拟自然界灰狼种群捕获猎物过程的元启发式算法。相较于遗传算法、粒子群算法等,灰狼算法在处理一些数学问题上具有更好的性能,但也具有容易陷入局部最优的缺点^[19, 29]。针对 wMPS 网络配置的要求,对灰狼算法进行改进,将其应用于解算发射节点的最优位置。

灰狼算法的过程为:狼群中每一个灰狼的位置代表一个可能解,猎物代表最优解,根据灰狼个体的适应度对狼群划分等级,适应度用(12)式计算。在狼群中, α 狼为网络性能最优的狼, β 狼次之, δ 狼再次之,其余的狼为 ω 狼。在灰狼的等级制度下, α , β , δ 狼为狼群中性能最优的狼,因此具有引领作用,更加接近猎物的潜在位置。在灰狼捕猎的过程中,这种等级制度充分发挥作用,狼群在 α 狼的带领下包围猎物, β , δ 狼对猎物进行攻击, ω 狼协助捕猎,最终捕获猎物。在每一次迭代的过程中更新狼群的位置,位置更新公式^[19]为

$$\begin{cases} D_{\alpha} = |C \cdot X_{\alpha}(t) - X(t)| \\ D_{\beta} = |C \cdot X_{\beta}(t) - X(t)| \\ D_{\delta} = |C \cdot X_{\delta}(t) - X(t)| \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_{\alpha}(t) - A_1 \cdot D_{\alpha} \\ X_2 = X_{\beta}(t) - A_2 \cdot D_{\beta} \\ X_3 = X_{\delta}(t) - A_3 \cdot D_{\delta} \end{cases}, \quad (14)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (15)$$

$$A = 2a \cdot r_1, \quad (16)$$

$$C = 2r_2, \quad (17)$$

$$a = 2\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right), \quad (18)$$

式中: X_{α} , X_{β} , X_{δ} 分别为 α , β , δ 狼的位置; $X(t)$ 为当前狼的位置; t 为当前迭代次数; D_{α} , D_{β} , D_{δ} 分别为狼群中灰狼个体与 α , β , δ 狼的距离; A 和 C 为系数因子; A_1 , A_2 , A_3 分别为 α , β , δ 狼的系数因子; r_1 和 r_2 的模是 $[0, 1]$ 内的随机数; a 为收敛因子,其值随着迭代次数的增加从 2 线性减小到 0; t_{\max} 为最大迭代次数。可知在算法前期, $|A| > 1$,狼群较为分散,即进行全局搜索以寻找猎物所在范围,随着 a 的递减,当 $|A| \leq 1$ 时,算法开始进行局部搜索,寻找猎物的确切位置,找到最优解^[19]。

针对 4.1 节搜索下一最佳发射节点的问题,需

在三维空间搜索发射节点的位置。对于每一次迭代的狼群中的每一个个体狼,均将其位置与此次搜索前的网络结构组合为新的网络拓扑结构,以判断狼群中所有个体的适应度,即其所对应的网络性能。

首先,在初始化以及后续狼群位置更新时,将遗传算法与灰狼算法相结合,对灰狼位置进行离散化。wMPS 的发射站本身具有一定尺寸,结合其测量特点,若采用传统灰狼算法的连续位置更新方法,会产生不必要的计算资源浪费,因此利用遗传算法的离散化实值编码方式,对狼群可以存在的区域范围进行编码。如图 6 所示,对狼群位置区域进行网格划分并编号,网格的大小由测量任务规定,格点表示狼群可以存在的位置。在对灰狼位置更新的过程中,编码均需圆整以保证发射节点的位置处于网格格点上。

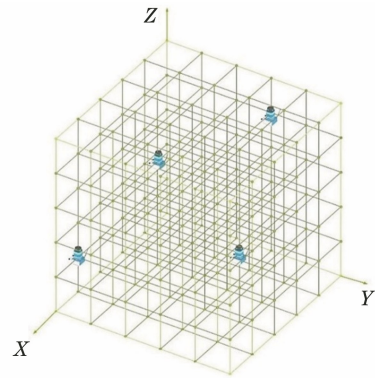


图 6 网络空间的离散化

Fig. 6 Discretization of network space

其次,针对灰狼算法容易陷入局部最优的问题,采用收敛因子 a 非线性递减的方式代替线性递减。经过多次实验求解,利用反比例函数

$$a = 2\left(\frac{s}{\frac{t}{t_{\max}} + p} + q\right), \quad (19)$$

进行改进,使得在搜索前期收敛因子下降平缓,具有更优的全局探索能力,后期收敛因子下降迅速,有利于局部快速收敛,从而搜索到全局最优解。为了满足迭代次数 $t=0$ 时 $a=2$, $t=t_{\max}$ 时 $a=0$ ^[19],需要相应的平移因子 p 和 q 。可得,当比例系数 s 不同时, p 和 q 的值也相应发生变化,在这里取 $s=1$ 。

5 仿真与实验

为了验证上述基于 NBV 算法的网络重构算法在遮挡物变化和测量任务变化时的有效性,在 wMPS 平台上进行实验验证。首先,在实验场地约为 $15 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的空间内选取 22 个稳定位置

布置接收节点,作为原始测量任务,以一字形布置了编号为 1~5 共 5 个发射站,与 22 个待测点的原始任务组成原始网络结构。针对原始任务要求,该网络下无测量盲点,如图 7 所示。

然后在环境中增加三块折板作为遮挡物,折板的大小约为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$,如图 7 中编号为 1、2、3 的立方体所示,立方体边界即为遮挡边界。其中,编号为 1 和 2 的折板位于编号为 4 和 5 的发射站前方 0.5 m 处,能够全部遮挡 4 号和 5 号发射站的发射信号,编号为 3 的折板位于测量空间中央。同时在测量任务中新增 6 个接收节点,如图 8 圆形框所示,从而构成含有 28 个接收节点的新的测量任务。在新的环境和任务要求下,发射节点 1、4 和 5 被遮挡,为无效节点,测量盲点数为 13 个,共 15 个接收节点可测。利用第 4 节基于 NBV 的网络重构算法流程,首先去除无效发射节点,然后依次新增发射节点站位,直至满足接收节点全覆盖和整体精度提高的要求。其中,发射节点采用固定高度 1.3 m ,网格间隔为 0.2 m 。同时设定测量盲点的精度判断要求为测量误差小于 1.5 mm ,狼群中的个体数为 20,迭代次数为 100。

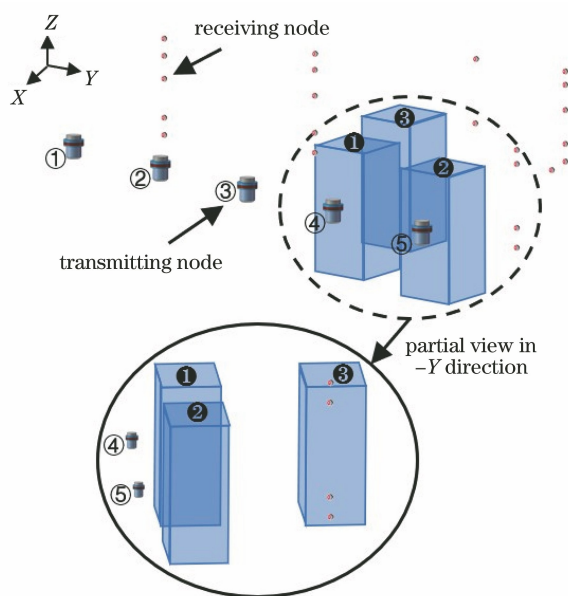


图 7 wMPS 网络重构前的场景示意图
Fig. 7 Schematic of scene before wMPS network reconstruction

最终结果为当发射站数量为 5 个时即可满足任务要求,新增的发射节点如图 8 中编号为 6、7、8 的发射节点,整体测量网络站位布局如图 8 所示,实验场景如图 9、10 所示。

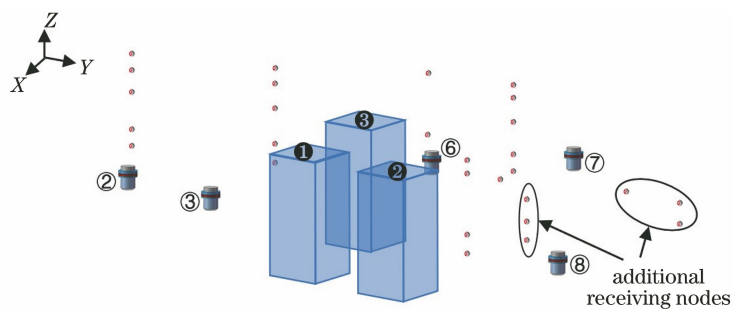


图 8 wMPS 网络重构后的场景示意图
Fig. 8 Schematic of scene after wMPS network reconstruction

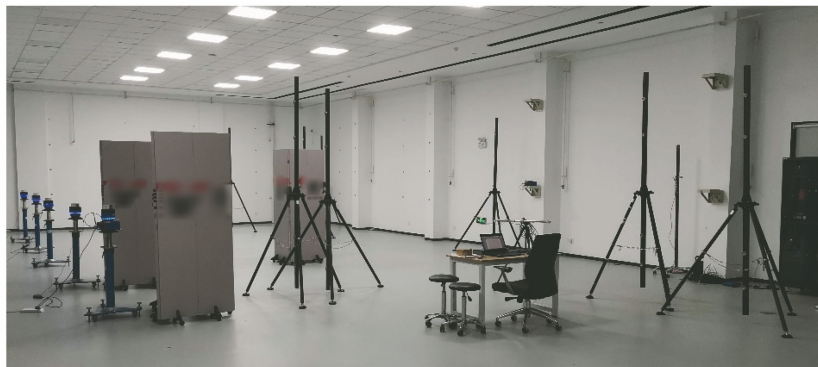


图 9 wMPS 网络重构前的实验场景
Fig. 9 Experimental scene before wMPS network reconstruction

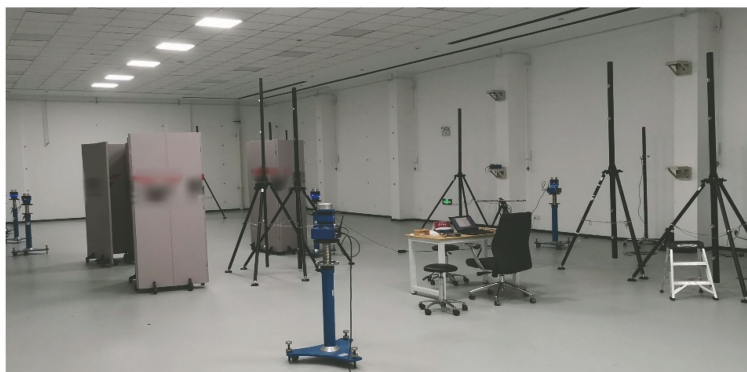


图 10 wMPS 网络重构后的实验场景

Fig. 10 Experimental scene after wMPS network reconstruction

按照重构后的结果完成组网后, 28 个接收节点均可测。对于重构后的测量精度, 对重构前 15 个可测的接收节点的测量误差进行对比, 结果如图 11 所示。由于重构目标综合考虑了整体测量精度、成本等, 因此点 4 和点 13 的测量误差增加, 但均在测量误差允许范围内。该 15 个接收节点在原有任务下以及重构后的均方根误差分别为 0.65 mm 和 0.47 mm。可得组网重构后, 实现了待测点全覆盖, 整体测量误差有所减小, 且维持了测量成本。

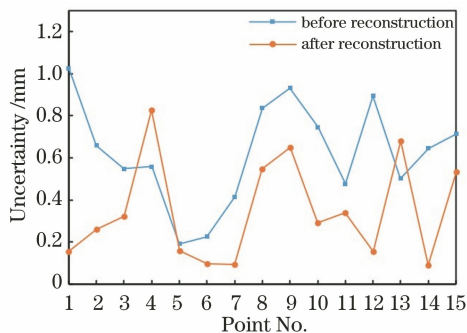


图 11 不确定度对比

Fig. 11 Comparison of uncertainty

为了验证 4.2 节所述改进灰狼算法的性能, 分别将其与传统灰狼算法和遗传算法进行比较, 其中利用传统灰狼算法和遗传算法计算时, 种群中个体数均为 20, 遗传代数均为 100。为了明显显示对比效果, 将三种算法计算的效果统一到归一化坐标系下, 图 12 所示为第一次计算发射节点最优位置的对比图。可以看出, 相比于传统灰狼算法和遗传算法, 本文所述改进灰狼算法的收敛速度和计算效果均较优, 提高了组网效率。

6 结 论

针对大尺寸任务变化情况下分布式测量网络的重构问题, 从光路遮挡、重构效率、测量精度等方面

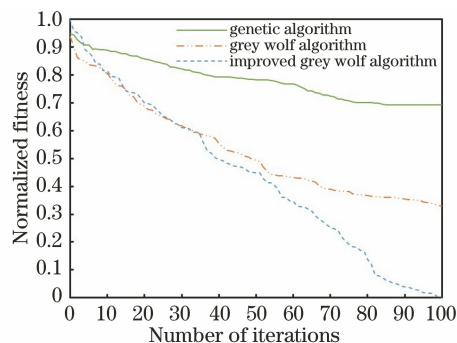


图 12 归一化适应度值的对比

Fig. 12 Comparison of normalized fitness

研究了基于 NBV 的自动化网络重构算法, 利用 GJK 算法判断障碍物产生的光路遮挡, 并利用改进的灰狼算法搜索最优节点位置。以 wMPS 为实验平台进行了实验验证, 实验结果表明, 在改变接收节点和遮挡要素后, 所提重构方法得到的测量节点网络能够实现待测节点全覆盖, 整体测量误差减小, 测量成本得到维持, 从而验证了该方法的可行性和准确性。将改进后的灰狼算法与传统灰狼算法和遗传算法进行比较, 所提算法能够提高求解的收敛性和速度, 重构效率得到提高。

但本文只针对 wMPS 进行了仿真和实验验证, 没有对多类型测量系统的网络重构方法进行研究。因此, 未来工作将关注异构测量网络的重构方法, 在复杂环境下实现较好的重构网络性能。

参 考 文 献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, et al. Advances in large-scale metrology: review and future trends [J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] Zhang X P, Wang J Q, Zhang Y X, et al. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.

- 张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- [3] Beynon M D, van Hook D J, Seibert M, et al. Detecting abandoned packages in a multi-camera video surveillance system [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, July 22, 2003, Miami, Florida, USA. New York: IEEE Press, 2003: 221-228.
- [4] Zhang G J, Liu Z, Wei Z Z, et al. Four-channel synchronous dynamic measurement system for rudder angles based on line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1910-1915.
- 张广军, 刘震, 魏振忠, 等. 基于线结构光的四通道舵偏角同步动态测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1910-1915.
- [5] Li Z C, Li G Y, Tang T S, et al. Electronic multi-theodolite measuring system applied in the precision installation of a large antenna [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005, 25(1): 26-30.
- 李宗春, 李广云, 汤廷松, 等. 电子经纬仪交会测量系统在大型天线精密安装测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 26-30.
- [6] Hada Y, Takase K. Multiple mobile robot navigation using the indoor global positioning system (iGPS) [C] // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium, October 29-November 3, 2001, Maui, HI, USA. New York: IEEE Press, 2001: 1005-1010.
- [7] Lin J R, Guo F, Qi F, et al. Innovative measurement technology for digital shipbuilding [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(12): 1-5, 18.
- 林嘉睿, 郭烽, 齐峰, 等. 船舶数字化制造的测量技术创新[J]. 中国测试, 2018, 44(12): 1-5, 18.
- [8] Ren Y J, Zhao X, Guo S Y, et al. Path planning control of automated guided vehicle based on workshop measurement positioning system and fuzzy control [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312003.
- 任永杰, 赵显, 郭思阳, 等. 基于 wMPS 和模糊控制的 AGV 路径规划控制[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0312003.
- [9] Qi J, Liu G P. A robust high-accuracy ultrasound indoor positioning system based on a wireless sensor network[J]. Sensors, 2017, 17(11): E2554.
- [10] Zhang Y C, Luo H B, Skitmore M, et al. Optimal camera placement for monitoring safety in metro station construction work[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(1): 04018118.
- [11] Muelaner J E, Wang Z, Keogh P S, et al. Uncertainty of measurement for large product verification: evaluation of large aero gas turbine engine datums [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(11): 115003.
- [12] Dobkin D P, Kirkpatrick D G. A linear algorithm for determining the separation of convex polyhedra [J]. Journal of Algorithms, 1985, 6(3): 381-392.
- [13] Xie Z Q. Research and implementation of interactive virtual assembly technology based on Unity 3D [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 26-29.
- 谢振清. 基于 Unity 3D 的虚拟装配技术研究是实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 26-29.
- [14] Olague G, Mohr R. Optimal camera placement to obtain accurate 3D point positions [C] // Proceedings of the Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, August 20, 1998, Brisbane, Queensland, Australia. New York: IEEE Press, 1998, 1: 8-10.
- [15] Bisagno N, Xamin A, de Natale F, et al. Dynamic camera reconfiguration with reinforcement learning and stochastic methods for crowd surveillance [J]. Sensors, 2020, 20(17): 4691.
- [16] 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.
- [17] Qiao Y J, Tan S Z, Jiang J G, et al. Planning strategy for multi-visual measurement networking [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515005.
- 乔玉晶, 谭世征, 姜金刚, 等. 一种多视觉测量组网规划策略 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515005.
- [18] Yue C, Xiong Z, Xue B, et al. Station deployment of workspace measuring and positioning system based on simulated annealing particle swarm algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(7): 67-73.
- 岳翀, 熊芝, 薛彬, 等. 基于模拟退火-粒子群算法的 wMPS 布局优化 [J]. 光电工程, 2016, 43(7): 67-73.
- [19] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A, et al. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [20] Kaushik A, Indu S, Gupta D, et al. A grey wolf optimization based algorithm for optimum camera placement [J]. Wireless Personal Communications,

- 2019, 105(3): 1143-1167.
- [21] Möller T, Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection[J]. *Journal of Graphics Tools*, 1997, 2(1): 21-28.
- [22] Bergen G V D. A fast and robust GJK implementation for collision detection of convex objects[J]. *Journal of Graphics Tools*, 1999, 4(2): 7-25.
- [23] Ikehata M. Reconstruction of the support function for inclusion from boundary measurements[J]. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 2000, 8(4): 367-378.
- [24] Dyllong E, Luther W. The GJK distance algorithm: an interval version for incremental motions [J]. *Numerical Algorithms*, 2004, 37 (1/2/3/4): 127-136.
- [25] Banta J E, Wong L R, Dumont C, et al. A next-best-view system for autonomous 3-D object reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A: Systems and Humans*, 2000, 30(5): 589-598.
- [26] He B W, Lin D Y, Chen Z P, et al. Research of eliminating occlusion in visual construction of three-dimensional objects [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0708001.
- 何炳蔚, 林东艺, 陈志鹏, 等. 三维物体视觉测量重构中解决遮挡问题的方法研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0708001.
- [27] Zhang L, Zuo J Q, Yao X T, et al. A robot visual servo-based approach to the determination of next best views [C] // 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 2-5, 2015, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2015: 2654-2659.
- [28] Guo S Y, Lin J R, Ren Y J, et al. Study of network topology effect on measurement accuracy for a distributed rotary-laser measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 094101.
- [29] Fang X Y, Li X B, Guo Z, et al. Improved hybrid grey wolf optimization support vector machine prediction algorithm and its application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 122801.
- 方晓玉, 李晓斌, 郭震, 等. 一种改进的混合灰狼优化支持向量机预测算法及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(12): 122801.