

引用格式: LIN Xuezhu, DONG Jiyu, GUO Lili, et al. Research on the optimization method for the layout of public transfer stations in multi-system collaborative measurement fields[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0712002

林雪竹,董济育,郭丽丽,等.多系统协同测量场公共转站点布设优化方法[J].光子学报,2026,55(7):0712002

多系统协同测量场公共转站点布设优化方法

林雪竹,董济育,郭丽丽,李丽娟

(长春理工大学 光电工程学院 飞行器结构检测与评估学科与技术中心, 长春 130022)

摘 要:在多系统协同测量场中测站已知的前提下,为了进一步提高不同系统、不同站位之间的数据融合精度,提出一种多系统协同测量场的公共转站点优化布设方法。首先,建立多系统协同测量坐标统一模型及测量场精度评价模型;其次,基于隐藏点移除算法实现工装遮挡下的单测站可视区域判定,通过几何容差方法结合各单站可视区域实现多测站共视区域判定,为公共转站点选址提供可视及观测冗余条件;再次,运用蒙特卡洛法进行不确定度分析以优化候选点集,依据差异化精度阈值筛选得到最优公共转站点集合;最后,通过仿真分析与实例验证对方法性能进行评估。结果表明:本文方法的整体测站均方根误差与公共转站点均方根误差,较传统方法提升约 34% 与 32%,较兼顾位置分布与测量精度的坐标转换公共点优选方法分别提升约 15% 与 22%,在某飞机实际装配现场的多系统协同测量场中,整体测站均方根误差与公共转站点均方根误差分别为 0.078 mm 和 0.071 mm。该方法为复杂遮挡环境下多系统协同测量场的高精度、稳健组网提供了有效解决方案与理论支持。

关键词:公共点;坐标转换;协同测量;精度优化;多系统

中图分类号:TH741

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0712002

专家一:

问题 1:第三章仿真实验中,“20 个具有代表性的点位”的选取依据是什么? 是否有更优的选取方案? 点位数量如何影响测量结果?

答:感谢审稿专家的宝贵意见,关于“20 个具有代表性点位”的选取依据,主要基于以下考虑:

1) **测站数量与转站稳定性要求:**本文仿真实验共涉及 10 个测量站位,为保证转站关系的稳定与冗余,任意两个相邻测站之间至少需要 3 个不共线的公共转站点,而从实际工程经验出发,每对测站间布置 4~5 个公共点可进一步提升解算稳健性。

2) **候选点分布与实验规模平衡:**在满足上述冗余要求的前提下,为兼顾实验效率与对比公平性,同时尽可能减少布点工作量,结合被测构件表面候选点集的分布情况,最终选取 20 个点位作为本文方法的布设样本。传统经验法亦采用相同数量的点位进行对比,使两种方法在相同点数条件下进行公平比较。

3) **点位数量影响分析:**理论上,增加公共转站点数量可提高坐标转换的冗余度和精度,但也会增加测量成本与时间。后续研究中,我们将进一步分析不同数量公共转站点组网精度的影响规律,以期为实际工程提供更优的布点策略参考。

根据您的建议,已在论文第 3.1.1 节中标红部分的文字部分补充了关于点位数量选取依据的说明。

问题 2:实验对比不充分。实验中仅仅对优化方法筛选得到的公共转站点集合与传统布设方法所选取的公共转站点集合进行性能评估,而未与行业内最新的方法进行对比。建议增加相关对比实验。

答:感谢审稿专家的宝贵意见。为使实验对比更加充分,在第 3.1 节仿真实验中,增加了“兼顾位置分布

基金项目:吉林省自然基金面上项目(No. 20250102240JC)

第一作者:林雪竹(1985—),女,副研究员,博士,主要研究方向为光电精密测量与数字孪生。Email: custsnow@163.com

通讯作者:林雪竹(1985—),女,副研究员,博士,主要研究方向为光电精密测量与数字孪生。Email: custsnow@163.com

收稿日期:2025-12-25;录用日期:2026-04-27

<http://www.photon.ac.cn>

与测量精度的坐标转站点公共点优选方法”进行对比,该方法是近年来行业内最新的公共转站点优选方法。为使该方法适用于本文的实验场景,我们基于其核心选点逻辑设计了对比方案,具体选点结果已在正文中说明。

问题3:文字仅仅进行了仿真实验,缺乏实物实验,建议补充实物实验,以增强结果的可信度。

答:感谢审稿专家的宝贵意见。为验证本文方法在实际工程环境中的有效性,本文新增了第3.2节实例验证,以某飞机装配为例,验证本文方法在实际工程中同时做到多系统协同测量场“多站共视”与“高精度”矛盾问题上的有效性。

问题4:格式问题,请再通篇检查,如:第2页的“式中 ${}^G_M R$ 为变换旋转矩阵, ${}^G_M T$ 为平移矩阵。为求解系统间最优转换参数,基于公共转站点距离不等精度最小二乘原理,以加权距离误差平方和最小为目标,引入权重 p ,目标函数为:”应该为单独的一段,不需要首行缩进。类似问题多次出现,如1.2节、2.1节中。

答:感谢专家的细致指正。我们已对全文进行了通篇检查,修正了所有类似格式问题,包括公式前后的段落缩进、图表标题的格式等,确保符合期刊要求。

专家二:

问题:论文针对协同测量场公共转站点布设优化进行了方法研究,仅仅做了仿真验证,不能充分体现方法的有效性,另外,针对测量视场遮挡问题,验证充分性不够,整体方法创新性有限。建议补充实验,同时进一步提炼和增强文章的整体创新性。

答:感谢专家的深刻指导。针对您提出的三点意见,我们进行了如下修改:

1) **补充实物实验:**新增第3.2节实例验证,在实际装配现场对本文方法进行了验证,实验结果证明了本文方法的工程适用性。

2) **针对测量视场遮挡问题:**本文的研究重点是在已知测量站位的前提下,进行单测站可视区域判定,并提取多测站共视区域,作为公共转站点的备选空间,而非解决“测量视场遮挡问题”。该方法可确保所选点位均位于多站共视区域,保障首次组网的成功率。为加强该方法的验证充分性,在新增的第3.2节实例验证中,于某飞机装配现场开展了实验,结果表明本文方法在真实环境下仍能实现100%的首次组网成功率,充分验证了其在可视性判定方面的可靠性。

3) **提炼创新性:**仿真实验增加了与行业内的最新方法进行对比,本文方法在首次组网成功率和组网精度上均表现最优,并且补充了实物实验,验证了该方法在解决多系统协同测量场中同时做到“多站共视”与“高精度”矛盾问题上的有效性。

0 引言

多系统协同测量场面向高端精密装备与大型构件装配任务,尤其是在大型机械设备和大型复杂光机系统等领域^[1-2],通过采用多种测量仪器进行协同测量与数据共享,形成一种覆盖范围广、精度高、效率好的先进测量方法^[3-4],为实现高端装备精密制造与大型构件智能装配提供高精度、高效率、全流程的测量支撑^[5-9]。在实际大尺寸测量任务中,各系统在测量原理、误差来源及空间覆盖能力上具有显著差异,合理优化公共转站点的空间分布,对保障坐标转换精度、提高组网效率、增强测量场整体稳定性具有重要作用^[10-12]。

目前,在提升协同测量场组网精度的研究中,学界与工程界的关注点多集中于测量站位优化布局^[13]。熊涛^[14]等人通过针对激光跟踪仪、激光扫描仪及工业机器人构成的组合测量系统,构建了约束模型并设计了规划算法,实现了站位数量与测量时间的大幅缩减。于浩^[15]等人面向大尺寸产品,提出一种融合室内全球定位系统(indoor Global Positioning System, iGPS)、移动机器人平台与线结构光传感器的组合检测方法,采用K-均值聚类算法进行站位规划,实现了在少数站位下对分布式特征的自动化高精度检测。在测量站位确定的前提下,针对公共转站点的布设方法的相关研究欠缺,多数公共转站点布设基于传统的人工经验性方法。传统人工经验在布设公共转站点时,通常只根据构件外形和测量场中的均匀分布原则选点,未充分考虑多站共视条件、测量不确定度传播等关键因素。该方法虽操作简便,但在复杂的实际测量环境中,易受工装遮挡、设备布置等空间限制的影响,常需反复重新布设公共转站点,不仅影响测量效率,也可能因点位测量精度欠佳而降低坐标转换的精度与稳定性。尤其是在多系统协同测量场中,公共转站点的布设更缺乏相应的理论支撑与方法。尹晖^[16]等人提出采用面积分析法进行公共转站点选取,即通过计算平面内任意三

点围成的三角形面积,并选择面积最大的一组点作为公共转站点。然而,该方法在计算效率上表现不佳,且在公共转站点数目有限的情况下,往往难以维持较高的坐标转换精度。贺俊凯^[17]等人提出了顾及控制点空间分布的坐标转换模型研究,分析了公共转站点均匀度和密度对坐标转换模型精度的影响,但未充分考虑实际测量误差带来的影响。刘忠贺^[18]等人设计了一种兼顾位置分布和测量精度的公共转站点优选方法,结合了粗差剔除与象限分布选取,旨在保证点位分布均匀并控制粗差影响,但其研究未涉及实际工装遮挡与测量系统精度模型的约束条件。

综上所述,当前缺少一种在已完成多系统站位规划的基础上,面向多系统测量数据融合的公共转站点布设方法。针对这一问题,本文提出一种多系统协同测量场的公共转站点优化布设方法。首先,构建多系统协同测量坐标统一模型与精度评价模型,实现多系统测量数据的基准统一与测量场精度量化评估;其次,在测量站位已知的前提下,建立公共转站点优化布设方法。该方法具备两大功能:一是单测站可视区域判定与多测站共视区域判定,针对在工装遮挡情况下,获取各测量站位在被测构件上的可视区域问题,引入隐藏点移除(Hidden Point Removal, HPR)算法,实现单测站可视区域的判定,为点位选址提供可靠的测量可视性基础,并基于各单测站可视区域,通过几何容差方法进行多测站共视区域判定,筛选出能被多个站位同时观测的候选区域,确保公共转站点具备必要的观测冗余;二是基于不确定度分析的公共转站点优化功能,针对多系统仪器精度不均衡带来的误差累积问题,通过对共视区域点云进行体素化采样,以单点代替局部点云的整体精度方式,降低点云数据规模、提高计算效率,从而生成均匀候选点集,基于激光跟踪仪与电子经纬仪的测量误差模型,利用蒙特卡洛法计算各候选公共转站点的预测不确定度,并针对多系统的精度特性设置差异化精度阈值,从而筛选出最优公共转站点集合。本文通过仿真分析与实例验证系统评估了该方法在提升首次组网成功率和测量精度方面的有效性,为大型构件多系统协同测量场的高效、高精度构建提供了系统的理论支撑与解决方案。

1 多系统协同测量场建立及精度评价

1.1 多系统协同测量坐标统一模型

多系统协同测量场构建的核心目标是在一个相对稳定的测量环境中,依靠统一的空间基准实现各测量系统之间的空间坐标系统一,确立统一的空间基准对后续的空间数据采集与处理具有重要意义^[19]。本文所述的多系统协同测量场由多站位激光跟踪系统与多站位电子经纬仪系统组成。其中,多站位激光跟踪系统通过在大尺寸测量空间中的点位测量构建全局坐标系,其测量合作目标为高精度特制球形靶标。电子经纬仪系统基于准直测量原理完成矢量角的精确测量,其测量合作目标为十字叉丝半球靶标。在测量场内布置可同时承载球形靶标和十字叉丝半球靶标的装置,从而实现多系统坐标系的统一。

测量场内的局部坐标系包括测量坐标系和工件坐标系。其中测量坐标系由多站位激光跟踪系统与多站位电子经纬仪系统的仪器自身坐标系构成,工件坐标系由被测构件自身所定义,其与全局坐标系的关系通过空间网络数据配准的多次坐标转换确定:设多系统协同测量场中全局坐标系为 $O_G - X_G Y_G Z_G$,局部坐标系为 $O_{Mi} - X_{Mi} Y_{Mi} Z_{Mi} (i = 1, 2, \dots, n)$,公共转站点在全局坐标系下记为 $Q = (X_j, Y_j, Z_j) (j = 1, 2, \dots, m)$,在局部坐标系下记为 $P = (X_j, Y_j, Z_j) (j = 1, 2, \dots, m)$,坐标系数据转换模型为:

$$Q = {}^G_{Mi}R \cdot P + {}^G_{Mi}T \quad (1)$$

式中 ${}^G_{Mi}R$ 为变换旋转矩阵, ${}^G_{Mi}T$ 为平移矩阵。为求解系统间最优转换参数,基于公共转站点距离不等精度最小二乘原理,以加权距离误差平方和最小为目标,引入权重 p ,目标函数为:

$$\delta = \sum_{Mi=1}^m \| p_G Q - ({}^G_{Mi}R \cdot p_{Mi} \cdot P_{Mi} + {}^G_{Mi}T) \|^2 \quad (2)$$

通过求解 δ 的最小值,可得系统间最佳转换关系,使空间坐标分量误差最小,从而完成测量坐标系统一。

1.2 多系统协同测量场精度评价模型

基于空间联合平差模型建立多系统协同测量场的精度评价模型^[20],可验证其精度。对公式(1)线性化后其误差方程为:

$$V = A \cdot \Delta X - l \quad (3)$$

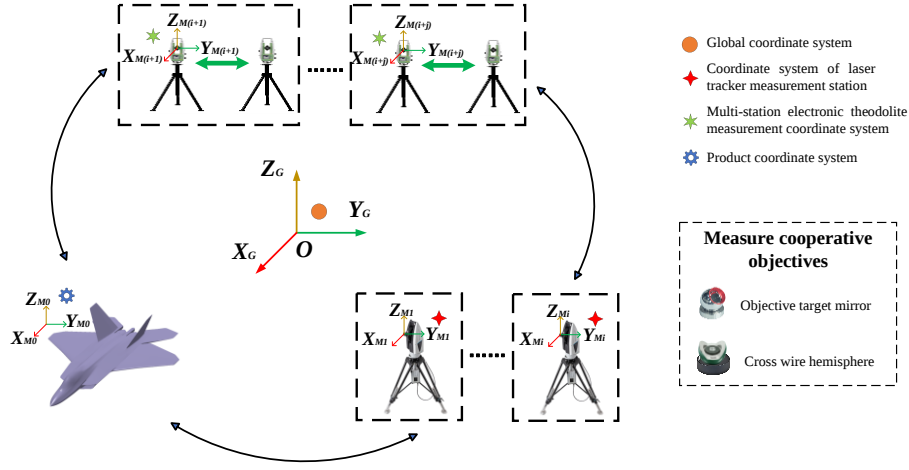


图1 多系统协同测量场

Fig.1 Multi-system collaborative measurement field

其中: V 为观测残差向量, A 为系数矩阵, 由公共转站点坐标分量对七个未知参数的一阶偏导构成, $\Delta X = [\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta Rx, \delta Ry, \delta Rz]$ 为参数改正量, l 为常数项向量。采用最小二乘法求解参数改正数:

$$\Delta X = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P l \quad (4)$$

其中, P 为观测值权阵。通过求解 ΔX 并对全局坐标系下的初值坐标进行迭代更新, 可求解出其平差坐标。本文基于全体测站的坐标点误差均方根与全体公共转站点的误差均方根误差评价测量场的精度水平。设测量场第 i 测站在全局坐标系下平差坐标为 $(\hat{X}_{G,i}, \hat{Y}_{G,i}, \hat{Z}_{G,i})$, 未平差前转换坐标为 $(\hat{X}_{M,i}, \hat{Y}_{M,i}, \hat{Z}_{M,i})$, 则第 i 个测站的坐标点误差 $E_{station_i}$ 为:

$$\begin{cases} e_{x,i} = \hat{X}_{G,i} - \hat{X}_{M,i} \\ e_{y,i} = \hat{Y}_{G,i} - \hat{Y}_{M,i} \\ e_{z,i} = \hat{Z}_{G,i} - \hat{Z}_{M,i} \\ E_{station_i} = \sqrt{e_{x,i}^2 + e_{y,i}^2 + e_{z,i}^2} \end{cases} \quad (5)$$

设测量场第 k 个公共转站点被观测 N 次, 则其在全局坐标系下平差坐标为 $(\hat{X}_{G,k}, \hat{Y}_{G,k}, \hat{Z}_{G,k})$, 观测转换坐标为 $(\hat{X}_{M,k,j}, \hat{Y}_{M,k,j}, \hat{Z}_{M,k,j})$ ($j = 1, \dots, N$), 则第 k 个公共转站点的第 j 次观测到坐标残差为:

$$\begin{cases} e_{x,k,j} = \hat{X}_{G,k} - \hat{X}_{M,k,j} \\ e_{y,k,j} = \hat{Y}_{G,k} - \hat{Y}_{M,k,j} \\ e_{z,k,j} = \hat{Z}_{G,k} - \hat{Z}_{M,k,j} \\ E_k = \sqrt{e_{x,k,j}^2 + e_{y,k,j}^2 + e_{z,k,j}^2} \end{cases} \quad (6)$$

采用坐标残差计算第 k 个公共转站点的 N 次观测值的均方根误差 $RMSE_{p,k}$:

$$RMSE_{p,k} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_k^2} \quad (7)$$

计算出测量场内所有测站的坐标点误差 $(E_{station_1}, E_{station_2}, \dots, E_{station_n})$ 和所有公共转站点的 $(RMSE_{p,1}, RMSE_{p,2}, \dots, RMSE_{p,m})$, 通过公式(8)可求得整体测站坐标点误差均方根 $RMSE_{station_overall}$ 与整体公共转站点均方根误差 $RMSE_{p_overall}$, 根据这两项参数可评价测量网的整体精度:

$$\begin{cases} RMSE_{station_overall} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{station_i}^2} \\ RMSE_{p_overall} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N RMSE_{p,k}^2} \end{cases} \quad (8)$$

2 公共转站点位布设优化

构建高精度协同测量场的关键,在于通过优选公共转站点以建立稳定的空间转站基准。然而,场内的工装遮挡与公共转站点的测量误差会直接影响坐标转换质量。多系统协同测量场涉及多测量站位的观测,任何遮挡都会削弱多站共视点的数量,测量误差则可能在坐标转换过程中被累积放大,影响整体网络解算的稳定性和可靠性。

针对上述多系统协同测量场中公共转站点布设存在的问题,本文构建了一种公共转站点布设优化方法,主要围绕三个关键环节展开:单站位可视区域判定、多站位共视区域判定以及基于不确定度分析的公共转站点优选。开展上述研究的原因如下:

首先,在实际测量环境中,工装、结构等遮挡会导致测站无法直接观测部分区域^[21]。因此,单站位可视区域判定是筛选出公共转站点布设点位的基础,确保每个测站均具备对该点位的观测条件。

其次,多站位共视区域判定旨在提取能被多个测站同时观测的区域。该环节为公共转站点提供了必要的观测冗余与几何约束,是多系统坐标统一与数据融合的关键前提。

进一步地,在满足多测站共视约束的基础上,测量误差的传播与累积仍会影响最终坐标转换精度。因此,本文引入基于不确定度分析的公共转站点优化环节:通过对各待选公共转站点进行测量不确定度评估,并依据多系统差异化精度阈值进行筛选,从而在确保空间覆盖的同时,有效抑制误差累积,提升整体转站精度与网络稳健性。

综上,优化方法通过“可视性-共视性-精度优化”的递进分析框架,系统提升公共转站点布设的可靠性与整体测量精度,从而为多系统坐标统一与数据融合提供可靠、高精度的转站基准。

2.1 单测站可视区域与多测站共视区域判定

可视区域指从某一测量站位出发,测量设备能够直接观测到的被测构件的几何表面范围。进行可视区域判定的目的是为了确保公共转站点能被多站同时观测,这是实现坐标统一的前提。针对工装遮挡问题,本文采用隐藏点移除(HPR)算法,通过几何映射与凸包分析剔除被遮挡点,提取真实可视点集。在确定各站可视区域后,进一步判定共视区域,共视区域即为从多测量站位出发,多个测量设备能够共同观测到的被测构件的几何表面范围。判定共视区域可为公共转站点选址提供几何约束。

2.1.1 判定原理

(1)单测站可视区域判定激光跟踪仪与电子经纬仪的测量都基于光线的直线传播原理,前者基于激光测距原理实现点测量^[22],后者依靠人眼的光学视线进行观测^[23]。因此,在布置公共转站点时,需要考虑不同工装及设备对多系统协同测量场可能造成的遮挡影响,并根据各测量站位的空间可视区域,确定布设公共转站点的候选区域。

针对遮挡因素下的可视性判定,本文引入隐藏点移除(Hidden Point Removal, HPR)算法,通过几何映射与凸包分析,识别被遮挡的不可见点并将其剔除。

设测量场内有 M 台测量仪器,其测量站位为 $S = \{s_i \in R^3 | i = 1, 2, \dots, M\}$,被测物几何外形由三维空间点集合 $P = \{p_j \in R^3 | j = 1, 2, \dots, N\}$ 离散化表示,HPR算法的几何映射公式可表示为:

$$\begin{cases} \hat{p}_{ij} = p_{centered} + 2 \times (R - \|p_{centered}\|) \frac{p_{centered}}{\|p_{centered}\|} \\ p_{centered} = p_j - s_i \end{cases} \quad (9)$$

式中, $p_{centered}$ 为以 S 为原点的平移空间点坐标集合, $\frac{p_{centered}}{\|p_{centered}\|}$ 为测量站位 s_i 指向点 p_j 的单位观测向量, R 为大于空间点集合 P 的外接球半径的常数。基于该式可将点集合 P 从测量站位 s_i 沿观测方向“翻转”至半径为 R

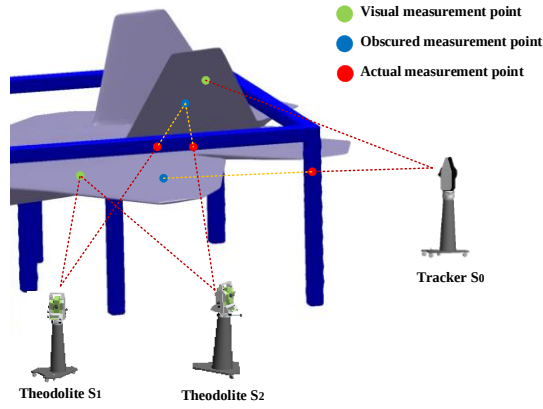


图2 协同测量的可视与遮挡
Fig.2 Visualization and occlusion in collaborative measurement

的球面外区域,映射形成点集合 $\hat{P}_i = \{\hat{p}_{ij}\}$ 。

几何映射点集 $\hat{P}_i$ 构成的三维凸包 $H(\hat{P}_i)$ 定义为:

$$H(\hat{P}_i) = \left\{ t \in R^3 \mid t = \sum_{i=1}^N \lambda_i \hat{p}_{ij}, \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \right\} \quad (10)$$

$H(\hat{P}_i)$ 由一组顶点 $V_i \subset \hat{P}_i$ 和一组三角面片 F_i 构成,其中:

$$V_i = \{v_{ri} \in \hat{P}_i \mid r = 1, 2, \dots, K\} \quad (11)$$

若原始数据点 p_j 从测量站位 s_i 可见,则映射点 $\hat{p}_{ij}$ 为凸包 $H(\hat{P}_i)$ 的一个顶点 v_{ri} 。因此,测量站位 s_i 的可视点集合 Q_i 为:

$$Q_i = \{p_j \in P \mid \hat{p}_{ij} \in V_i\} \quad (12)$$

(2)多测站共视区域判定公共转站点应满足空间几何约束,即能被多个测量站位同时观测。为此,在确定各测量站位的独立空间可视域后,要进一步解析出多站位的空间共视区域。

设所有测量站位的可视点集合为 $Q_{\text{visible}} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_M\}$,为确定任意 $k (2 \leq k \leq M)$ 个站位间的共视点集,需计算其对应可视点集合的交集。为简化计算并贴近工程实际,本文采用容差判断法:根据测量系统的误差模型设定容差阈值 ϵ ,对于给定的 k 个站位,索引集合为 $I_k \subseteq \{1, 2, \dots, M\}$,其共视点集 C_{I_k} 由这些站位可视点集的交集构成。为判定具体共视点,遍历候选点集 $Q_h (h \in I_k)$ 中的每个点 p ,并计算点 p 到其余 $k-1$ 个测量站位的可视点集合中最近点 q 的几何距离 d_j :

$$d_j = \min_{q \in Q_h} \|p - q\|, \forall h \in I_k \quad (13)$$

若点 p 到其余测量站位的点集合的最近距离满足 $d_j < \epsilon$,则将该点判定为 k 个站位的共视点:

$$C_{I_k} = \{p \in Q_h \mid \max_{h \in I_k} \left(\min_{q \in Q_h} \|p - q\| \right) < \epsilon\} \quad (14)$$

通过遍历所有可能的 k 组合,即可得到不同组合的多站位共视点集 $C = \{C_{I_2}, C_{I_3}, \dots, C_{I_n}\}$ 。

2.1.2 单测站可视区域与多测站共视区域判定效果检验与分析

验证在复杂工装遮挡条件下单测站可视区域与多测站共视区域判定的适用性与准确性,本节构建被测对象为大尺寸飞机及其工装夹具的高保真三维场景,对多系统协同测量场进行仿真分析。仿真目标:明确各测站在复杂遮挡条件下的实际可视范围,获取激光跟踪系统内部、激光跟踪系统与电子经纬仪系统之间的多系统共视区域,评估共视区域是否能为后续公共转站点优化与测量组网提供足够的候选公共转站点集合和转站连通性约束。

仿真场景为 $12 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的测量空间,多系统协同测量场包含 6 个激光跟踪仪测站和 4 个电子经纬仪测站,同时所有测站的姿态参数全部保持在整平姿态,即 $Rx = Ry = 0$,测站坐标如表 1 所示。

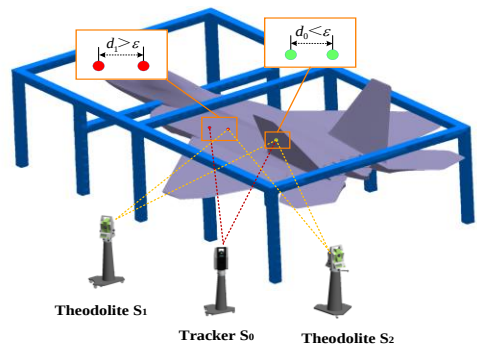


图3 协同测量的共视点判定

Fig.3 Determination of common viewpoints for collaborative measurement

表1 测量站位坐标

Table1 Measurement station coordinates

Instrument station coordinates	X/mm	Y/mm	Z/mm
Track0	500.891	2600.787	6000.953
Track1	3800.995	2600.921	500.200
Track2	4600.870	-1600.345	1600.334
Track3	-3800.267	2600.312	500.402
Track4	-4500.582	-1600.493	1600.484
Track5	-100.145	-1600.345	-6000.829
Theodolite0	5100.700	2000.314	4500.866
Theodolite1	5500.374	1900.716	-1500.213
Theodolite2	-4500.933	1800.333	-3500.885
Theodolite3	-4800.192	1900.945	2500.191

基于Python环境,采用HPR算法对各测站视线与目标点云之间的遮挡关系进行判定,获得每个测站对应的可视点云集合。在此基础上,依次计算:

1) 激光跟踪系统内部多站共视点云:设6个激光跟踪仪测站的可视区域点云集合 $(V_{Track0}, V_{Track1}, \dots, V_{Track5})$,对任意 $k(k=2, 3, \dots)$,计算至少被 k 个激光跟踪仪共同观测的点云集合,记为 C_{Track}^k 。

2) 各电子经纬仪测站组合之间的共视区域点云:设4个电子经纬仪测站的可视区域点集为 $(V_{Theo0}, \dots, V_{Theo3})$,针对布设结构与测站位置,重点计算Theodolite0/1与Theodolite2/3之间的共视点集合 C_{Theo} 。

3) 多系统共视点云:多测站激光跟踪系统与多测站电子经纬仪系统之间的共视点集合 $C_{Cross} = (\cup V_{Tracker}) \cap (\cup V_{Theo})$ 。

为验证模型在公共转站点布设与组网中的有效性,本节选取的评价指标为:激光跟踪系统多站共视冗余水平,各阶激光跟踪系统共视点数量 C_{Track}^k 及其随 k 的变化趋势,特别是高阶共视点($k \geq 4, 5$)的存在情况,用于评估是否能为高精度转站提供足够冗余点;多系统共视点数量 C_{Cross} 及其在关键结构区域的分布,用于判断是否能够为多系统协同测量场的坐标统一提供可靠的公共转站点约束。

如图4所示,利用PyVista可视化工具,将被测对象及工装几何模型离散为高密度三维点云,用以表征实际外形。6个激光跟踪仪测站和4个电子经纬仪测站分别对应的可视点云分布情况表明,受工装夹具遮挡及各测站相对于飞机空间位置的影响,各测站均存在不同程度的视觉盲区。例如,Tracker0与Tracker1位于飞机上表面区域的可视覆盖明显不足;而Tracker2与Tracker5等站位受工装结构遮挡,导致其在机舱顶部出现范围不等的不可视区域。值得注意的是,各测站之间的不可见区域分布具有明显差异性,反映出不同站位在可视区域覆盖方面具备较强的互补特性。

在单测站可视点云基础上,计算不同阶数的多站共视区域。首先计算激光跟踪系统多测站共视区域,

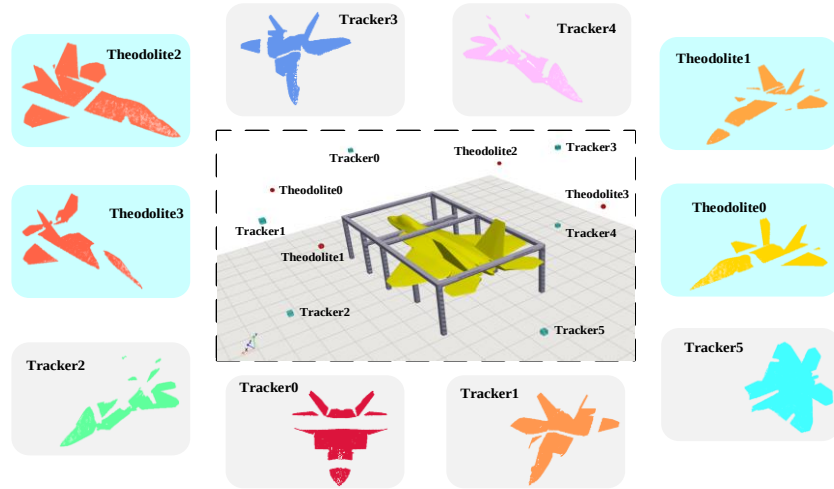


图4 被测构件、工装及单测站可视点云

Fig.4 Visible point cloud of the tested component, tooling, and single measurement station

考虑到测站组合过多,仅展示不同测站数量的共视区域点云,其分布点云如图5所示。

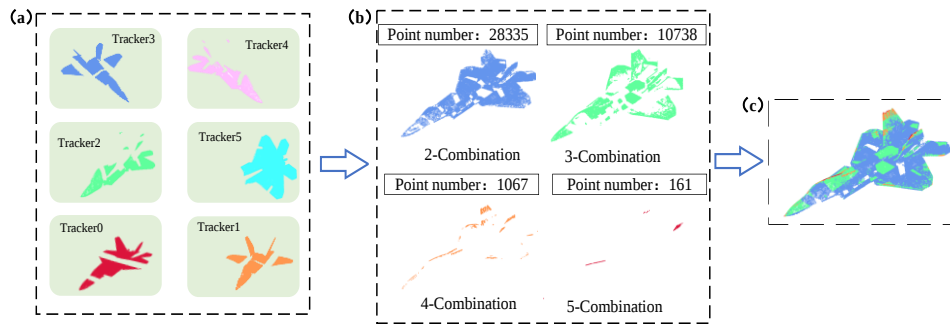


图5 激光跟踪系统共视区域点云。(a)单测站可见点云;(b)多测站共视点云;(c)整体共视点云

Fig.5 Point cloud of the common-view area of the laser tracking system. (a) Single-station visible point cloud; (b) Multi-station co-viewpoint cloud; (c) Overall co-viewpoint cloud

由图5可知多测站激光跟踪系统共视点云的测站数量包括5测站、4测站、3测站及2测站,其共视点云主要分布在机身、机翼和尾翼等关键结构部位。由图5可知 C_{Track}^2 数量级为 2×10^4 , C_{Track}^3 数量级为 1×10^4 , C_{Track}^4 数量级为 1×10^3 , C_{Track}^5 数量最少,其数量级仅有 2×10^2 。由此可见,多站共视点数量随测站参与数 k 增大而快速减小,这是多测站几何约束叠加的自然结果。

接下来确定电子经纬仪系统的多测站共视区域,电子经纬仪系统采用异面交会测量,由于四站位的电子经纬仪系统按飞机两侧分布,故仅考虑 Theodolite 0, 1 与 Theodolite 2, 3 的共视区域,其可视化结果如图6所示。

电子经纬仪系统多站共视点云数量分析结果如图6所示,其中 $C_{Theo}^{(0,1)}$ 的数量级为 10^3 , $C_{Theo}^{(2,3)}$ 的数量级为

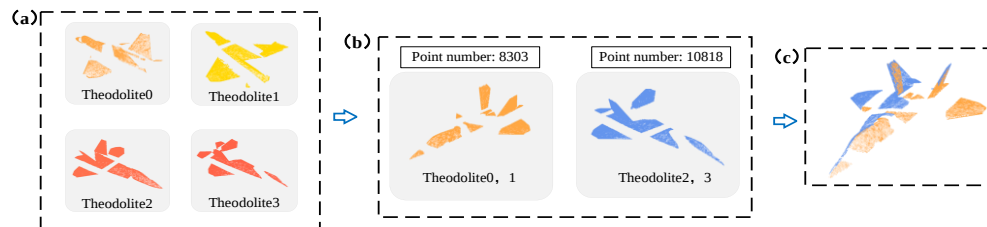


图6 电子经纬仪系统共视区域点云。(a)单测站可见点云;(b)多测站共视点云;(c)整体共视点云

Fig.6 Point cloud of the common-view area in the electronic theodolite system. (a) Single-station visible point cloud; (b) Multi-station co-viewpoint cloud; (c) Overall co-viewpoint cloud

10^4 ,由图可知共视点云主要分布在机身上表面、尾翼以及机翼的主体区域,这些区域易被构件自身和工装遮挡,而且有足够密度的点云分布,为经纬仪系统内部的空间转站和定向提供了可靠的几何约束。

在上述分析基础上,进一步计算多系统测量系统共视点云,由于电子经纬仪系统通过互瞄构建组网转站关系,故采用电子经纬仪多测站共视点云并集 $C_{Theo}^{(0,1)} \cup C_{Theo}^{(2,3)}$ 与激光跟踪系统多测站共视点云 C_{Track}^k 的交集,其可视化结果如图7所示。

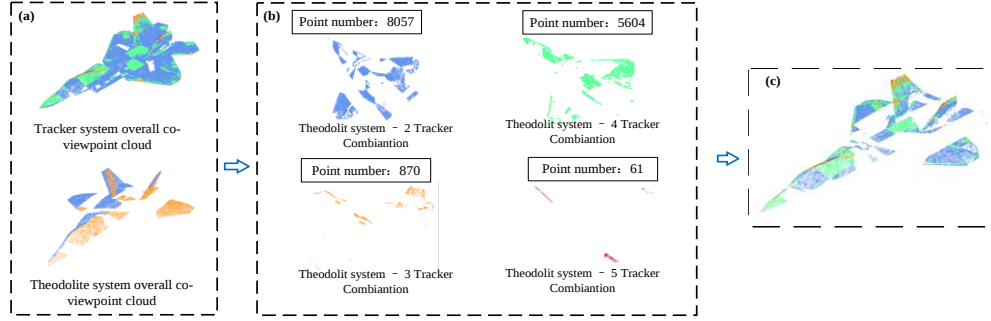


图7 多系统共视区域点云。(a)单系统多测站共视区域点云;(b)电子经纬仪系统-不同测站激光跟踪仪共视区域点云;(c)多系统整体共视区域点云

Fig.7 Multi-system co-viewing area point cloud. (a) Single system multi station common view area point cloud; (b) Electronic Theodolite-system - Different stations Tracker-system common view area point cloud; (c) Multi system overall common view area point cloud

多系统共视点云数量分析结果如图7所示, $C_{Cross}^{Track2-Theo}$ 数量级为 8×10^3 , $C_{Cross}^{Track3-Theo}$ 数量级为 5×10^3 , $C_{Cross}^{Track4-Theo}$ 的数量级皆为 8×10^2 , $C_{Cross}^{Track5-Theo}$ 的数量为 61,其相对于激光跟踪系统的多站位共视点云数量有所减少,但仍然达到数十点至千点的规模,且分布在机身、机翼和尾翼等关键结构区域。

仿真结果表明:多测站共视点数量随参与测站数增加而递减,但仍能在关键区域提供数量有限但高冗余的公共转站点;激光跟踪系统与电子经纬仪系统之间存在数量和分布均衡的多系统共视点。这些结果验证了单测站可视区域与多测站共视区域判定在点云规模、可视覆盖和转站候选点获取方面的有效性,为后续公共转站点优化和多系统协同测量组网提供了可靠的几何基础。

2.2 基于不确定度分析的公共转站点优化

在选取公共转站点时若忽略测量不确定度因素,可能会导致公共转站点在坐标转换过程中引入额外误差,从而增大整体转站误差。故在确定多系统协同测量场的空间共视区域的基础上,通过体素化处理共视区域点云得到候选公共转站点,并基于蒙特卡洛法对各候选点的测量不确定度进行预测,分析各候选点位的测量稳定性,筛选出符合精度要求的点集,为公共转站点集合提供可选择的方案。

2.2.1 优化原理

(1)基于体素化的点云模型简化原理:

为平衡计算效率,对多测站共视点云进行简化处理。本文采用点云体素化的方法,将共视点云按预设的适中体素尺寸进行划分,并以体素中心点替代体素内其他点参与后续计算。该方法在基本保持不确定度评估精度的同时,显著降低了数据规模和蒙特卡洛模拟的计算量,从而提升了整体计算效率。

设所有测站之间的共视点云的点集合为 $P_{common} = \{p_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3\}_{i=1}^N$,将点集合所在的三维空间划分为大小均匀的体素网格,体素边长为 L ,建立体素化数学模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ijk} = \left\{ p \in P_{common} \left| \left\lfloor \frac{p_x}{L} \right\rfloor = i, \left\lfloor \frac{p_y}{L} \right\rfloor = j, \left\lfloor \frac{p_z}{L} \right\rfloor = k \right. \right\} \\ p_{ijk}^{voxel} = \frac{1}{|V_{ijk}|} \sum_{p \in V_{ijk}} p \\ P_{voxel} = \{p_{ijk}^{voxel} | V_{ijk} \neq \emptyset\} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: V_{ijk} 是坐标轴索引为 (i, j, k) 的体素单元内包含的点集合 p_{ijk}^{voxel} 为体素单元的中心点, P_{voxel} 为体素化的点集合。在体素化过程中, 通过采用单点质心替代体素单元内全部点云数据的方式, 对局部点集进行代表性抽样, 使质心点能够有效表征该局部区域的整体位置精度, 有效降低数据规模, 提高计算效率。

(2) 多系统测量误差模型:

基于点云体素化的点集合, 依据多系统协同测量场的测量误差模型, 并结合蒙特卡洛方法对集合内各待选公共转站点的测量不确定度进行数值预测与评估。随后, 根据不确定度分析结果对候选点位进行筛选, 最终保留符合精度要求的点集, 作为转站点布局的优化参考。

根据激光跟踪仪的球坐标测量模型, 以及距离和角度的测量原理, 给每个传感器的不确定度特性分配合适的概率分布函数, 本文假定各传感单元之间相互独立, 且均服从均值为 0 的正态分布, 因此可以得到每个传感单元的随机测量误差的正态分布模型为:

$$\epsilon \begin{cases} \epsilon_l \sim N(0, (\sigma_l^* + \omega_l)^2) \\ \epsilon_\alpha \sim N(0, \sigma_\alpha^2) \\ \epsilon_\beta \sim N(0, \sigma_\beta^2) \end{cases} \quad (16)$$

其中, σ_l^* 为距离测量误差的标准差基准分量, ω_l 为距离测量误差的标准差的线性变化分量; σ_α 和 σ_β 分别为水平角和垂直角测量误差的标准差。综上所述, 可以得到激光跟踪仪的误差模型为:

$$\begin{pmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l^* \\ \alpha^* \\ \beta^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} N(0, (\sigma_l^* + \omega_l)^2) \\ N(0, \sigma_\alpha^2) \\ N(0, \sigma_\beta^2) \end{pmatrix} \quad (17)$$

电子经纬仪的测量误差主要包括仪器本身的测角误差、瞄准误差。仪器本身的测角误差主要分为水平和俯仰两个方向的测角误差 m_c , 两个方向的误差会影响视准轴方向, 实际测量中的视准轴线的角度误差分量为:

$$m_{c1} = \sqrt{2} m_c \quad (18)$$

经纬仪的操作误差主要为人眼的瞄准误差, 通常情况下人眼的极限分辨率为 $60''$, 经纬仪距离目标的距离不同时, 经纬仪的视觉放大倍率会随之变化。设经纬仪系统的视觉放大倍率为 A , 为物体经过经纬仪视觉放大系统所成的像对人眼张角的正切 $\tan \omega'$, 与人眼直接观察物体时物体对人眼张角的正切 $\tan \omega$ 之比, 计算公式为:

$$A = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{\tan \omega'}{d/L} \quad (19)$$

式中 ω' 为人眼的极限分辨率为 $60''$, d 为目标物体的最小分辨率, L 为经纬仪到目标的距离。故实际测量中视准轴线的瞄准误差为:

$$m_{c2} = \frac{60''}{A} = \frac{60'' \cdot d}{\tan \omega' \cdot L} \quad (20)$$

综上所述, 可获得电子经纬仪系统的误差模型:

$$\begin{cases} m_{c1} = \sqrt{2} m_c \\ m_{c2} = \frac{60'' \cdot d}{\tan \omega' \cdot L} \end{cases} \quad (21)$$

(3) 基于蒙特卡洛的不确定度分析模型:

蒙特卡洛法基于随机抽样的统计, 基于上述的误差分析结果, 通过大量重复仿真测量系统对目标点的测量过程评估其测量不确定度, 最终根据不确定度结果对待选点集合 P_{voxel} 进行筛选。设重复测量次数为 N , 测站对空间单点的测量结果为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, \dots, N$, 测量均值可表示为:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \end{cases} \quad (22)$$

基于均值与各次测量值的残差,测量不确定度可通过总体标准差进行计算:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N} \\ \sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{N} \\ \sigma_z^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{N} \\ \sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 为单点的三维测量不确定度, σ 为单点的总不确定度。

在多系统协同测量场中,任一转站点会被多个测站同时观测,为综合评价待测点 p 的测量稳定性,取其中的最大测量不确定度进行评估:

$$\begin{cases} P_{track} = \left\{ p \in P_{voxel} \mid \sigma_{(p,k,p)}^{track}(p) \leq \sigma_1 \right\} \\ P_{theodolite} = \left\{ p \in P_{voxel} \mid \sigma_{(p,k,p)}^{theodolite}(p) \leq \sigma_2 \right\} \end{cases} \quad (24)$$

σ_1 与 σ_2 分别为两系统的点位不确定度阈值。 P_{track} 为符合测量不确定度要求的激光跟踪系统可测待选公共转站点集合, $P_{theodolite}$ 为符合测量不确定度要求的电子经纬仪系统可测待选公共转站点集合。最终保留的点集构成符合多系统精度要求的公共转站点候选集合。

2.2.2 基于不确定分析的公共转站点优化效果检验与分析

为验证基于不确定度分析的公共转站点优化的有效性,本节以多测站激光跟踪系统共视区域点云和多系统共视区域点云为基础,首先对空间共视点云进行体素化简化处理,再结合测量误差模型和蒙特卡洛方法,对体素中心点的不确定度进行评估和筛选,以获得满足转站精度需求的公共转站点集合。

设体素尺寸为 $1000m^3$,将激光跟踪系统共视点云与多系统共视点云按照体素尺寸进行空间划分,每个体素内仅保留一个代表点作为该区域的候选公共转站点。一方面,体素化大幅压缩了待分析点数,提高了后续不确定度计算效率;另一方面,体素中心点仍能较好代表局部区域的测量特性,有利于在保证空间覆盖的前提下进行点位优化。最终结果展示于图8。

激光跟踪仪误差模型中,斜距误差的标准差取 $\sigma_l^* = 15\mu m$, $\omega_l = 6\mu m/m$,水平角和垂直角测量误差标准差根据仪器测角精度设定,取 $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 1''$ 。电子经纬仪误差模型中,仪器系统误差的标准差根据测角精度

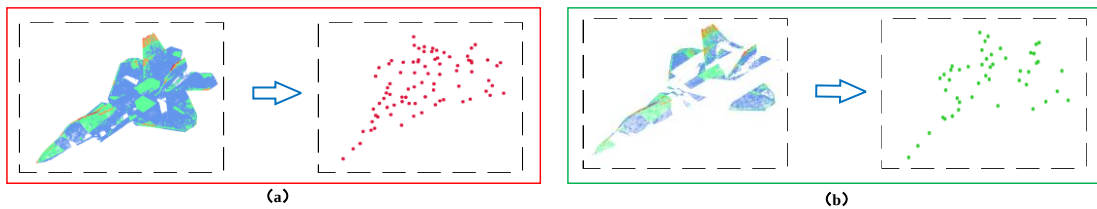


图8 体素化离散点集合分布。(a)激光跟踪系统体素化点集;(b)多系统体素化点集

Fig.8 Voxelized discrete point set distribution. (a) Voxelized point set of laser tracking system; (b) Voxelized point set of Multi-sensor system

设定,取 $m_c = 0.5''$,即 $m_{c1} = 0.7''$;瞄准误差 m_{c2} 中,人眼的极限分辨率 $\omega' = 60''$,目标物体的最小分辨率 $d = 1\text{mm}$, L 为经纬仪到目标点的距离。

针对体素化处理后的各候选点,采用蒙特卡洛方法进行 $N=1000$ 次重复仿真测量,得到该点的1000组坐标样本,计算其总体标准差作为该点在三维方向上的测量不确定度。对体素化离散点云进行筛选时,候选点必须能被至少两个测量站位同时观测,并确保激光跟踪仪对单点测量的不确定度优于 0.05mm 的阈值,电子经纬仪系统对单点测量的不确定度优于 0.1mm 的阈值。图12展示了经此联合条件筛选前后,离散点集不确定度分布的对比情况。

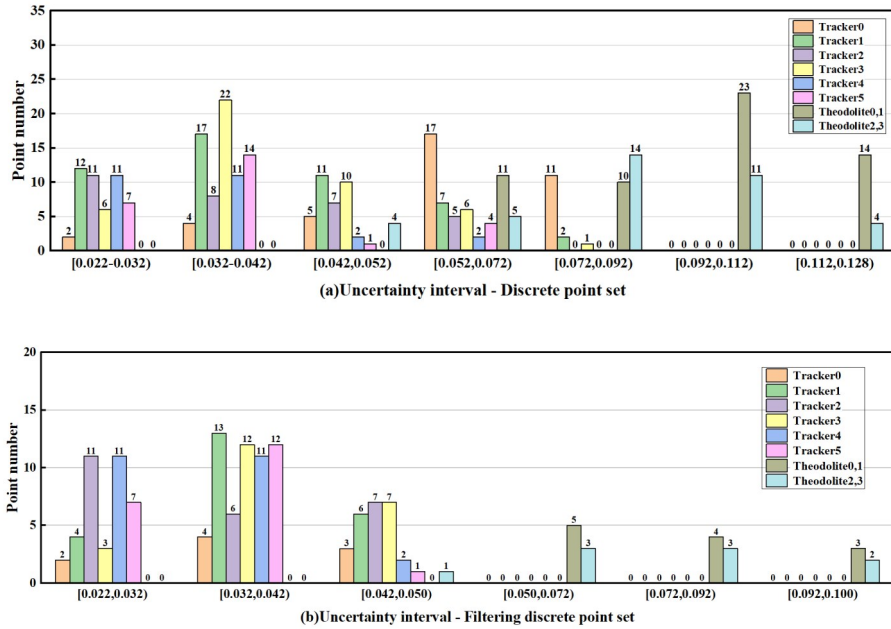


图9 离散点集不确定度分析。(a)离散点集不确定度区间;(b)筛选后的离散点集不确定度区间
Fig.9 Uncertainty analysis of discrete point set. (a) Uncertainty interval -Discrete point set; (b) Uncertainty interval -Filtering discrete point set

由图10可知,筛选前激光跟踪系统离散点集的不确定度区间处于 $[0.021, 0.092)$ 的范围内,电子经纬仪系统离散点集的不确定度区间处于 $[0.042, 0.128)$ 的范围内。若直接在上述点集中选取公共转站点,可能会在转站环节引入较大的坐标转换误差。应用不确定度阈值进行筛选后,激光跟踪系统离散点集的不确定度区间收紧至 $[0.022, 0.050)$,电子经纬仪系统离散点集的不确定度区间收紧至 $[0.042, 0.100)$ 。

基于测量不确定度分析的公共转站点位优化结果如图11。从空间分布来看,保留点仍覆盖机身、机翼和尾翼等关键结构部位,未形成大面积测量“空白区”。这表明,通过体素化与不确定度分析相结合的优化策略,在显著提升点位测量可靠性的同时,保持了对关键区域的充分覆盖。

仿真结果验证了基于不确定度分析的公共转站点位优化的有效性。通过对多站共视点云进行基于体素化的点云简化,并结合激光跟踪仪与电子经纬仪的误差模型预测单点三维不确定度,该方法能够从大量候选点中筛选出满足精度要求、分布合理的公共转站点集合。与仅考虑可视性相比,优化后的点集显著降低了整体测量不确定度,为构建高精度协同测量场提供了可靠的点位基础。

3 实验分析与验证

3.1 仿真分析

为验证本文所提出的多系统协同测量场的公共转站点位优化布设方法在可视性与精度方面的优势,本节设计了仿真对比实验,对公共转站点布设优化方法、传统方法以及兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法筛选得到的公共转站点集合进行性能评估。

以某飞行器的多系统协同测量场的公共转站点布设优化为例,飞行器大小为 $10\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$ 。仿真空

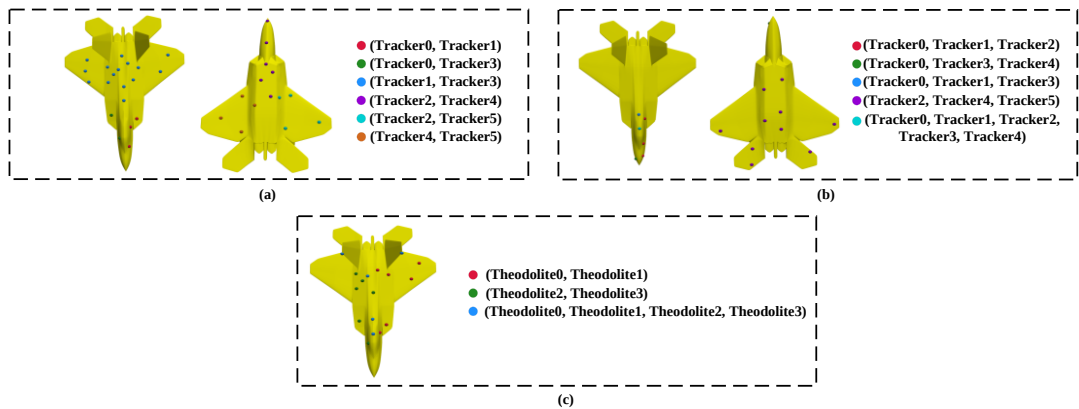


图 10 公共转站点优化空间分布。(a)2站激光跟踪仪公共转站点;(b)3站,5站激光跟踪仪公共转站点;(c)激光跟踪仪-电子经纬仪公共转站点

Fig.10 Optimize the spatial distribution of public transfer stations. (a)2-station Tracker common point; (b)3, 5-station Tracker common point; (c) Tracker-Theodolite common point

间中协同测量系统采用4台 TM6100A 电子经纬仪(测角精度为 0.5")与6台 ATS600 激光跟踪仪(测距精度为 $15\text{ }\mu\text{m} + 6\text{ }\mu\text{m} / \text{m}$,测角精度为 1"),共组成 10 个测量站位。仿真实验基于已知测站站位进行公共转站点布设,激光跟踪仪与电子经纬仪站位与 2.1.2 节相同。

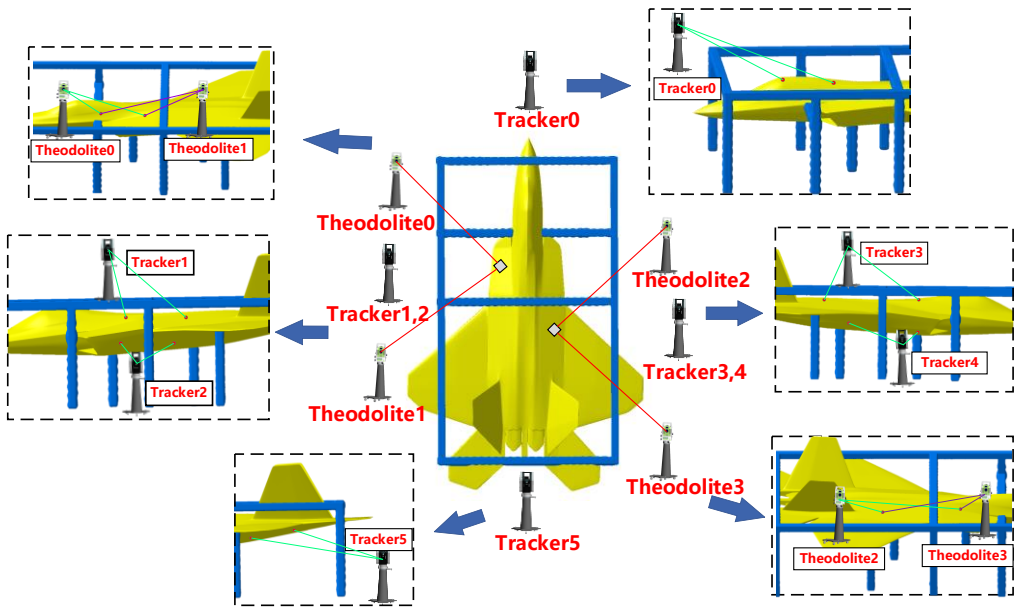


图 11 多系统协同测量示意图
Fig.11 Schematic diagram of multi-system collaborative measurement

3.1.1 空间可视对首次组网成功率的影响

为验证本文所提的公共转站点优化布设方法在复杂遮挡环境下首次组网成功率的优势,分别与传统人工经验布设方法以及行业内最新提出的兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法进行对比。仿真共涉及 10 个测量站位,为保证转站关系的稳定与冗余,任意两个相邻测站之间至少需要 3 个不共线的公共转站点,实际工程中每对测站间布置 4~5 个公共点可进一步提升解算稳健性。综合考虑被测构件表面候选点集的分布情况、实验效率以及对比公平性,最终选取 20 个点位作为优化布设方法的布设样本,传统布设方法亦采用相同点位数量。为便于后续对比评估与复现实验,对上述 20 个点位统一编号,其坐标如下所示。

基于公共转站点布设优化方法的公共转站点分布如图 12 所示。
为满足转站组网要求,任意两个相邻测站之间至少应有 3 个公共观测点,以确保位姿转换计算的稳定性

表2 基于布设优化方法的公共转站点坐标与对应的测站代号

Table2 Coordinates of public transfer stations and corresponding station codes based on deployment optimization method

Point	(X,Y,Z)/mm	Stations	Point	(X,Y,Z)/mm	Stations
A0	(-14.449, 499.432, 2417.128)	Tracker 0, 1, 2, 3, 4	A10	(667.454, -59.840, 1722.959)	Tracker 0, 1
A1	(152.140, -172.207, 4366.682)	Tracker 0, 1, 2	A11	(-229.253, -268.086, 4586.361)	Tracker 0, 3, 4
A2	(192.527, 47.673, 3493.435)	Tracker 0, 1, 2	A12	(-273.522, 219.969, 2962.801)	Tracker 0, 3
A3	(315.719, 183.123, 1738.658)	Tracker 0, 1, 2	A13	(-739.679, -59.732, 1436.373)	Tracker 0, 3
A4	(428.713, -568.542, 680.516)	Tracker 2, 4, 5	A14	(2117.609, 92.918, -1340.213)	Tracker 1; Theodolite 0, 1
A5	(-526.932, -520.559, 19.857)	Tracker 2, 4, 5	A15	(2614.255, 114.189, -2455.823)	Tracker 1; Theodolite 0, 1
A6	(3251.856, 17.790, -2244.601)	Tracker 2, 4, 5	A16	(312.770, 395.673, -1907.029)	Tracker 1; Theodolite 0, 1
A7	(-2849.393, -52.512, -2692.313)	Tracker 2, 4, 5	A17	(-863.512, 163.269, -1754.664)	Tracker 1; Theodolite 2, 3
A8	(382.562, -237.683, -2577.567)	Tracker 2, 4, 5	A18	(-873.956, 112.451, -746.832)	Tracker 1; Theodolite 2, 3
A9	(262.205, 214.063, 2506.915)	Tracker 0, 1	A19	(50.335, 351.984, -359.726)	Tracker 1; Theodolite 2, 3

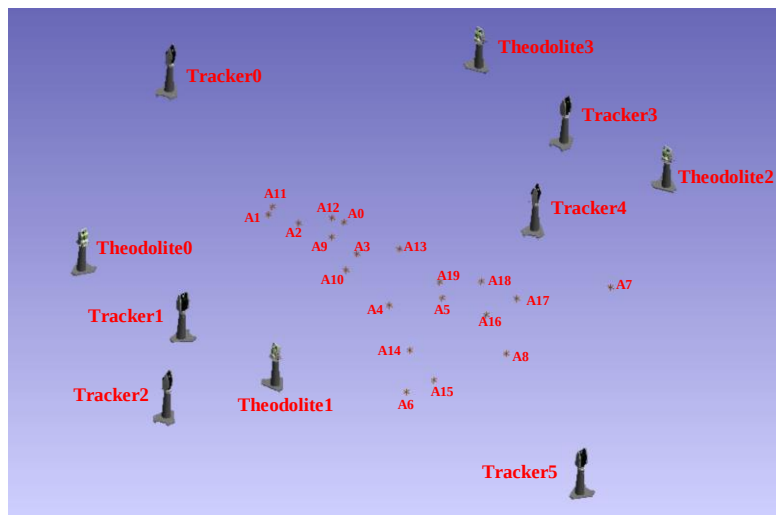


图12 基于布设优化方法的公共转站点分布

Fig.12 Distribution of common points based on optimization model

和精度。在此条件下,可明确各测站之间的位姿转换关系,从而形成满足观测冗余和几何稳健性要求的转站组网结构。基于该原则,确定的转站测站组合及其对应的转站间公共转站点如下:

根据表3所示,基于公共转站点优化布设方法的公共转站点布设方案,在首次组网中即完成了全部测站的组网连接,实现了100%的首次组网成功率。

然后,基于传统方法展开公共转站点布局设计:在仅考虑被测构件几何外形与测量场内均匀分布的原则下,于构件表面及周边可布设区域均匀选取靶标点共20个,随后依据既定测站布置与工装遮挡模型,对靶标点与各测站之间进行线视通性判定,判定结果如下:

由表可知,被测点中B5、B6、B9仅能被单测站观测到,并且Tacker 0, 1, 3测站与Tacker 2, 4, 5测站之

表 3 转站关系与公共转站点对应
Table3 Transfer station relationship and public point correspondence

Stations	Points
Tracker 0, 1	(A0,A1,A2,A3,A9,A10)
Tracker 0, 2	(A0,A1,A2,A3)
Tracker 0, 3	(A0,A11,A12,A13)
Tracker 2, 4	(A4,A5,A6,A7,A8)
Tracker 2, 5	(A4,A5,A6,A7,A8)
Tracker 1; Theodolite 0,1,2,3	(A14,A15,A16,A17,A18,A19)

表 4 基于传统方法的公共转站点坐标与可被测量的测站代号
Table4 Public points based on traditional methods and measurable station codes

Point	(X,Y,Z)/mm	Stations	Point	(X,Y,Z)/mm	Stations
B0	(1573.664, 1664.933, -2581.941)	Tracker 0, 1, 2	B10	(1724.744, 249.330, -5044.699)	Tracker 2, 5
B1	(364.250, -591.137, 1021.492)	Tracker 2, 4, 5	B11	(-11.912, -621.146, 1548.641)	Tracker 2, 4
B2	(-51.742, -457.908, 4780.036)	Tracker 2, 4	B12	(-1490.812,1616.829, -2635.441)	Tracker 0, 3, 4
B3	(783.761, -389.435, 964.200)	Tracker 2, 5	B13	(159.189, -393.682, -1685.123)	Tracker 2, 4, 5
B4	(-810.293, -398.572, 1381.696)	Tracker 4, 5	B14	(-1661.629,209.898, -4928.503)	Tracker 0, 3; Theodolite 2, 3
B5	(202.588, -443.914, 3642.928)	Tracker 2	B15	(-320.275, -123.019, 3811.953)	Tracker 0, 1, 3; Theodolite 2, 3
B6	(-384.015, 349.633, 2016.729)	Tracker 4	B16	(1842.580, 73.403, -915.609)	Tracker 0, 3; Theodolite 2, 3
B7	(-240.813, -567.812, 461.753)	Tracker 4, 5	B17	(-1874.472, 48.679, -1756.814)	Tracker 0, 1; Theodolite 0, 1
B8	(302.032, -488.453, -587.647)	Tracker 2, 4	B18	(-3251.856, 17.794, -2244.606)	Tracker 0, 1, 3; Theodolite 0, 1
B9	(-22.760, 334.456, -2443.372)	Tracker 0	B19	(2485.863, 97.144, -1808.962)	Tracker 0, 1, 3; Theodolite 0, 1

间公共转站点少于 3 个,导致无法完成整体组网,故进行公共转站点补充:

表 5 公共转站点补充
Table5 Supplement to public transfer stations

Point	Stations	Point coordinates		
		X/mm	Y/mm	Z/mm
B20	Tracker 0, 1, 2	1481.341	-12.357	-72.866
B21	Tracker 1, 2	2472.631	19.468	-944.147
B22	Tracker 0, 1, 2	328.255	-74.511	3196.213

基于传统方法的公共转站点分布如图 13 所示。

分析基于传统公共转站点布设方法的测站间位姿转换关系,采用传统方法进行公共转站点布设时,首次布设最多建立 7 个测站的转站关系,组网成功率为 70%,Tracker0 与 Tracker2 未能接入核心测量网,经补充了(B20,B21,B22)完成了全部测站的组网,转站的测站组与对应的转站间公共转站点如下:

然后,基于兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法^[18]布设公共转站点,该方法为近年

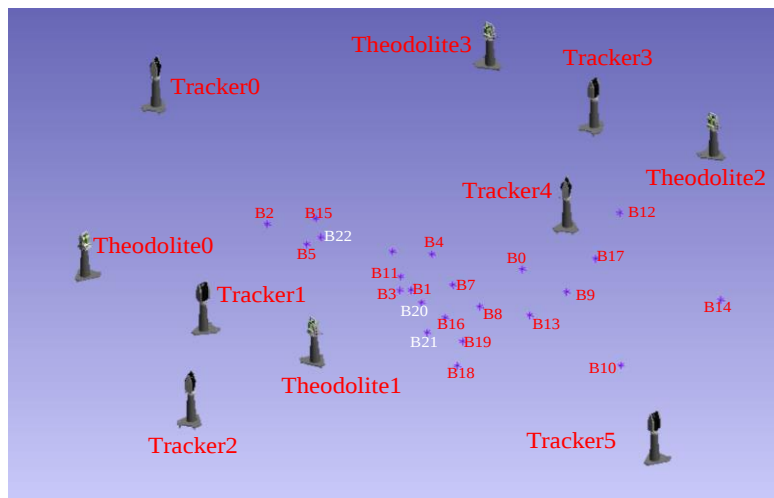


图13 基于传统方法的公共转站点分布

Fig.13 Distribution of common points based on traditional methodological approaches

表6 转站关系与公共转站点对应

Table6 Transit relationship and common point correspondence

Stations	Points
Tracker 0, 1	(B0, B15, B17, B18, B19)
Tracker 0, 3	(B0, B12, B14, B15, B16)
Tracker 1, 2	(B0, B20, B21, B22)
Tracker 2, 4	(B1, B2, B8, B11, B13)
Tracker 4, 5	(B1, B4, B7, B13)
Tracker 0; Theodolite 0, 1, 2, 3	(B14, B15, B17, B18)

来提出的一种新型的公共转站点布设方法:首先对飞机外形点云进行体素化获得待选点集,随后通过重心化、象限分组、投影长度筛选及组合优选等步骤,选取条件数较小且内符合精度最高的20个点作为公共转站点,并对其进行可视性判定,布设方案的点坐标及对应测站代号如表7所示。

在基于兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法的首次布点中:C8,C9,C15仅能被单测站观测,不满足多站共视要求,故予以舍弃;其余17个点均可被多站观测。综上,首次组网共完成7个测站与Tracker0的标定,即建立了8个测站的转站关系,首次组网成功率为80%。由于Tracker2—Tracker4转站关系缺失,仍有2个测站(Tracker4,5)未接入核心测量网,且为了保证点位数量不会影响对比的公平性,从对应象限中分别递补投影长度次大且验证可测的点,直至满足所有测站对的转站要求:

基于兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法的公共转站点分布如图14所示,转站的测站组与对应的转站间公共转站点如表9所示。

综上,在复杂遮挡环境下,本文提出的优化布设方法首次组网成功率达100%,显著优于传统人工经验布设方法(70%)及兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法(80%),验证了公共转站点布设优化方法在首次公共转站点布设中实现100%组网的有效性。

3.1.2 组网精度对比与分析

为系统分析三类公共转站点布设方案对组网精度的影响,对基于三种公共转站点布局方案进行了坐标解算,并利用多系统协同测量场精度评价模型分别评估了公共转站点坐标与测站坐标的精度。两种方案下解算得到的测量站坐标如表10所示。

通过表10与公式(8)计算可得,基于公共转站点布设优化方法的 $RMSE_{station_overall}$ 为0.055 mm,基于传统方法的 $RMSE_{station_overall}$ 为0.084 mm,基于“兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法”的 $RMSE_{station_overall}$ 为0.065 mm,本文方法相对于两种对照方法的精度分别提升34%和15%。结合3.1.1节组网过程分析可知,本文方法构建的转站网络仅包含两层转站层级,有效抑制了误差累积效应;而两种对照方法

表 7 基于“兼顾位置分布与测量精度的坐标转换公共点优选方法”的公共转站点坐标与对应的测站代号
Table7 Coordinates of common transfer stations and corresponding station codes based on the "method for optimizing common points in coordinate transformation considering both location distribution and measurement accuracy"

Point	(X,Y,Z)/mm	Stations	Point	(X,Y,Z)/mm	Stations
C0	(166.261, 301.208, 3041.774)	Tracker 0, 1	C10	(1633.071, 276.349, -5109.840)	Tracker 2, 4
C1	(251.259, -97.093, 3740.309)	Tracker 0, 1, 2	C11	(-1502.665, 1660.177, -3004.364)	Tracker 2, 4
C2	(311.642, 178.679, 1834.394)	Tracker 0, 1, 2	C12	(1569.358, 1714.410, -2948.772)	Tracker 1, 2
C3	(-227.573, 39.763, 3614.368)	Tracker 1, 3	C13	(-151.780, -502.665, 4149.868)	Tracker 4, 5
C4	(-308.498, 189.626, 2544.343)	Tracker 1, 3	C14	(-254.938, -462.712, 2990.352)	Tracker 4, 5
C5	(-3271.918, -66.065, -2097.511)	Tracker 1, 3	C15	(618.034, -32.054, 2354.396)	Tracker 5
C6	(-3049.891, -23.992, -2583.997)	Tracker 4, 5	C16	(-3135.681, -93.127, -2360.985)	Tracker 0, 1
C7	(3335.491, 36.943, -1760.785)	Tracker 4, 5	C17	(1283.490, 166.106, -4166.688)	Tracker 1; Theodolite 0, 1, 2, 3
C8	(3175.898, 83.192, -2497.382)	Tracker 3	C18	(-1359.336, 135.084, -4339.409)	Tracker 1; Theodolite 0, 1, 2, 3
C9	(-1328.598, 226.004, -5129.950)	Tracker 1	C19	(-55.489, -377.058, 5077.057)	Tracker 1; Theodolite 0, 1, 2, 3

表 8 公共转站点补充
Table8 Supplement to public transfer stations

Point	Stations	Point coordinates		
		X/mm	Y/mm	Z/mm
C20	Tracker 2, 4	444.010	-505.157	1653.358
C21	Tracker 2, 4	-772.028	-187.272	1958.484
C22	Tracker 0; Theodolite 0,1,2,3	-1149.560	674.270	295.042

中测量站位的坐标解算精度均呈现较明显的误差累积现象,主要与其转站层级较多有关。通过对测站坐标精度与公共转站点坐标精度的综合对比,系统揭示了不同布设方案在最终组网精度上的差异,单测站坐标 RMSE 及测站整体 RMSE 对比如图所示。

为定量评估三种公共转站点布设方案在坐标转换中的精度差异,对比分析了基于公共转站点布设优化方法、传统方法以及兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法所得到的公共转站点布设方案在公共转站点坐标精度及整体测量场 RMSE 指标上的表现,评估其组网精度差异。三种布局方案的平差解算及误差均方根值如表 11 所示。

表 11 三种布局方式的公共转站点平差坐标及精度评价指标
Table11 Adjusted coordinates and accuracy evaluation indicators for public transfer stations with three layout modes

Opitimize method			Traditional method		Distribution—Precision method			
Point	(X,Y,Z)/mm	RMSE / mm	Point	(X,Y,Z)/mm	RMSE / mm	Point	(X,Y,Z)/mm	RMSE / mm
	(−515.339,			(1072.767,			(1711.50,	
A0	3583.839,	0.041	B0	8582.895,	0.085	C0	−2099.23,	0.060
	−2101.367)			−935.859)			−2538.31)	

续表								
Optimize method			Traditional method			Distribution—Precision method		
A1	(−348.756, 1634.260, −2553.127)	0.046	B1	(−136.637, 4979.454, −3191.923)	0.067	C1	(1364.42, −2497.55, −1926.20)	0.058
A2	(−308.376, 2507.520, −2772.995)	0.054	B2	(−552.627, 1220.922, −3058.695)	0.075	C2	(2546.64, −2221.72, −3422.46)	0.064
A3	(315.716, 183.111, 1738.653)	0.037	B3	(282.874, 5036.756, −2990.213)	0.088	C3	(1054.41, −2360.60, −2312.28)	0.071
A4	(−72.189, 5320.445, −3169.321)	0.052	B4	(−1311.184, 4619.261, −2999.363)	0.087	C4	(1625.84, −2210.85, −3220.52)	0.072
A5	(−1027.818, 5981.107, −3121.343)	0.039	B7	(−741.702, 5539.209, −3168.599)	0.073	C5	(2004.74, −2466.57, −8714.65)	0.063
A6	(2750.959, 8245.551, −2583.001)	0.043	B8	(−198.857, 6588.596, −3089.239)	0.056	C6	(2472.51, −2424.44, −8973.63)	0.049
A7	(−3350.289, 8693.261, −2653.298)	0.031	B10	(1223.841, 11045.652, −2351.458)	0.067	C7	(7115.80, −2363.51, −4513.75)	0.058
A8	(−118.330, 8578.514, −2838.468)	0.042	B11	(−512.796, 4452.308, −3221.927)	0.046	C10	(7425.75, −2317.29, −5200.81)	0.048
A9	(−238.692, 3494.040, −2386.728)	0.037	B12	(−1991.697, 8636.391, −983.964)	0.084	C11	(5370.65, −2174.47, −9996.35)	0.070
A10	(166.559, 4278.001, −2660.624)	0.049	B13	(−341.710, 7686.072, −2994.472)	0.048	C12	(7739.42, −2124.12, −8218.51)	0.068
A11	(−730.141, 1414.595, −2868.870)	0.033	B14	(−2162.510, 10929.450, −2390.895)	0.068	C13	(796.81, −2903.17, −1836.71)	0.059
A12	(−774.416, 3038.151, −2380.822)	0.038	B15	(−821.160, 2189.001, −2723.797)	0.078	C14	(1403.53, −2863.14, −2830.17)	0.068
A13	(−1240.560, 4564.587, −2660.515)	0.029	B16	(1341.685, 6916.555, −2527.386)	0.055	C16	(2483.61, −2432.52, 2822.16)	0.048
A14	(1616.710, 7341.160, −2507.879)	0.064	B17	(−2375.360, 7757.767, −2552.113)	0.083	C17	(2270.96, −2493.59, −8845.47)	0.050
A15	(2113.357, 8456.772, −2486.608)	0.043	B18	(2750.955, 8245.556, −2583.101)	0.053	C18	(6897.41, −2234.35, −7668.30)	0.046

续表								
Optimize method			Traditional method			Distribution— Precision method		
A16	(−188.126,	0.061	B19	(1984.966,	0.058	C19	(322.68,	0.045
	7907.970,			7809.914,			−2777.50,	
A17	−2205.120)			−2503.646)			−1034.18)	
	(−1364.400,	0.062	B20	(980.449,	0.077	C20	(2760.72,	0.067
	7755.612,			6073.811,			−2905.59,	
A18	−2437.523)			−2613.133)			−3489.18)	
	(−1374.841,	0.056	B21	(1971.742,	0.043	C21	(1601.65,	0.037
	6747.782,			6945.095,			−2587.74,	
A19	−2488.334)			−2581.323)			−3967.27)	
	(−450.559,	0.058	B22	(−172.643,	0.045	C22	(2287.67,	0.039
	6360.673,			2804.745,			−1726.11,	
	−2248.803)			−2675.295)			−5528.98)	

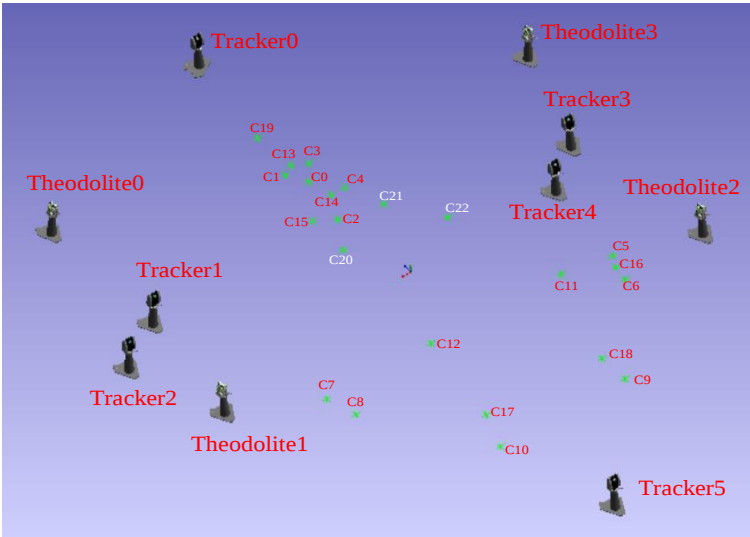


图 14 基于“兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法”的公共转站点分布
Fig.14 Distribution of public transfer stations based on the "optimization method for selecting common points for coordinate transfer stations, considering both location distribution and measurement accuracy"

表 9 转站关系与公共转站点对应

Table9 Transit relationship and common point correspondence	
Stations	Points
Tracker 0, 1	(C0, C1, C2, C16)
Tracker 1, 2	(C1, C2, C12)
Tracker 1, 3	(C3, C4, C5)
Tracker 2, 4	(C10, C11, C20, C21)
Tracker 4, 5	(C6, C7, C13, C14)
Tracker 0; Theodolite 0, 1, 2, 3	(C17, C18, C19, C22)

通过表 11 与公式(8)可求,基于公共转站点优化布设方法的 $RMSE_{p_overall}$ 为 0.46 mm,基于传统方法的 $RMSE_{p_overall}$ 为 0.68 mm,基于兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法的 $RMSE_{p_overall}$ 为 0.059 mm,本文方法相对于两种对照方法的精度分别提升 32% 和 22%。分析三种公共转站点布局的精度差异,统计了公共转站点在不同不确定度区间的数量分布,结果如图 16 所示。

在测量空间范围内,采用公共转站点优化布设方法的公共转站点不确定度区间分布处于

表 10 三种布局方式的测站平差坐标及精度评价指标

Table 10 Adjusted coordinates and accuracy evaluation indicators for survey stations with three layout methods

Instrument station coordinates	Optimize method		Traditional method		Distribution—Precision method	
	(X,Y,Z)/mm	Err _{station} /mm	(X,Y,Z)/mm	Err _{station} /mm	(X,Y,Z)/mm	Err _{station} /mm
Tracker1	(3300.179, 5500.792, 0.118)	0.047	(3300.114, 5500.720, 0.229)	0.057	(3300.187, 5500.722, 0.173)	0.054
Tracker2	(4099.930, 4400.647, -4201.152)	0.052	(4099.923, 4400.606, -4201.121)	0.063	(4099.902, 4400.693, -4201.109)	0.063
Tracker3	(-4301.747, 5500.603, -0.485)	0.048	(-4301.732, 5500.629, -0.493)	0.078	(-4301.791, 5500.609, -0.444)	0.066
Tracker4	(-5001.739, 4400.653, -4201.168)	0.064	(-5001.729, 4400.602, -4201.093)	0.097	(-5001.791, 4400.618, -4201.155)	0.072
Tracker5	(-500.843, 12001.262, -4201.156)	0.063	(-500.859, 12001.248, -4201.173)	0.112	(-500.839, 12001.274, -4201.196)	0.081
Theodolite0	(4599.122, 1500.949, -600.717)	0.057	(4599.115, 1500.979, -600.703)	0.089	(4599.109, 1500.971, -600.722)	0.063
Theodolite1	(4999.516, 7501.190, -700.131)	0.058	(4999.390, 7501.143, -700.079)	0.082	(4999.414, 7501.119, -700.086)	0.061
Theodolite2	(-5000.823, 9501.002, -800.763)	0.054	(-5000.852, 9500.939, -801.874)	0.087	(-5000.801, 9501.016, -800.814)	0.064
Theodolite3	(-5300.852, 3500.973, -700.727)	0.053	(-5300.876, 3500.921, -700.712)	0.084	(-5300.875, 3500.955, -700.765)	0.060

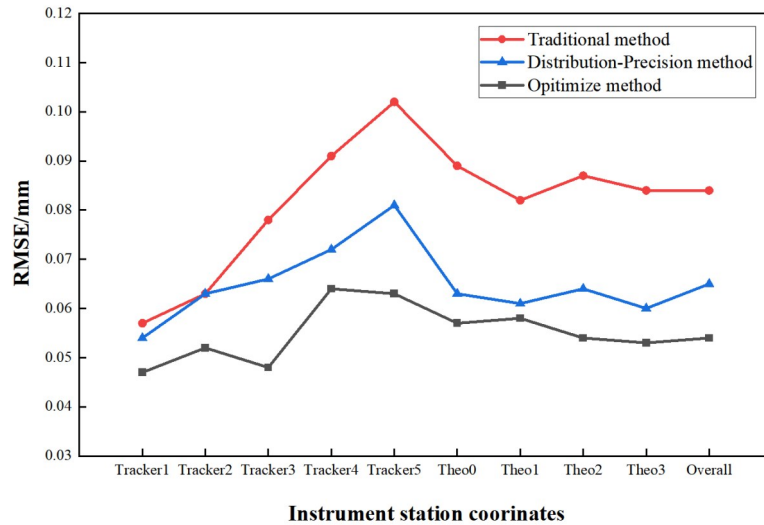


图 15 测站坐标 RMSE 对比

Fig.15 Comparison of station coordinates RMSE

[0.025, 0.065), 而采用传统方法的公共转站点不确定度区间分布处于[0.035, 0.095), 采用兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法的不确定度区间分布处于[0.035, 0.075)。实验结果充分验证了公共转站点优化布设方法抑制误差累积的技术路径的正确性与有效性。

3.2 实例验证

为验证本文方法的工程适用性,以尺寸约 10m×5m×3m 的某飞机实际装配现场为例,基于已知测站布局布设公共转站点,验证本文方法在真实工况下的适用性。多系统协同测量场采用 4 台 TM6100A 电子经纬仪与 1 台 ATS600 激光跟踪仪(布设 6 个站位),共组成 10 个测量站位,其测量仪器站位坐标如表 12 所示。

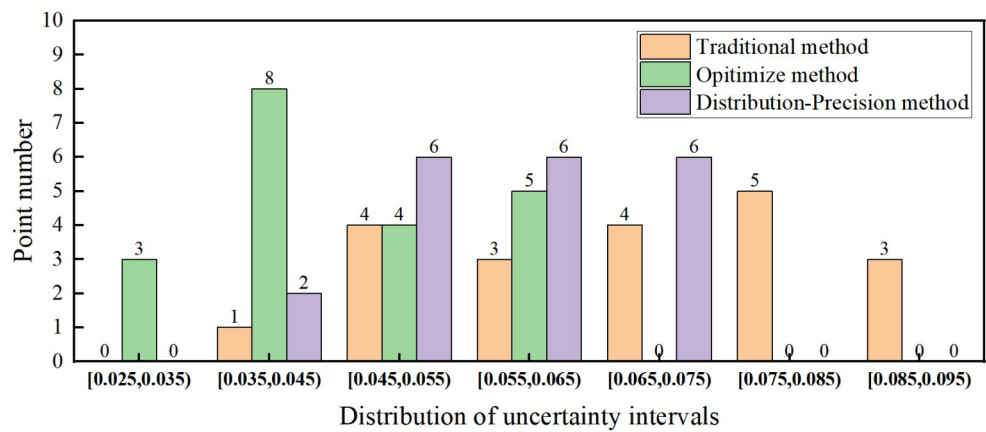


图 16 公共转站点坐标 RMSE 对比

Fig.16 Comparison of RMSE of public transfer station coordinates

按第 2 章流程选取 20 个公共转站点,其坐标如表 13 所示。

表 12 测量站位坐标

Table12 Measurement station coordinates

Instrument station coordinates	X/mm	Y/mm	Z/mm
Track0	300.247	2400.452	6100.359
Track1	3600.344	2600.664	—300.021
Track2	4200.254	—1100.515	900.482
Track3	—3600.254	2600.515	—300.482
Track4	—4300.197	—1300.697	900.857
Track5	—50.762	—1200.341	—5800.379
Theodolite0	—4800.352	1900.272	4400.627
Theodolite1	—4900.282	2000.862	—1700.773
Theodolite2	4800.341	1900.973	2200.572
Theodolite3	4900.282	2000.862	—3500.683

将布设点位在飞机表面标记后,对其依次测量,所选出的公共转站点无遮挡,转站关系与公共转站点对应关系如表 14 示,基于本文方法的公共转站点布设方案,在首次组网中即完成了全部 10 个测站的组网连接,实现了 100% 的首次组网成功率。

对公共转站点布设优化方法的 20 个有效公共转站点进行组网精度解算,测站平差坐标及精度指标如表 15 所示,公共转站点平差坐标及精度如表 16 所示。

基于公共转站点布设优化方法的点位布局在实际工程中的整体测站 RMSE 为 0.078 mm,整体公共转站点 RMSE 为 0.071 mm,该方法确保所有点位处于多测站共视区域,构建了扁平化的转站网络,并保证了多系统协同测量场的组网精度。

4 结论

本文针对在测量站位已确定的前提下,多系统协同测量场中公共转站点依赖人工经验性布设所导致的精度不均、效率低下问题,提出了一种公共转站点布设优化方法。通过构建多系统坐标统一模型,建立了测量场精度评价;在此基础上,引入隐藏点移除算法解析工装遮挡下的单站与多站共视区域,采用体素化方法生成候选点集,并结合多系统误差模型与蒙特卡洛仿真进行不确定度量化与阈值筛选,最终形成满足精度要求的最优公共转站点集合。

为评估本文方法的有效性,分别开展了仿真分析与实例验证。以某飞行器为对象的仿真实验在复杂工装遮挡环境下对比了本文方法与传统经验布设方法、兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法的性能。结果表明:本文方法首次组网成功率达 100%,测站整体均方根误差为 0.055 mm、公共转站点整

表 13 公共转站点坐标与对应的测站代号

Table13 Coordinates of public transfer stations and corresponding station codes

Point	(X,Y,Z)/mm	Stations	Point	(X,Y,Z)/mm	Stations
P0	(711.827, 19.085, 1206.807)	Tracker 0, 1, 3	P10	(283.056, 182.804, 2300.135)	Tracker 0, 2
P1	(−808.585, −101.214, 1563.812)	Tracker 0, 1, 3	P11	(88.557, −489.773, −628.350)	Tracker 2, 4, 5
P2	(1768.616, −31.582, −321.235)	Tracker 0, 1, 2	P12	(−2038.035, −95.084, −1404.644)	Tracker 2, 4, 5
P3	(937.887, −235.249, 1684.045)	Tracker 0, 1, 2	P13	(1837.995, −4.113, −1838.437)	Tracker 2, 4, 5
P4	(−2380.905, −74.524, −1007.668)	Tracker 0, 3, 4	P14	(−531.138, −417.939, −1389.338)	Tracker 4, 5
P5	(−859.431, −277.337, 482.553)	Tracker 0, 3, 4	P15	(−380.360, 131.754, 1334.297)	Tracker 3; Theodolite 0, 1
P6	(−430.091, −193.378, 3382.710)	Tracker 0, 3, 4	P16	(−693.308, 148.646, −117.651)	Tracker 3; Theodolite 0, 1
P7	(−194.378, −295.175, 4712.894)	Tracker 0, 4	P17	(−56.612, 352.679, 460.756)	Tracker 3; Theodolite 0, 1
P8	(−225.137, 184.432, 3293.822)	Tracker 0, 4	P18	(1111.258, 115.511, −1173.516)	Tracker 1; Theodolite 2, 3
P9	(288.325, −185.346, 3856.021)	Tracker 0, 2	P19	(1516.371, 1540.677, −2963.541)	Tracker 1; Theodolite 2, 3

表 14 测量站位的转站关系与公共转站点对应

Table14 The transfer relationship between measurement stations corresponds to the public transfer points

Stations	Points
Tracker 0, 1	(P0, P1, P2, P3)
Tracker 0, 2	(P2, P3, P9, P10)
Tracker 0, 3	(P0, P1, P4, P5, P6)
Tracker 0, 4	(P4, P5, P6, P7, P8)
Tracker 4, 5	(P11, P12, P13, P14)
Tracker 0; Theodolite 0,1,2,3	(P15, P16, P17, P18, P19)

表 15 测站平差坐标及精度评价指标

Table15 Transit relationship and common point correspondence

Instrument station coorinates	(X,Y,Z)/mm	Err _{station} / mm
Tracker1	(6459.82, 200.24, −3181.95)	0.070
Tracker2	(6228.08, −3500.97, −1860.13)	0.065
Tracker3	(671.88, 200.03, −7464.46)	0.087
Tracker4	(−524.90, −3701.11, −6956.51)	0.086
Tracker5	(6956.32, −4000.77, −9905.79)	0.078
Theodolite0	(−3089.11, −499.72, −4400.23)	0.081
Theodolite1	(780.84, −600.19, −9126.84)	0.082
Theodolite2	(5936.94, −499.57, −458.15)	0.078
Theodolite3	(9408.72, −399.57, −4981.69)	0.073

体均方根误差为 0.046 mm,较传统方法分别提升约 34%与 32%,较兼顾位置分布与测量精度的坐标转站点公共点优选方法分别提升约 15%与 22%。以某飞机实际装配现场的多系统协同测量场为对象进行实例验

表 16 公共转站点平差坐标及精度评价指标
Table16 Adjusted coordinates and accuracy evaluation indicators for public transfer stations

Point	(X,Y,Z)/mm	RMSE / mm	Point	(X,Y,Z)/mm	RMSE / mm
P0	(3241.68, -2381.38, -3688.87)	0.063	P10	(2246.65, -2217.67, -3065.01)	0.074
P1	(1807.09, -5021.62, -4306.22)	0.070	P11	(3832.12, -2890.25, -5534.76)	0.050
P2	(4999.96, -2432.03, -4288.58)	0.082	P12	(2584.42, -2495.56, -7423.71)	0.057
P3	(3139.45, -2635.71, -3170.71)	0.056	P13	(5958.26, -2396.38, -5466.97)	0.045
P4	(2072.74, -2474.96, -7308.66)	0.079	P14	(3786.68, -2818.31, -6515.12)	0.097
P5	(2409.33, -2677.79, -5205.64)	0.058	P15	(2287.82, -2268.67, -4236.06)	0.065
P6	(1029.41, -2593.80, -2618.91)	0.065	P16	(2899.97, -2251.85, -5589.35)	0.092
P7	(427.67, -2695.61, -1409.45)	0.047	P17	(3067.60, -2047.72, -4745.61)	0.093
P8	(1247.08, -2216.09, -2568.53)	0.064	P18	(4978.54, -2284.90, -5364.77)	0.085
P9	(1325.39, -2585.78, -1811.16)	0.056	P19	(6368.95, -859.74, -6562.69)	0.088

证,结果表明:本文方法在首次布点即实现了全部测站的组网,成功率达100%;整体测站均方根误差为0.078 mm,整体公共转站点均方根误差为0.071 mm。上述结果表明,在复杂遮挡环境下公共转站点布设优化方法可有效避免反复补点,有效抑制误差累积,提高了公共转站点的布设效率,保证了多系统协同测量场的组网精度。

综上,本研究聚焦于多系统协同测量场的公共转站点布设这一特定环节,所提公共转站点布设优化方法为提升转站精度与测量可靠性提供了系统方法,对实际工程中多系统协同测量的实施具有指导意义。

参考文献

[1] SUN Jing, LIN Xuezh, GUO Lili, et al. Structural shape perception technology based on multi-source system fusion[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(02): 217-232.
孙静, 林雪竹, 郭丽丽, 等. 基于多源系统融合的结构形态感知技术[J]. 光子学报, 2023, 52(02): 217-232.

[2] ZUO Zhiwei, LIN Xuezh, FU Xihong, et al. Optical axis quantification characterization method based on multi-system collaborative measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(01): 115-125.
左志伟, 林雪竹, 付西红, 等. 基于多系统协同测量的光轴量化表征方法[J]. 光学学报, 2025, 45(01): 115-125.

[3] HU Shuai, WEI Kaili, ZHAO Ziyue. Discussion on the construction scheme of a multi-system collaborative geometric measurement platform for aircraft digital manufacturing assembly[J]. China Metrology, 2021, (4): 100-102.
胡帅, 魏开利, 赵子越. 用于飞机数字化制造装配的多系统协同几何量测量平台构建方案探讨[J]. 中国计量, 2021, (4): 100-102.

[4] GUO Yinggang, SHI Fengmiao, XU Jiaze. Current Status and Prospects of Industrial Measurement Technology Based on Multi-sensor Fusion[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2025, (S1): 44-49.
郭迎钢, 石风淼, 徐嘉泽. 多传感器融合的工业测量技术现状及展望[J]. 测绘通报, 2025, (S1): 44-49.

[5] SUN Anbin, CAO Tieze, WANG Jihu, et al. Technological development trends of geometric dimension measurements of large parts in the High-end equipment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 41-50.
孙安斌, 曹铁泽, 王继虎, 等. 高端装备大型零部件几何尺寸测量技术现状及趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 41-50.

[6] TAN Jiubin, JIANG Zhuangde, LUO Jianbin, et al. Basic Theory and Method of Precision Measurement for High-end Precision Equipment[J]. China Science Foundation, 2022, 36(06): 955-962.
谭久彬, 蒋庄德, 雒建斌, 等. 高端精密装备精度测量基础理论与方法[J]. 中国科学金, 2022, 36(06): 955-962.

[7] XIAO Qingdong, ZHANG Xuerui, GUO Feiyan, et al. Research status and development trend of active real-time control technology for aircraft assembly quality[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 22-35.
肖庆东, 张学睿, 郭飞燕, 等. 飞机装配质量主动实时控制技术研究现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(20): 22-35.

[8] CHEN Wenliang, LI Yixing, FENG Suling. Analysis and Prospect of Assembly Technology for Aircraft Composite Fuselage Panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(16): 59-73.
陈文亮, 李奕星, 冯素玲. 飞机复合材料机身壁板装配技术分析与发展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(16): 59-73.

[9] SHANG Hang, LIU Changying, WANG Ruijian. Measurement methods of 3D shape of large-scale complex surfaces based on computer vision: A review, 2022, 197: 111302.

[10] WANG Yucheng, HU Wusheng. The Influence of Common Point Selection on Transformation Accuracy in Coordinate Transformation[J]. Modern Surveying and Mapping, 2008, 31(05): 13-15
王玉成, 胡伍生. 坐标转换中公共点选取对于转换精度的影响[J]. 现代测绘, 2008, 31(05): 13-15.

- [11] DING K L, JIN T T, JIANG Z Q, et al. Optimization and accuracy analysis of point spatial distribution based on three-dimensional multi-point intersection[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4): 691-700.
丁克良, 靳婷婷, 蒋志强, 等. 三维多点交会点位空间分布优化与精度分析[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 691-700.
- [12] DING Ting, HE Xiaoye, WANG Wei, et al. A common points selection method based on the uniformity of FLTMMS for pre-alignment of particle accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1062: 169147.
- [13] LIN Xuezhu, WANG Dexian, FU Xihong, et al. Station planning method for collaborative measurement field of multi-sensor systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(08): 226-242.
林雪竹, 王德选, 付西红, 等. 面向多传感系统协同测量场的站位规划方法[J]. 光子学报, 2024, 53(08): 226-242.
- [14] XIONG Tao, LI Longgao, LI Qi, et al. Station Planning for Laser Tracker Based on Combined Measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 246-255.
熊涛, 李珑杲, 李琦, 等. 基于组合测量的激光跟踪仪站位规划[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 246-255.
- [15] YU Hao, DU Fuzhou. Flexible Inspection Technology for Large-Scale Products Based on Combined Measurement[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(05): 1037-1046.
于浩, 杜福洲. 基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(05): 1037-1046.
- [16] YIN Hui, WANG Jingjing, TIAN Xin. Common points selection in 3D datum transformation[J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(2): 14-17.
尹晖, 王晶晶, 田鑫. 三维空间基准转换公共点选取的新方法[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(2): 14-17.
- [17] HE Junkai, XU Dongsheng, WANG Mingyuan, et al. Research on coordinate transformation model considering the spatial distribution of control points[J]. GNSS World of China, 2022, 47(1): 18-22.
贺俊凯, 徐东升, 王明远, 等. 顾及控制点空间分布的坐标转换模型研究[J]. 全球定位系统, 2022, 47(1): 18-22.
- [18] LIU Zhonghe, LI Zongchun, HE Hua. A Public Point Optimization Method for Coordinate Transformation Considering Both Location Distribution and Measurement Accuracy[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(24): 3632-3643.
刘忠贺, 李宗春, 何华. 兼顾位置分布及测量精度的坐标转换公共点优选方法[J]. 光学精密工程, 2024, 32(24): 3632-3643.
- [19] MA Yixin, ZHOU Weihui, ZHANG Zili, DONG Dengfeng, et al. Unified least squares adjustment of laser tracker network measurement[J]. Measurement, 2025, 2025: 117566.
- [20] FAN Baixing, LI Guangyun, ZHOU Weihui, etc Space Joint Adjustment Model and Accuracy Analysis of Laser Tracker [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(01): 120-126.
范百兴, 李广云, 周维虎, 等. 激光跟踪仪空间联合平差模型及精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(01): 120-126.
- [21] ZHANG Yang, WANG Xu, CUI Jiacheng, et al. Towards perceptive assembly: An edge vision network-enabled augmented reality (AR) monitoring method for global shape and mechanical information in large aerospace components[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2026, 84: 117-134.
- [22] ZOU Jingui, YANG Dingliang. Accuracy analysis of multilateral intersection measurement based on optimization layout without directional points[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2022, 47(10): 1758-1765.
邹进贵, 杨丁亮. 无定向点优化布局的多边交会测量精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1758-1765.
- [23] SONG Jiansheng. Analysis of Digital Measurement and Error Control Technology in Aircraft Assembly Process[J]. China Machinery, 2024, (36): 4-7.
宋建生. 飞机装配工艺中数字化测量与误差控制技术分析[J]. 中国机械, 2024, (36): 4-7.

Research on the optimization method for the layout of public transfer stations in multi-system collaborative measurement fields

LIN Xuezhu, DONG Jiyu, GUO Lili, LI Lijuan

(Fundamental Science and Technology Center of Aerospace Vehicle Structures Inspection and Evaluation, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In the domain of high-end precision equipment manufacturing and the assembly of large-scale components, such as large machinery and complex opto-mechanical systems, the multi-system collaborative measurement field has emerged as an advanced methodology. By integrating diverse

measurement instruments (e.g., laser trackers, electronic theodolites) for coordinated data acquisition and fusion, it offers extensive spatial coverage, high precision, and enhanced efficiency, providing critical measurement support throughout the manufacturing process. The core challenge lies in achieving precise spatial coordinate unification among these heterogeneous systems, which differ significantly in measurement principles, error sources, and coverage capabilities. The spatial distribution of public transfer stations, which serve as common reference points for coordinate transformation between different instrument stations and systems, is pivotal for ensuring transformation accuracy, improving network efficiency, and enhancing overall measurement field stability. However, current practices predominantly rely on manual, experience-based placement of these stations, guided by principles of uniform distribution over the component's surface. This approach often neglects critical constraints such as line-of-sight visibility under complex tooling occlusions, the redundancy of multi-station observations, and the propagation of measurement uncertainties. Consequently, it frequently leads to suboptimal point selection, necessitating repeated on-site adjustments, compromising measurement efficiency, and ultimately degrading the accuracy and robustness of the coordinate transformation. Therefore, there is a pressing need for a systematic, optimization-driven methodology for deploying public transfer stations within a pre-planned multi-system measurement network to maximize data fusion precision. To address this gap, this paper proposes a comprehensive optimization method for the placement of public transfer stations in multi-system collaborative measurement fields. The methodology unfolds in several interconnected stages. First, a unified coordinate transformation model and a corresponding accuracy evaluation model for the multi-system measurement field are established. The transformation model employs a weighted least-squares approach to solve for optimal rotation and translation parameters between local and global coordinate systems, while the evaluation model defines overall root mean square error (RMSE) metrics for both instrument stations and public points to quantify network precision. Second, an optimization model for station placement is constructed, focusing on two core functionalities: visibility determination and uncertainty-based optimization. For visibility, the Hidden Point Removal (HPR) algorithm is introduced to accurately determine the visible region on the target component from each individual station, accounting for occlusions from tooling and fixtures. Subsequently, a geometric tolerance method is applied to intersect these individual visible regions, identifying common-view areas observable by multiple stations simultaneously, thereby ensuring necessary observational redundancy for public points. Third, candidate points within the common-view areas are generated via voxel-based down-sampling to reduce computational load. Then, a Monte Carlo simulation is employed for uncertainty analysis. Distinct error models for the laser tracker (incorporating distance and angular errors) and the electronic theodolite (incorporating instrument and sighting errors) are used to predict the three-dimensional measurement uncertainty for each candidate point. Finally, differential accuracy thresholds are applied to filter the candidate set, yielding an optimal collection of public transfer stations that satisfy both visibility and precision requirements. The effectiveness of the proposed method is rigorously validated through a detailed simulation experiment centered on a large aircraft model ($10\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$) within a measurement volume of $12\text{m} \times 9\text{m} \times 4\text{m}$, featuring complex tooling occlusions. The collaborative network comprised six laser tracker stations and four electronic theodolite stations. The results demonstrated significant advantages over traditional empirical placement. Regarding deployment efficiency and reliability, the proposed method achieved a 100% first-attempt network success rate, meaning all ten stations were successfully integrated into a unified network with sufficient (≥ 3) common points between necessary station pairs without requiring supplementary points. In contrast, the traditional method only achieved a 70% success rate initially, necessitating additional point placement to complete the network. More importantly, in terms of measurement accuracy, the optimized layout yielded a station overall RMSE of 0.055 mm and a public transfer station overall RMSE of 0.046 mm. These figures represent a substantial improvement of approximately 34% and 32%, respectively, compared to the traditional method's station overall RMSE of 0.084 mm and public point overall RMSE of 0.068 mm. Analysis revealed that the optimized points were concentrated in key structural areas (fuselage, wings, empennage) and exhibited a tighter, superior distribution of coordinate uncertainty. The method effectively suppressed error accumulation, which was more pronounced in the traditional scheme due to longer chains of coordinate transformations. In conclusion, this research presents a novel and systematic optimization methodology for deploying public transfer stations in multi-system collaborative measurement fields with predetermined instrument stations.

By integrating a visibility analysis framework based on the HPR algorithm and multi-station common-view intersection with a precision optimization module based on system-specific error modeling and Monte Carlo uncertainty analysis, the method overcomes the limitations of experience-based placement. The experimental results on a complex aircraft model confirm that the proposed approach not only significantly enhances the efficiency and reliability of the initial network establishment but also delivers markedly superior coordinate unification accuracy for both the instrument stations and the public points themselves. This study provides a robust theoretical foundation and a practical solution for constructing high-precision, stable, and efficient multi-system collaborative measurement networks, especially in environments characterized by significant occlusions. It offers valuable guidance for practical engineering applications in the precision manufacturing and assembly of large-scale components.

Key words: Common point; coordinate transformation; collaborative measurement; accuracy optimization; multi-system

OCIS Codes: 120.1880; 120.3930; 120.4640

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0712002