



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—××××

飞机轮廓视觉测试技术规范

Technical Specification for Vision Testing of Aircraft Contours

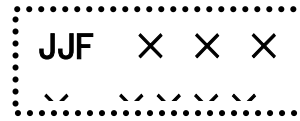
202×-×-×发布

202×-×-×实施

国家市场监督管理总局发布

飞机轮廓视觉测试技术规范

Technical Specification for Vision Testing of
Aircraft Contours



归口单位：全国航空专用计量测试技术委员会

主要起草单位：北京航空航天大学
中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

参加起草单位：中国飞行试验研究院
思看科技（杭州）股份有限公司
沈阳飞机工业(集团)有限公司
北京航天计量测试技术研究所
成都飞机工业（集团）有限责任公司

本规范委托全国航空专用计量测试技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

孙军华（北京航空航天大学）

孙安斌（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

张虎龙（中国飞行试验研究院）

王江峰（思看科技（杭州）股份有限公司）

刘洪霞（沈阳飞机工业(集团)有限公司）

孙增玉（北京航天计量测试技术研究所）

匡锐丹（成都飞机工业（集团）有限责任公司）

目录

引 言	IV
1 范围	5
2 引用文件	5
3 术语和定义	5
3.1 位姿跟踪测量设备	5
3.2 三维视觉测量设备	5
3.3 参数标定	5
3.4 编码标志点	5
3.5 测量路径	6
3.6 光学基准组网	6
4 概述	6
4.1 用途	6
4.2 结构	6
4.3 工作原理	6
5 技术要求	7
5.1 外形尺寸测试要求	7
5.2 轮廓与形面偏差测试要求	8
6 测试条件	8
6.1 温度和相对湿度	10
6.2 光照条件	10
6.3 振动、气流及其他环境因素	10
6.4 被测对象状态	10
6.5 测量设备及软件状态	10
7 测量系统、测量标准及辅助设备	11
7.1 测量系统组成	11
7.2 测量系统各模块技术要求	12
7.3 测量系统性能指标	15
7.4 测量标准及辅助设备	16
8 测量程序	17
8.1 测试准备	18

8.1.1 测试任务确认	18
8.1.2 测试前检查	18
8.2 建立全局坐标系	19
8.2.1 组网布置	19
8.2.2 坐标系建立与验证	20
8.3 参数标定	21
8.4 测量路径规划	21
8.4.1 规划原则	21
8.4.2 规划步骤	22
8.5 现场数据采集	22
8.5.1 采集流程	22
8.5.2 采集参数推荐	24
8.5.3 数据保存	24
8.6 测量过程质量控制与补测	25
8.6.1 离场前质量检查	25
8.6.2 补测规则	25
8.7 点云数据处理	26
8.7.1 数据校验	26
8.7.2 坐标转换	26
8.7.3 点云滤波与去噪	26
8.7.4 离群点剔除	26
8.7.5 处理结果检查	26
8.8 测量结果计算	26
8.8.1 轮廓尺寸计算	26
8.8.2 轮廓与形面偏差表征	27
9 测量报告	27
附录 A	30
A.1 方向余弦矩阵	30
A.2 位置矢量	30
A.3 齐次变换矩阵	30
附录 B	31
B.1 测量方法	31

B.2 测量设备及其技术性能	31
B.3 测量模型及其输入量与输出量	31
B.3.1 点云坐标转换模型	31
B.3.2 点云坐标转换输入量	31
B.3.3 点云坐标转换输出量	32
B.3.4 其他量值说明	32
B.4 不确定度来源	32
B.4.1 三维坐标引入的不确定度	32
B.4.2 旋转角度引入的不确定度	32
B.4.3 平移分量引入的不确定度	33
B.5 输入量的标准不确定度	33
B.5.1 三维坐标的标准不确定度	33
B.5.2 旋转角度的标准不确定度	33
B.5.3 平移分量的标准不确定度	33
B.6 灵敏系数	34
B.6.1 三维坐标的灵敏系数	34
B.6.2 旋转角度的灵敏系数	34
B.6.3 平移分量的灵敏系数	35
B.7 输出量的不确定度分量	35
B.7.1 三维坐标引入的不确定度分量	35
B.7.2 旋转角度引入的不确定度分量	35
B.7.3 平移分量引入的不确定度分量	35
B.8 合成标准不确定度	35
B.9 扩展不确定度	35
B.10 点云数据估计值及其测量不确定度	36
B.10.1 点云数据估计值	36
B.10.2 输入量的标准不确定度	37
B.10.3 灵敏系数	38
B.10.4 输出量的不确定度分量	39
B.10.5 合成标准不确定度	41
B.10.6 扩展不确定度	41

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》共同构成支撑本技术规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

飞机轮廓视觉测试技术规范

1 范围

本规范规定了采用飞机外轮廓视觉测试系统，对航空飞机机身、机翼、发动机短舱和尾翼等外部轮廓开展点云数据采集、处理和测量的测试活动。

本规范适用于航空飞机外轮廓视觉测试，其他飞行器可参照使用。

2 引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本规范必不可少的条款。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本规范。

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》

JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》

JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》

GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》

GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 位姿跟踪测量设备 pose tracking measurement equipment

基于设备采集的图像中的可识别标志特征，对设备相对于参考坐标系的位置和姿态进行跟踪测量，并持续输出相应位姿参数的视觉测量设备。

3.2 三维视觉测量设备 three-dimensional vision measurement equipment

利用光学成像方式获取被测对象表面几何信息，并经图像处理和三维重建输出被测对象表面点云数据的非接触式视觉测量设备。

3.3 参数标定 parameter calibration

在规定条件下，利用几何参数已知的标定物或标志点，确定三维视觉测量设备的成像模型参数、镜头畸变参数以及三维视觉测量设备相对于位姿跟踪测量设备坐标系的位置和姿态参数，并建立测量系统坐标转换关系的过程。

3.4 编码标志点 coded target

具有特定编码图案和明确几何属性，可由视觉测量设备重复识别并用于匹配、定位、标定或坐标转换的标志点。按编码方式可分为环形编码标志点和点分布型编码标志点两类：环形编码标志点由中心定位圆点及外围环形编码带构

成，点分布型编码标志点由多个圆点按特定几何排列构成。

3.5 测量路径 measurement path

测量设备或传感器为完成规定区域数据采集，按预定顺序经过的空间位置、姿态及其连接关系。

3.6 光学基准组网 optical reference network

由空间分布稳定、成像清晰且可识别匹配的编码标志点构成，用于建立或维持飞机轮廓视觉测量全局坐标系的空间基准。

4 概述

4.1 用途

飞机轮廓视觉测量用于获取飞机外部轮廓的三维信息，为飞机外形设计验证、制造装配、维修检测和质量评价提供测量数据。

4.2 结构

飞机外部轮廓通常由机身、机翼、发动机短舱和尾翼等主要部位构成，见图 1。

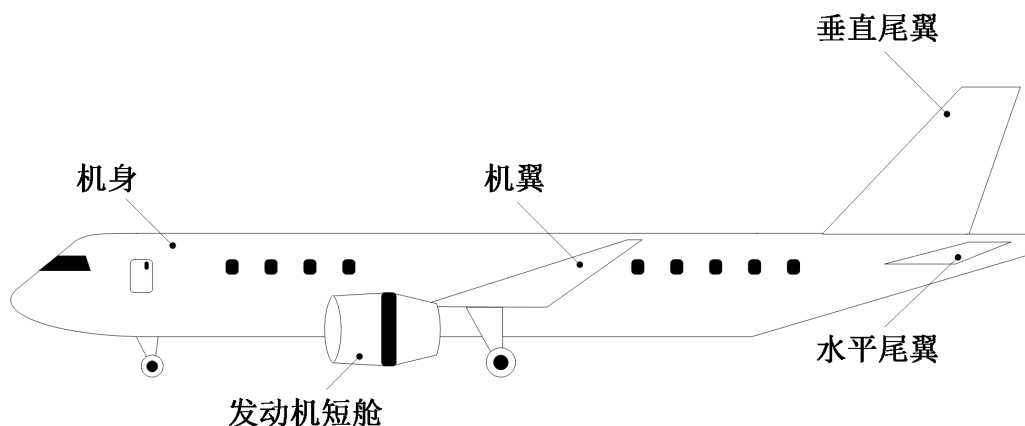


图 1 飞机轮廓组成示意图

4.3 工作原理

飞机轮廓视觉测试采用局部点云采集与全局坐标统一表达的方法。

测量系统以光学基准组网建立全局坐标系，由位姿跟踪测量设备与三维视觉测量设备组成的视觉测量模块在运载模块导引下，沿规划测量路径逐站位开展数据采集。

位姿跟踪测量设备基于图像中编码标志点的像点坐标与全局坐标系下已知三维坐标的对应关系，采用空间后方交会方法求解位姿参数，据此将各局部点云转换至全局坐标系，经坐标转换全局统一、滤波去噪等处理后形成完整飞机轮廓点云，并据此计算外形尺寸及轮廓与形面偏差等几何测量结果。工作原理图见图 2。

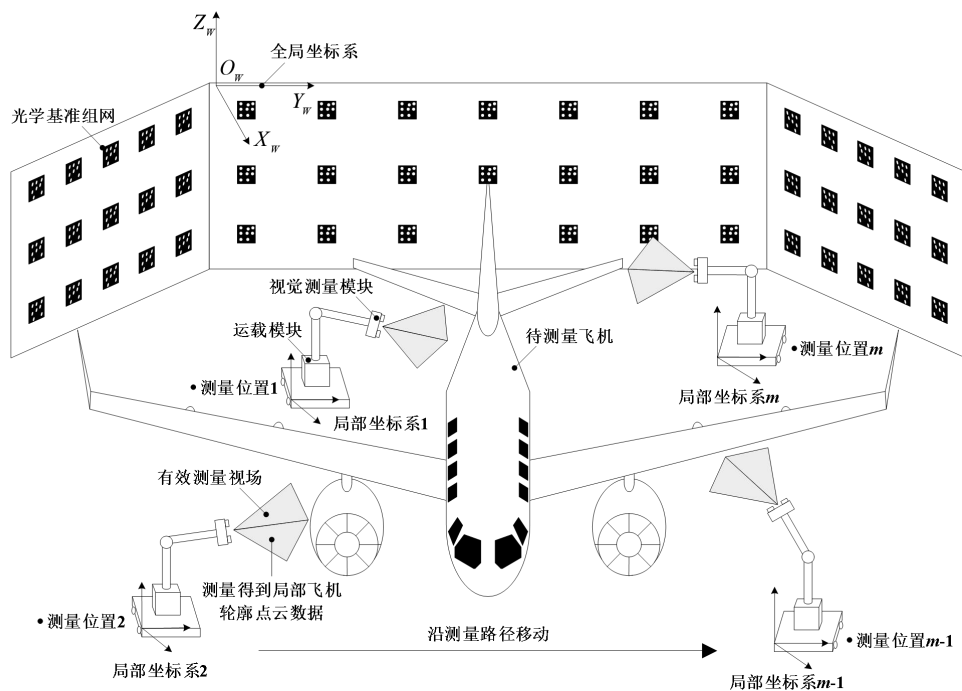


图2 飞机轮廓视觉测试原理示意图

5 技术要求

飞机外轮廓的测试项目、测试区域、技术指标及结果表达要求，应根据测试任务和适用技术文件确定。具体测试项目、被测部位、标称值、允许偏差及合格判定要求，应由设计文件、工艺文件、维修文件或合同文件规定。本规范规定测试程序、数据处理和结果表达的一般要求，不规定具体飞机型号或部件的技术指标限值。

根据测试任务，飞机外轮廓测试项目主要包括（1）外形尺寸测试、（2）轮廓与形面偏差测试两类，可根据需要单独实施或组合实施，其具体要求分别见5.1和5.2。

5.1 外形尺寸测试要求

外形尺寸测试可覆盖整机总体包络、机身规定站位截面、机翼和尾翼外缘及截面，以及发动机短舱、进气道、吊挂、雷达罩、座舱盖、舱门、整流罩和部件连接过渡区域等局部外轮廓。具体范围按飞机构型、技术状态、测试任务和适用技术文件确定。

测试项目包括机身长度、翼展、最大宽度、最大高度、尾翼尺寸、规定截面尺寸及由特征点、线、面或截面确定的特征间距，项目清单见表1。

表 1 外形尺寸测试项目清单

序号	外形尺寸测试项目名称
1.	机身长度
2.	翼展
3.	机身最大宽度
4.	飞机最大高度
5.	水平尾翼展长
6.	垂直尾翼高度
7.	规定截面的宽度和高度
8.	由外轮廓特征点、特征线、特征面或特征截面确定的特征间距

测试任务应明确被测部位、坐标系、测量基准、尺寸定义、起止位置、测量方向和结果表达要求；标称值、允许偏差及合格判定要求按适用技术文件执行。

5.2 轮廓与形面偏差测试要求

轮廓与形面偏差测试用于评定实测外轮廓相对于设计理论外形的几何偏差。轮廓偏差为规定站位、截面或投影平面内的二维偏差；形面偏差为规定表面区域内实测点相对于参考轮廓或曲面的三维偏差，通常按法向距离或规定坐标方向分量表示。

其中，轮廓偏差表征在规定站位、特征截面或投影平面内，实测轮廓与理论轮廓之间的二维偏差。

形面偏差表征在规定表面区域内，实测外形数据与设计外形数模或参考模型之间的三维偏差，一般以实测点至参考曲面的法向距离或规定坐标方向分量表示。

测试任务应明确被测对象状态、测试区域、坐标系和对齐基准、参考对象版本、偏差项目、计算方法和结果表达要求；允许偏差及合格判定规则按适用技术文件执行。

6 测试条件

测试条件包括环境、被测对象状态以及设备和软件状态。测试前完成对象确认、测量基准和光学基准组网布置、设备检查及参数标定；测试中保持基准可识别、路径覆盖和位姿/点云同步采集；测试后保证数据处理、结果计算和记录可追溯。

温度、湿度、照度、振动、气流、供电及现场空间不应导致基准漂移、图像模糊、标志点漏识别、点云缺失或数据异常。正式测试前应逐项完成表 2 规定的核查；任一条件超出设备允许范围或表 2 常规控制要求时，应先采取温控、遮光或补光、隔振、挡风、稳压等措施，重新核查合格后方可开展测试。无法满足时，应停止测试或按适用技术文件完成影响评估和处置，并在测试记录及报告中说明。

设备说明书、设计文件、工艺文件、维修文件或合同文件另有规定时，执行相应规定；无明确规定时按表 2 控制。

表 2 测量条件及控制要求

参数	常规控制要求	核查和记录要求
环境温度	10℃~35℃	测量开始前和结束后各记录一次；连续测量时间超过 0.5 h 时，每 0.5 h 至少记录一次
温度变化率	不大于 2℃/h	测量期间连续监测；不具备连续监测条件时，每 0.5 h 至少记录一次
测量区域空间温差	不大于 5℃	在测量区域内选择不少于 3 个具有代表性的位置进行测量
相对湿度	20%~80%，且无凝露	测量开始前和结束后各记录一次
被测对象表面温度	与环境温度之差不宜超过 5℃；测量期间的变化不宜超过 2℃	在具有代表性的部位进行测量并记录
环境照度	应处于设备允许工作照度范围；设备无明确规定时，可按 100 lx~100000 lx 控制；同一站位测试期间照度变化不宜超过 20%	每个典型测试区域开始前记录照度；调整照明或曝光后重新记录，并通过试采集确认图像无影响识别的过曝、欠曝或频闪，标志点可稳定识别、轮廓特征可正常提取
气流速度	不大于 2 m/s	存在送风口、开启舱门或室外作业时，应在设备及光学基准附近测量并记录
振动和冲击	现场振动速度有效值（10 Hz~1000 Hz）不大于 2.8 mm/s，加速度峰值不大于 300 mm/s ² ；偶发冲击峰值加速度不大于 50 m/s ² （5 g）、持续时间不大于 11 ms	测量前用振动测试仪核查安装基础及被测对象振动，记录振动速度有效值、加速度峰值及主频；偶发冲击记录峰值加速度和持续时间；测量过程中定期巡检，异常时立即记录并停止测量。
大气	86 kPa~106 kPa；	使用受空气折射率影响的测量设备时，应测

压力	当其影响可忽略时可不作控制	量并记录
电磁及供电条件	电磁环境应满足设备 EMC 要求：静电放电不低于接触 $\pm 4\text{ kV}$ / 空气 $\pm 8\text{ kV}$ ，射频辐射（80 MHz~1 GHz）不低于 3 V/m ，电快速瞬变脉冲群电源端口不低于 $\pm 2\text{ kV}$ ；供电电压波动 $\leq \pm 10\%$ ，频率波动 $\leq \pm 2\text{ Hz}$ ，谐波失真 $\leq 5\%$	测试前检查供电、通信和数据传输状态；出现异常时，应排查电磁干扰和供电质量，必要时使用相应仪器测量并记录。异常未消除前不得继续测试

6.1 温度和相对湿度

按表 2 检查并记录温度、温度变化率、空间温差、相对湿度和被测对象表面温度。

温度变化可能引起热变形时，应记录对象和环境温度，进行修正或将影响纳入测量不确定度评定。

6.2 光照条件

按表 2 检查照度及稳定性，确保满足成像、标志识别和特征提取要求。

存在直射光、强反射、阴影或频闪时，应采取遮光、补光、调整设备位置或方向、调整曝光等措施；调整后应重新试采集，确认标志点识别、轮廓特征提取和点云生成均正常后方可继续测试。

6.3 振动、气流及其他环境因素

振动、冲击和气流不应影响设备、光学基准、工装与被测对象的相对稳定性，或造成图像、位姿、通信和数据异常。

存在振动、冲击或气流干扰时，正式测试前应进行稳定性检查，并采取隔振、挡风、停源或调整测试时段等措施；测试过程中一旦出现图像模糊、位姿跳变、通信异常或点云明显错位，应立即暂停测试，处置并重新核查合格后方可恢复。

大气压力、电磁干扰或供电波动可能影响结果时，应规定适用范围、采取措施并记录，必要时纳入测量不确定度评定。

6.4 被测对象状态

被测对象应处于任务规定的技术状态，表面应满足成像和点云采集要求，检查内容见 8.1.3 小节。编码及非编码标志点应检查完整性；破损、污渍、起翘或脱落时应更换或重贴并记录。

6.5 测量设备及软件状态

测量设备及软件应满足测试任务要求，校准状态应在有效期内。测试前至

少应确认：设备预热和自检完成；位姿跟踪测量设备与三维视觉测量设备连接牢固且相对位姿状态未发生变化；采集触发与时间同步功能正常；软件版本和任务参数受控；数据存储空间满足计划采集量并具备备份条件。具体检查内容和记录要求见 8.1.2 小节。

7 测量系统、测量标准及辅助设备

7.1 测量系统组成

飞机轮廓视觉测量系统（以下简称测量系统）以视觉测量设备为核心，由光学基准组网、视觉测量模块、运载模块和总控模块组成，完成全局坐标系建立、位姿跟踪、局部点云采集、坐标统一、质量控制和结果输出，见图 3。

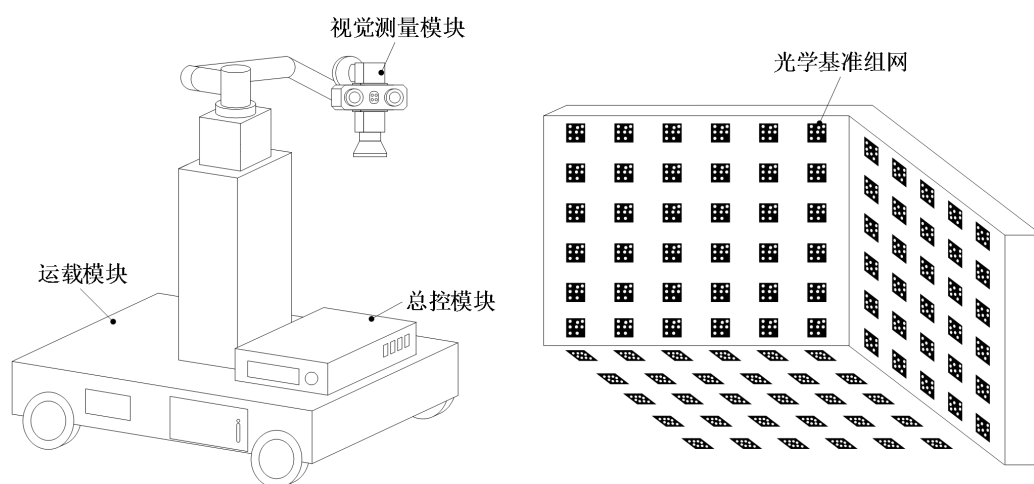


图 3 飞机轮廓视觉测量系统组成示意图

视觉测量模块包括位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备：前者输出三维视觉测量设备相对于全局坐标系的位姿参数，可采用单目、双目或多目视觉；后者输出被测表面三维点云，可采用立体视觉、结构光或激光扫描。典型结构见图 4、图 5。

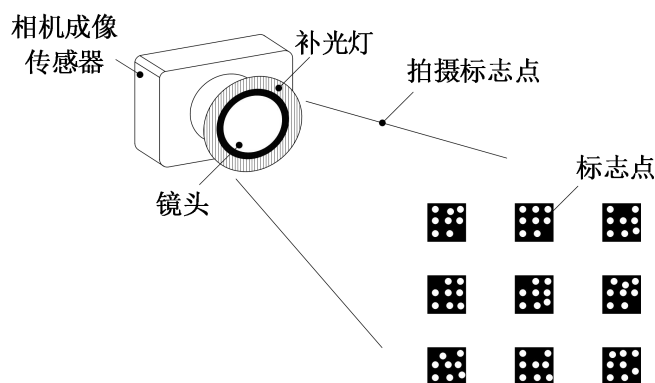


图 4 单目位姿跟踪测量设备示意图

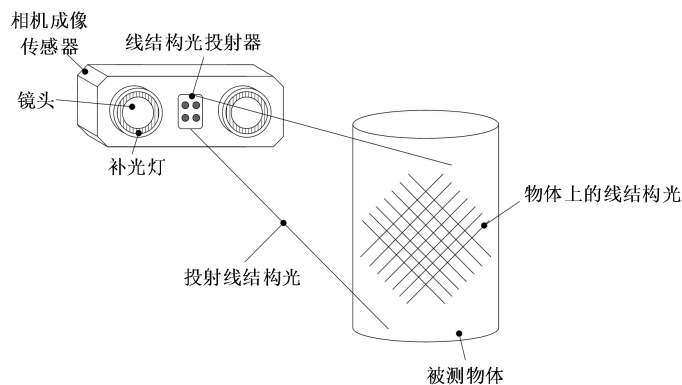


图5 双目相机加多线结构光 三维视觉测量设备示意图

测量数据涉及三类坐标系：三维视觉测量设备相机坐标系、位姿跟踪测量设备局部坐标系和全局坐标系，分别用于局部重建、位姿关联和统一表达，三者关系见图6。

系统配置按“先硬件后软件、先基准后测量”执行：完成设备安装连接、组网布置、相机和相机间位姿标定、软件及任务参数配置，并通过试采集确认标志点识别、位姿解算和点云采集正常。

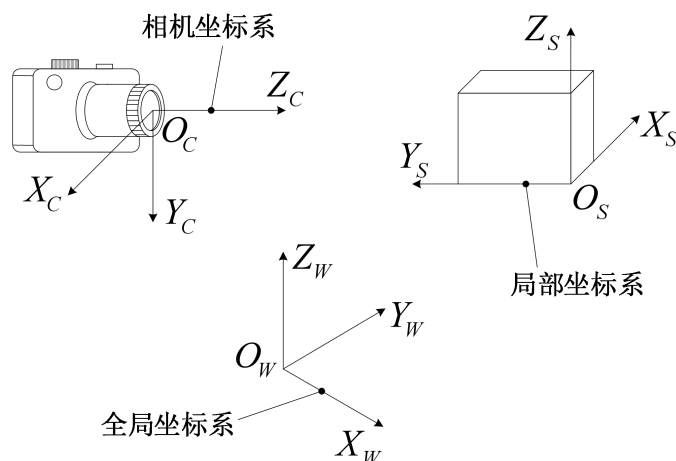


图6 三类坐标系示意图

7.2 测量系统各模块技术要求

各模块组成、功能及技术要求见表5，典型结构见图7～图10。

表5 测量系统组成、功能及技术要求

组成部分	主要组成	核心功能	技术要求
光学基准组网	编码标志点、稳固载体	建立并维持全局坐标系	①标志点空间分布稳定、成像清晰、可识别匹配；②覆盖全部计划测量位置；③每站位可识别标志点数应满足位姿解算要

			求，宜配置冗余；④不宜过度集中和分散，避开遮挡、强反射位置；规格应与测量距离匹配，具体要求见 8.2.1；⑤标志点表面应采用高反光材料，底衬宜为黑色哑光材料，成像对比度应满足识别要求。
视觉测量模块	位姿跟踪测量设备、三维视觉测量设备、刚性连接件	同步采集位姿参数与局部点云	①位姿跟踪测量设备与三维视觉测量设备的相对位姿应在测试前标定，测试过程中保持稳定，相机间位姿标定重复性误差宜不大于测试任务允许误差的 1/5；②位姿参数与点云数据应时间同步，同步误差宜不大于单帧采集周期的 1/10；③三维视觉测量设备的精度和扫描速率应满足测试任务要求，性能指标见表 5；④连接件刚性应满足测量精度要求，受冲击后应重新标定。
运载模块	自动导引车、升降台、机械臂	将视觉测量模块移动至规定位置和姿态	①满足测量路径覆盖和姿态调整要求；②运动范围和安全间隙经检查确认
总控模块	软件处理单元、硬件控制单元、供电单元	任务配置、设备控制、数据采集与处理、结果输出	①具备测试任务配置、设备状态监控与协同控制功能，支持采集触发和时间同步；②具备点云坐标转换、滤波去噪、质量控制及测量结果计算与输出功能；③支持原始数据、位姿参数及关键处理参数的保存与可追溯管理，原始数据不得被覆盖，各类数据通过唯一标识关联。

测量系统应具备任务配置、设备检查、标志点识别与位姿解算、点云采集

存储、坐标统一、质量控制和结果输出功能。

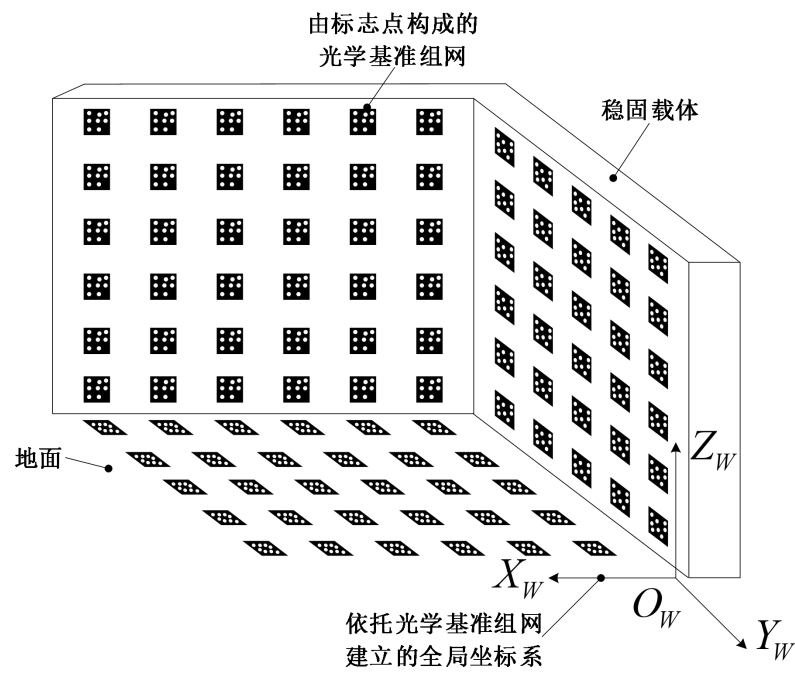


图 7 光学基准组网模块示意图

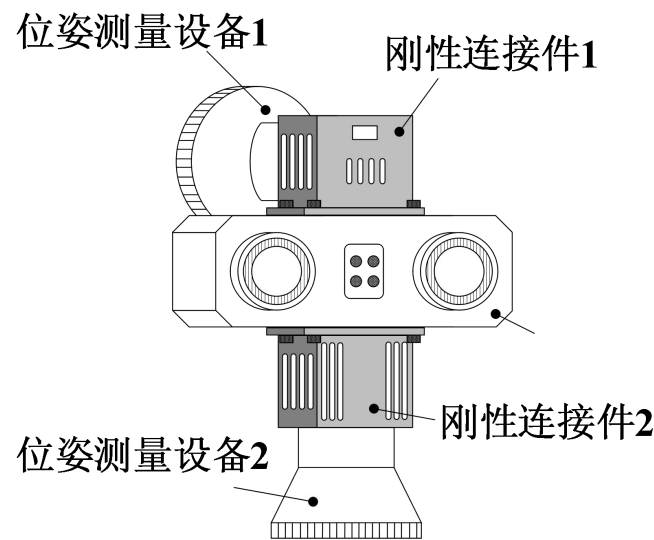


图 8 视觉测量模块示意图

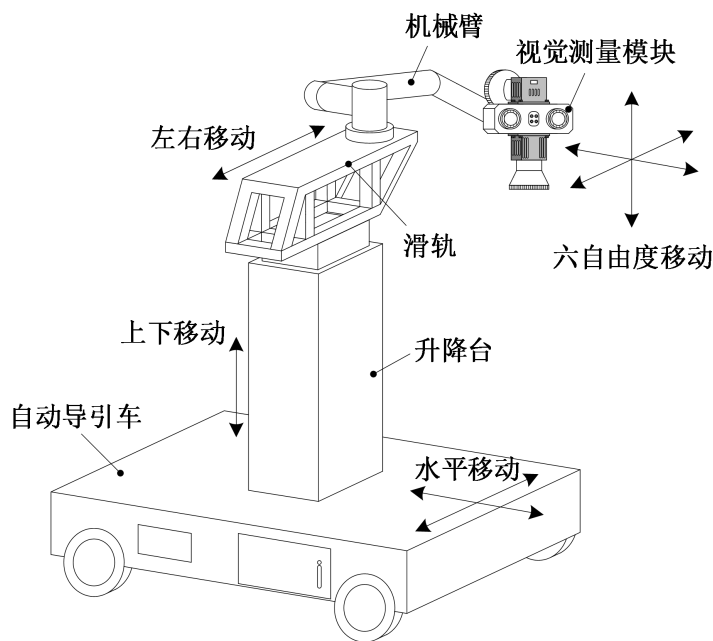


图 9 运载模块示意图

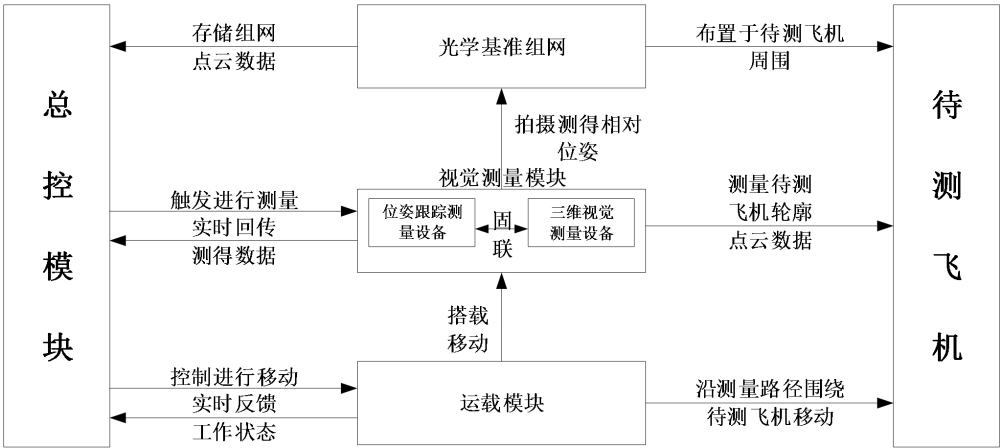


图 10 飞机轮廓视觉测量系统功能逻辑图

7.3 测量系统性能指标

测量系统性能指标见表 6。测试任务应结合型号、部件和区域量化规定适用指标，至少包括测量误差与重复性、配准偏差、点云间距和必测区域覆盖率；不同量程或部位应分别规定。系统宜保存原始数据、中间数据、位姿参数和关键处理参数供复核，原始数据不得覆盖。

表 6 测量系统性能指标

序号	内容	推荐参考
1	尺寸测量误差与重复性：测量结果相对于参考长度的偏差及相同条件下重复测量结果的离散程度	体积精度宜优于 0.02mm+0.05 mm/m；重复性宜不大于允许误差的 1/3
2	曲面配准偏差：测量曲面点云与参考曲面或参考模型	整体配准偏差宜不大于测

	的整体吻合程度	试任务允许形面偏差的 1/3
3	点云间距与完整性：规定测量区域内有效点云的采样间距或融合后点云间距，以及对必测区域的覆盖程度	点云间距宜不大于允许偏差的 1/5；必测区域覆盖完整性不宜低于 95%
4	扫描速率与效率：单位时间内获取的有效测量点数	宜不低于 100 万点/秒，大尺寸测量场景宜不低于 300 万点/秒
5	单站测量范围：单站位可覆盖的测量体积或距离	单站测量距离宜不小于 3 m，测量体积宜不小于 10 m ³
6	全局坐标系建立精度：基于光学基准组网建立的全局坐标系的尺度精度和点位重复性	采用摄影测量方式建立全局坐标系时，体积精度宜优于 0.02 mm/m；全局控制点坐标重复性宜不大于 0.05 mm

7.4 测量标准及辅助设备

测量标准及辅助设备应根据外形尺寸、轮廓与形面偏差的测量要求，以及系统性能检查项目、测量范围和测量不确定度要求选择。设计数据和参考模型应来源明确、版本受控。常用测量标准及辅助设备见表 7。

表 7 常用测量标准及辅助设备

序号	类别	典型器具	用途	技术要求
1	几何标准器	标准球、球杆、标准长度、标准平面、标准曲面、经校准参考模型	尺寸测量误差与重复性检查、轮廓与形面偏差检查	①尺寸/形状/坐标参考值覆盖规定测量范围；②测量不确定度或最大允许误差满足测试任务目标不确定度要求；③无法采用固定比例判据时，应通过不确定度预算证明适用性；④标准球直径不宜小于 25 mm，直径校准扩展不确定度 $U \leq 1.5 \mu\text{m}$ ($k=2$)，圆度应优于被校设备探测误差的 1/3；⑤标准球杆长度宜覆盖 100 mm、300 mm、500 mm、1000 mm、2000 mm 规格，球心距扩展不

				确定度不应大于 0.003 mm (k=2), 杆体材料热膨胀系数不宜大于 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; ⑥标准平面尺寸不宜小于 600 mm×600 mm, 平面度应优于被校设备平面测量误差的 1/3。
2	设计数据及参考模型	设计图样、数字模型、名义尺寸、参考截面、参考曲面、测量区域定义	外轮廓测量、点云完整性检查、偏差比对	①数据来源、版本、技术状态、坐标系、测量基准明确; ②必测区域、允许缺失区域及覆盖判定规则有明确规定
3	数据处理设备及软件	工作站、点云处理软件	点云读取、坐标转换、尺寸计算、偏差计算	①具备点云间距与覆盖检查功能; ②软件名称、生产商、版本号及关键处理参数予以记录

8 测量程序

飞机轮廓视觉测试应按以下顺序实施：测试准备→建立全局坐标系→参数标定→测量路径规划→现场数据采集→过程质量控制与补测→点云数据处理→测量结果计算。每一环节均应形成相应检查记录或输出结果，通过后方可进入下一环节。总体流程见表 8。

表 8 飞机轮廓测试流程

步骤	流程环节	对应章节	主要工作内容
1	测试准备	8.1	确认测试任务，完成设备、被测对象和环境条件检查
2	建立全局坐标系	8.2	布置光学基准组网，建立并验证全局坐标系
3	参数标定	8.3	确认相机内参、相机间位姿标定等参数有效性，进行试采集
4	测量路径规划	8.4	规划测量位置、姿态、采集顺序和补测位置
5	现场数据采集	8.5	逐站位同步采集位姿参数、原始图像和局部点云

6	过程质量控制与补测	8.6	离场前质量检查，对缺失或异常数据进行补测
7	点云数据处理	8.7	坐标转换、滤波去噪、离群点剔除
8	测量结果计算	8.8	轮廓尺寸计算及轮廓与形面偏差表征

各流程环节均应遵循“执行-检查-记录-通过后进入下一环节”的闭环原则。任一环节检查不合格时，应完成处置并重新检查，未经确认不得进入下一环节；发生影响已完成环节有效性的异常时，应回退至相应环节重新确认。

8.1 测试准备

8.1.1 测试任务确认

测试前应确认飞机或部件的名称、型号、编号、技术状态和支撑状态，并明确测试目的、项目、区域、必测部位、坐标系、测量基准、参考数据版本、技术指标和结果表达要求。

实施前应选择测量系统和标准器，确定现场条件、测量路径、采集参数、数据命名存储、质量控制、补测、安全和人员分工要求；多设备协同时确认时间同步、坐标转换和数据对应关系。方案确认后方可实施，变更应记录并重新确认受影响步骤。

测试人员应经过设备操作和应急处理培训。现场应设置警示区域，运载模块运行范围内不得有人；登高作业按安全规定执行。测量期间不得启动发动机、移动飞机或开关舱门。

8.1.2 测试前检查

测试前应完成设备、被测对象和环境条件的综合检查。设备检查按设备说明书完成安装、上电、预热、自检和状态检查，确认校准有效、连接件和辅助系统可靠、采集触发与时间同步正常、软件版本受控，并记录表 9 所列设备及软件信息；被测对象检查按 8.1.3 要求执行；环境条件检查按第 6 章要求执行。上述三类检查均合格后方可进入全局坐标系建立和参数标定环节。

表 9 测试前设备检查表

序号	记录项目	具体内容
1	设备信息	生产商、型号、编号、校准状态
2	软件信息	名称、版本号
3	成像参数	照明类型、照明亮度、曝光时间
4	传感器参数	测量范围、传感器类型、传感器数量
5	扫描参数	点云融合分辨率
6	处理参数	点云滤波、异常点剔除参数；点剔除比例、特征提

		取方法、拟合算法
7	基准信息	坐标系、测量基准、设计数据或参考模型版本

不得随意更改关键设备或软件参数；确需更改时，应记录原因、内容和时间，并确认更改前后数据一致。

被测对象应处于任务规定的装配、支撑、停放或载荷状态；测量前确认型号、编号、技术状态、姿态、支撑状态及舱门、活动面和可拆卸部件状态。

测量前应处理影响成像、特征提取或点云质量的遮挡、污渍、积水、强反射和附着物；不能处理时记录位置、范围及影响。测量中不得改变对象位置、姿态、载荷或结构状态。

按第 6 章检查并记录环境条件，清除影响成像、点云采集或安全的障碍物；超出常规控制要求时，应按第 6 章相应条款采取措施并重新核查。重新核查不合格时不得开始正式测试。

8.2 建立全局坐标系

8.2.1 组网布置

根据飞机型号、测量范围、遮挡条件和设备视场确定编码标志点的数量、分布和可见性要求。编码标志点宜布置在稳固载体上，在位姿跟踪测量设备有效视场内均匀分布。

编码标志点按编码方式分为环形编码标志点和点分布型编码标志点两类（定义见 3.4）。环形编码标志点典型规格为方形底板边长 40 mm～50 mm，中心圆点直径 5 mm～8 mm，外圈编码带外径 10 mm～30 mm；点分布型编码标志点典型规格为底板边长 40 mm～60 mm，单个圆点直径 3 mm～6 mm。大尺寸测量场景，环形编码标志点外圈编码带外径不宜小于 20 mm，点分布型编码标志点整体底板边长不宜小于 50 mm。标志点表面宜采用高反光涂层，底衬宜为黑色哑光材料；按材质可分为磁性橡胶编码点、不干胶编码点和硬质编码靶标。编码标志点应具有足够的唯一编码数量，大尺寸测量场景不宜少于 100 种，以保证各站位标志点识别的唯一性和匹配可靠性。

编码标志点的间距和尺寸应与测量距离、相机分辨率及视场范围相匹配：大尺寸测量场景下，相邻编码标志点中心间距宜为 0.5 m～2 m，高曲率、遮挡复杂或位姿解算精度要求高的区域宜适当加密；标志点尺寸应保证在最远测量距离处成像直径不小于 30 像素，相邻标志点中心间距不宜小于标志点外径的 3 倍；标志点距载体边缘不宜小于其外径的 2 倍，粘贴应平整、无气泡、无褶皱。

组网布置时，应在测量区域内布置经校准的标准杆（或长度标准器），用于恢复全局坐标系尺度。标准杆数量不宜少于 2 根，宜布置在不同方向和位置，长度应覆盖测量范围的典型尺度；标准杆应稳固放置，避免遮挡、振动和热变形影响。标准杆宜采用碳纤维、因瓦合金等低热膨胀系数材料，热膨胀系数不

宜大于 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。建立全局坐标系后，应测量各标准杆的参考长度并与校准值比对，尺度一致性应满足 8.2.2 的要求。标准杆编号、校准值、布置位置、环境温度和比对结果均应记录。

编码标志点组网布置应遵循表 10 中的原则：

表 10 编码标志点组网布置要求

序号	内容
1	覆盖全部计划测量位置；
2	每站位可识别标志点数应满足位姿解算要求，宜配置冗余；
3	相邻站位宜具有共同可见标志点，保持全局坐标系连续；
4	不宜过度集中和分散，合适的距离为 0.5 m~2 m；
5	避开容易遮挡、移动或产生强反射的位置。

8.2.2 坐标系建立与验证

组网布置完成后，将标准杆纳入测量范围，采用位姿跟踪测量设备对标志点和标准杆进行全局测量，建立全局坐标系。坐标系建立后，应检查标志点坐标、识别质量和位姿解算稳定性。

全局坐标系建立采用自标定光束法平差方法，将相机内参数、镜头畸变参数与各站位姿、标志点三维坐标联合求解，以提高坐标解算精度；采用该方法时，应保证足够的像片交会角和标准杆尺度约束，避免参数相关性导致的解不稳定。

坐标系建立的具体操作要求如下：

8.2.2.1 位姿跟踪测量设备应从多个站位对编码标志点和标准杆进行拍摄，每个编码标志点至少应在 2 个以上站位被清晰拍摄到，相邻拍摄站位对标志点的交会角不宜小于 30° ；

8.2.2.2 拍摄站位数量应根据测量范围确定，大尺寸测量场景不宜少于 10 个站位，站位应均匀分布在测量区域周围，避免集中在单一方向；

8.2.2.3 每站位拍摄前应确认设备稳定、标志点清晰可辨，拍摄后应立即检查标志点识别数量和质量；

8.2.2.4 坐标系解算完成后，应检查各标志点的重投影误差，重投影误差不宜大于 0.5 个像素，超过时应排查拍摄质量或标志点布置问题并重新解算。

测量开始前、测量过程中和测量结束后，均应检查组网状态。组网受到碰撞、位移或遮挡变化后，应重新建立或验证。

全局坐标系建立后，应采用标准球杆或经校准的长度标准器对坐标系尺度精度进行验证，长度测量偏差不宜大于 0.02 mm/m；在测量区域内选择不少于 3 个稳定控制点进行重复性检查，连续测量不少于 5 次，其标准偏差不宜大于 0.05

mm。坐标系解算结果应输出各标志点三维坐标的均方根误差（RMS），X、Y、Z 方向 RMS 均不宜大于 0.05 mm；多根标准杆的长度测量值与校准值的一致性偏差不宜大于 0.02 mm/m。上述验证结果及原始数据应保存；任一项不满足要求时，应排查组网布置、成像质量或尺度约束并重新解算和验证，验证未通过不得进入 8.3 参数标定。

8.3 参数标定

参数标定应在正式测量前完成，确认测量系统各参数有效后方可开展数据采集。参数标定的定义见 3.3 节，技术要求见 7.2 节表 5。

8.3.1 相机参数有效性确认。确认相机成像模型和镜头畸变参数处于有效状态，必要时重新标定；可采用有效期内的实验室标定结果或 8.2.2 的现场自标定结果。

8.3.2 相对位姿标定。位姿跟踪测量设备与三维视觉测量设备的相对位姿参数应在测试前标定并保持稳定，连接件拆装、松动或受冲击后应重新标定。相机间位姿标定操作要点如下：

- a) 应采用经校准的标定球、标定板或标准杆作为标定物；
- b) 标定物应在三维视觉测量设备和位姿跟踪测量设备的共同视场内，采集不少于 10 组不同位姿下的标定数据，各组位姿应覆盖测量区域内典型的位置和姿态范围，避免位姿集中在单一平面或单一方向；
- c) 每组数据采集时应保证设备稳定、标定物清晰，采集后应检查标定物识别质量；
- d) 标定完成后应计算标定残差，并保存标定原始数据、标定结果和残差统计；残差应满足设备说明书规定，不满足时应重新采集数据并标定。

8.3.3 任务参数配置。载入受控的任务配置、设计数据或参考模型，设置采集参数、坐标系、数据命名和存储规则，并记录配置版本。

8.3.4 试采集与确认。在代表性部位进行试采集，按 8.5.1.4 检查图像清晰度、标志点识别与位姿解算、局部点云间距和完整性；采用已知标准器时，同时核查尺寸偏差。试采集未通过时，应调整参数或重新标定，直至满足正式采集要求。

标定结果合格判定：满足以下全部要求方可开展正式测量：a) 相机内参重投影误差不大于设备说明书规定值；b) 相机间位姿标定重复性误差不大于测试任务允许误差的 1/5；c) 试采集点云与已知标准器尺寸偏差不大于测试任务允许误差的 1/3。不满足时应重新标定并查明原因。

8.4 测量路径规划

8.4.1 规划原则

按测试区域、设备性能、表面特征、遮挡、运载能力和组网可见性规划测

量路径。

8.4.2 规划步骤

8.4.2.1 测量路径应同时满足相邻站位测量范围重叠和相邻采集位姿点云重叠要求。相邻站位测量范围重叠率为相邻站位理论有效测量范围公共区域占较小有效测量范围的比例，一般宜为 10%~15%，遮挡复杂或覆盖要求较高的区域宜适当提高。相邻采集位姿点云重叠率为相邻采集位姿有效点云公共区域占较小有效点云区域的比例，不宜低于 30%，复杂区域不宜低于 50%。两种重叠率的定义、计算方法和检查结果应在测量方案及报告中说明。

8.4.2.2 相邻局部点云应具有共同区域或共同特征；遮挡、边界、强反射和易缺失区域应预设补测位置或替代方向。

8.4.2.3 检查运载模块运动范围、机械臂可达性、通行空间和安全间隙，并形成路径图、站位编号、采集位姿编号、采集顺序表和预设补测位置。正式测试前应进行一次不采集数据的路径演练或低速试运行，逐站位确认设备视场、编码标志点可见性、机械臂可达性、碰撞风险和安全间隙；演练结果应记录，未通过的站位应调整后重新验证。

8.5 现场数据采集

8.5.1 采集流程

现场数据采集应按测量路径逐站位实施。运载模块到达规定站位后应锁定固定；每个站位内，机械臂携带刚性连接于末端的视觉测量模块，在规划的多个采集位姿下完成扫描。视觉测量模块由位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备组成。

位姿跟踪测量设备直接观测光学基准组网中的编码标志点，提取像点坐标，采用空间后方交会方法实时解算视觉测量模块末端相对于全局坐标系的位姿参数；三维视觉测量设备在相应位姿下采集被测对象表面的原始图像和局部点云数据。

局部点云的坐标转换和全局统一表达，应以位姿跟踪测量设备实时解算的全局位姿及 8.3 确定的相对位姿参数为依据。机械臂关节角度和正运动学结果可用于运动控制、到位判断和状态记录；未经独立验证证明其测量不确定度满足测试任务要求，不得替代位姿跟踪测量结果作为点云坐标转换依据。

每个站位应执行以下步骤：

8.5.1.1 站位到达与固定。总控模块向运载模块下发运动指令，运载模块移动至规定站位并锁定固定。总控模块记录站位编号和到位时间，确认锁定状态反馈正常、设备无异常振动，当前视场可识别编码标志点数量满足表 11 要求且位姿解算连续有效后，方可进入末端位姿运动。

8.5.1.2 末端位姿运动与稳定确认。总控模块按照测量路径向机械臂下发运

动指令，机械臂携带视觉测量模块运动至当前规划采集位姿。机械臂停止运动后，应按设备说明书或试采集确定的稳定等待条件进行确认；等待期间不得触发正式采集。位姿解算结果无异常跳变、视觉测量模块无明显振动或漂移后，记录位姿编号并进入同步采集。

8.5.1.3 同步触发与数据采集。总控模块向位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备同步发出采集触发信号。位姿跟踪测量设备对当前视场内的编码标志点进行成像，提取像点坐标，采用空间后方交会方法实时解算视觉测量模块末端相对于全局坐标系的位姿参数；三维视觉测量设备同时采集当前位姿下的原始图像和局部点云数据。两设备的采集应严格时间同步，同步误差应不大于单帧采集周期的 1/10。

8.5.1.4 数据记录与质量检查。采集完成后，总控模块应记录站位编号、位姿编号、采集序号和时间戳，并建立位姿参数、原始图像和局部点云的一一对应关系。实时质量检查至少包括：a) 每站位可识别标志点数不低于位姿解算算法的最小要求，且一般不少于 4 个；b) 位姿解算有效，解算残差满足设备规定，无明确规定时重投影误差宜不大于 1 个像素；c) 图像无影响识别的过曝、欠曝、模糊或频闪；d) 有效点云间距满足表 11 要求，必测区域不存在未允许的明显缺失；e) 与相邻采集位姿的点云重叠率满足 8.4.2.1。任一项不满足时，应调整采集参数、照明或机械臂位姿后重新采集并复核，通过后方可进入下一采集位姿。

8.5.1.5 多位姿循环采集。当前位姿数据确认合格后，机械臂运动至下一规划采集位姿，重复 8.5.1.2~8.5.1.4，直至完成该站位全部规划位姿的数据采集。每个位姿采集后均应按 8.4.2.1 检查与相邻采集位姿的点云重叠率；不满足时，应增加采集位姿或调整姿态后补采。

8.5.1.6 站位数据保存与转移。该站位全部位姿采集完成并通过质量检查后，总控模块应核对计划位姿清单，确认原始图像、局部点云、位姿参数、采集日志和质量检查结果数量一致、标识关联完整，并按规定命名规则写入存储介质，原始数据不得被覆盖。完成数据完整性检查后，运载模块方可解锁并移动至下一站位。

8.5.1.7 异常处置与恢复。测量过程中发生测量中断、设备状态变化、关键参数更改、编码标志点组网受到碰撞或遮挡变化、机械臂运动异常或位姿解算失效时，应立即暂停采集并记录异常原因、发生时间和当前站位/位姿。按“确定受影响数据范围→核查组网状态→核查设备、通信和时间同步→必要时重新验证全局坐标系或重新标定→重新采集受影响数据→质量检查通过”的顺序恢复。未经恢复确认不得继续测试；重采或补测数据应保留原始异常数据，并采用独立编号建立关联。

8.5.2 采集参数推荐

现场数据采集参数可参照表 11，具体参数应根据设备性能、被测表面特征和测试任务精度要求确定。

表 11 现场数据采集参数

参数	推荐要求	备注
点云融合间距	应满足轮廓特征提取精度要求，宜不大于测试任务允许偏差的 1/5，一般为 0.05 mm~1 mm	高曲率区域、边缘区域应加密
基准工作距离	应处于三维视觉测量设备经标定或校准验证的有效工作距离范围内；采用多种测量模式时，应分别记录对应工作距离	每个站位试采集时确认被测表面处于有效测量范围内
扫描景深	被测表面在当前采集位姿下应处于设备有效景深范围内；宜不小于 150 mm，保证被测表面在有效景深范围内	曲面起伏超出单次有效景深时，应调整位姿或分层采集
扫描速率	宜不低于 100 万点/秒，大尺寸测量宜不低于 300 万点/秒	根据设备性能和测试任务效率要求确定
相邻站位重叠率	一般宜为 10 %~15 %；遮挡复杂或覆盖要求较高的区域宜适当提高	遮挡复杂或覆盖要求较高的区域宜适当提高
每站位可识别标志点数	不少于位姿解算所需最小数（一般不少于 4 个），宜配置冗余	具体最小值依设备算法而定
曝光时间	保证图像无过曝/欠曝，标志点和轮廓边缘清晰	强反射区域调整曝光或加偏振
采集顺序	按路径规划编号依次进行，避免遗漏	补测单独编号并记录原因

8.5.3 数据保存

保存原始图像、局部点云、位姿参数、采集日志、质量检查结果、异常和补测记录，原始数据不得覆盖。离开现场前应按站位和位姿清单完成数据完整性校验，并至少形成一份独立备份；发现文件缺失、损坏或无法读取时，应在离场前完成补采或处置。

原始图像、局部点云、位姿参数、中间数据、处理结果和报告应通过唯一标识关联。

8.6 测量过程质量控制与补测

8.6.1 离场前质量检查

离开测量现场前，应至少完成表 12 所列质量检查。离场前质量检查侧重全局完整性和数据对应关系，与 8.5.1 中的实时质量检查（侧重单帧数据质量）形成互补。

表 12 离场前质量检查清单

序号	检查项	要求	检查方法
1	组网状态	标志点无位移或遮挡变化；抽查稳定控制点和标准杆，前后验证结果满足 8.2.2 要求	测量前后比对控制点坐标、标准杆长度和位姿解算状态
2	区域覆盖	必测区域无明显缺失，相邻站位重叠满足要求 8.4.2.1	点云覆盖统计与可视化检查，并与必测区域及允许缺失区域定义比对
3	数据对应关系	站位、位姿参数、原始图像和局部点云应 100 % 建立对应关系，不得存在无编号或缺失文件	按站位/位姿清单核对文件数量、唯一标识和时间戳
4	点云质量	无明显坐标错位、坐标不一致、结果漂移	坐标转换初步检查
5	系统性能	尺寸测量误差与重复性、坐标一致性和覆盖完整性满足表 6 及测试任务规定	采用几何标准器或参考对象，按测试方案规定的次数和指标实施并记录

8.6.2 补测规则

8.6.2.1 补测触发。发现必测区域缺失、标志点识别异常、位姿无效、点云间距或重叠率不满足要求、坐标转换不一致时，应实施补测；组网移动、设备相对位姿变化或设备状态异常时，应先重新验证全局坐标系或重新标定，再确定补测范围。

8.6.2.2 补测实施。补测应优先回到原站位和原采集位姿，并采用与原数据一致的受控参数；因遮挡或表面条件需要改变位姿、照明或采集参数时，应记录变更内容和原因。补测数据应单独编号并与原缺失或异常区域建立关联。

8.6.2.3 补测复核。补测完成后，应重新执行 8.5.1.4 的单帧质量检查和表 12 的离场前质量检查，并更新站位/位姿清单、覆盖率统计和异常处置记录；复核通过后方可结束现场测试。

8.6.2.4 无法补测的处置。因结构遮挡、现场条件或安全原因无法补测时，

应记录缺失位置、范围、原因及对结果的影响，并按适用技术文件判断该区域数据是否可接受；不得将无法补测的缺失区域作为正常有效数据处理，相关说明应纳入测量报告。

8.7 点云数据处理

点云处理按数据校验、坐标转换、必要的滤波/去噪和离群点处理、结果检查顺序进行，并保存原始数据、中间数据、处理参数和软件版本。

8.7.1 数据校验

校验数据格式、文件命名、单位、坐标系、测量位置编号及位姿参数与局部点云的对应关系，原始数据不得覆盖。

8.7.2 坐标转换

依据位姿参数将各位置局部点云转换至全局坐标系，记录变换矩阵、方向和单位；位姿解算按编码标志点像点坐标与全局坐标的对应关系进行。

8.7.3 点云滤波与去噪

噪声、重复点、密度差异、孤立点或局部缺失影响计算时，可进行采样、滤波、插值或网格化处理。方法和参数应按测试任务确认，不得删除有效轮廓边界和局部特征。

8.7.4 离群点剔除

离群点应依据空间邻域、统计阈值或成像质量信息判定，不得仅按相对设计模型的偏差剔除。离群点剔除后应抽查边缘、高曲率、强反射和遮挡区域，记录剔除点数量、比例、主要区域及判定参数；发现有效特征被误删时，应回退至原始数据并调整参数重新处理。

8.7.5 处理结果检查

处理完成后形成全局飞机轮廓点云，检查坐标一致性、全局连续性、点云完整性和记录可追溯性。处理结果检查侧重数据处理质量和全局一致性，与采集阶段的质量检查（8.5.1、8.6.1）侧重点不同。

8.8 测量结果计算

测量结果应根据第 5 章规定的测试项目，由经处理的全局飞机轮廓点云计算获得。计算所用坐标系、测量基准、参考对象、特征提取或拟合方法、计算参数和软件版本应予以记录。

8.8.1 轮廓尺寸计算

按测试任务明确被测部位、尺寸定义、起止位置、计算方向和结果表达方式；从规定点云中提取特征并按规定几何关系计算尺寸。结果给出项目、测量值、单位和必要的拟合信息；有标称值、允许偏差和判定规则时，同时给出偏差和判定结果。

8.8.2 轮廓与形面偏差表征

8.8.2.1 采用受控的设计数据、参考截面、参考曲面或参考模型，明确版本、技术状态、坐标系、对齐基准和适用区域；优先按设计或装配基准对齐，采用最佳拟合时规定拟合区域、约束和终止条件。

8.8.2.3 轮廓偏差在规定站位、截面或投影平面内计算；形面偏差可采用法向距离、最短距离或规定坐标方向分量，采用有符号偏差时规定正负方向。

8.8.2.3 结果可用最大正/负偏差、平均偏差、均方根值、分位值、超差区域比例、偏差曲线或云图表征；合格判定按测试任务和适用技术文件执行。

测量不确定度评定按 JJF 1059.1—2012 进行。点云坐标转换不确定度评定示例参见附录 B。外形尺寸、轮廓与形面偏差等最终测量结果的不确定度，应在坐标转换不确定度基础上，综合考虑点云采样间距、特征提取方法、数据处理算法及环境条件等引入的附加不确定度分量进行评定。

表 13 测量结果记录表

记录项	记录内容	记录要求	格式
测量基本信息	日期、地点、人员、环境条件	完整、准确	表格形式
设备信息	设备型号、编号、校准状态	可追溯	表格形式
测量参数	采集参数、处理参数	参数值+设置依据	表格形式
测量结果	尺寸、偏差、点云统计	数值+单位+不确定度	表格+图形
质量检查	各项检查结果	合格/不合格+数值	检查表
异常说明	缺失、异常、处理措施	详细说明	文字描述

9 测量报告

测量结果应以清晰、完整、准确、可追溯的形式表达，至少包括表 14 所列信息。

表 14 测量报告内容要求

序号	内容
1	标题，如“测量报告”；
2	出具测量结果的机构名称和地址；
3	报告的唯一性标识、页码及总页数；
4	委托方名称和相关信息；
5	待测飞机或被测部件的名称、型号、编号和状态描述；

6	本次测量所依据的技术文件；
7	测量日期、测量地点和测量环境条件；
8	测量系统、测量标准及辅助设备的名称、型号、编号、校准状态和溯源信息；
9	测试方案、测量坐标系、测量基准、测量区域、测量路径、覆盖要求及补测信息；
10	点云采集和处理参数，包括点间距、曝光时间、坐标转换、采样、滤波、离群点剔除、特征提取或拟合方法，以及测量软件生产商和版本号；
11	轮廓尺寸、轮廓与形面偏差等测量结果，以及测试任务要求的過程质量控制、点云间距、覆盖完整性和补测结果；
12	测量不确定度。需要报告时，应给出被测量定义和测量模型、不确定度来源、输入量的标准不确定度及评定方法、灵敏系数、相关性、合成标准不确定度、扩展不确定度、包含因子和测量结果；根据用途不报告测量不确定度时，应说明依据；
13	测量人员、复核人员和批准人员的姓名或等效标识；
14	测量结果仅对本次测量对象和规定测量条件有效的声明；
15	未经出具机构批准，不得部分复制报告的声明。

飞机轮廓点云展示图、偏差云图、测量区域示意图和必要的原始数据索引可作为测量结果的附图或附件。

测量报告按“确定框架—填写信息—整理结果—质量审核—批准签发”编制，基本信息、设备、环境、参数、结果、质量检查 and 不确定度数据应完整，测量、复核和批准人员签字后生效。

结果应给出测量值、扩展不确定度和单位，数值修约与不确定度匹配；偏差结果注明参考对象和对齐基准，云图标注色彩范围、单位和图例，点云统计给出点数、平均间距和覆盖率，重复性给出标准偏差和测量次数。

测量报告质量检查的具体内容见表 15。

表 15 测量报告质量检查表

检查项	检查内容	合格标准
完整性	必要信息是否齐全	必填内容完整
准确性	数据计算是否正确	无计算错误
一致性	结果与方法是否对应	逻辑一致
可追溯性	设备、环境、参数是否可追溯	信息完整
规范性	格式、单位、符号是否规范	符合标准

清晰度	表述是否清晰、图表是否清楚	易于理解
-----	---------------	------

附录 A

资料性 /informative 附录

A.1 方向余弦矩阵 direction cosine matrix

用来描述坐标系 {B} 相对于参考坐标系 {A} 姿态的 3×3 矩阵；矩阵各元素为坐标系 {B} 各坐标轴单位矢量在参考坐标系 {A} 坐标轴上投影的方向余弦。

符号： ${}^A_B R$ ，表示 {B} 相对于 {A} 的方向余弦矩阵。

数学性质：正交矩阵， ${}^A_B R^T {}^A_B R = I$ ， $\det({}^A_B R) = +1$ 。

A.2 位置矢量 position vector

坐标系 {B} 的原点，在参考坐标系 {A} 下表达的三维列矢量，表征两坐标系原点之间的偏移。

符号： ${}^A P_{Borg}$ 。

A.3 齐次变换矩阵 homogeneous transformation matrix

将方向余弦矩阵与位置矢量组合为 4×4 矩阵，完整描述坐标系 {B} 相对参考坐标系 {A} 的刚体位姿（姿态 + 原点偏移）。

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A P_{Borg} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

坐标变换关系：

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{Borg}$$

${}^A P$ ：点 P 在 {A} 系坐标； ${}^B P$ ：点 P 在 {B} 系坐标。

附录 B

点云坐标转换不确定度评定示例

B.1 测量方法

点云坐标转换应按本规范第 8 章规定的方法进行;测量不确定度评定应符合 JJF 1059.1-2012 的规定。

B.2 测量设备及其技术性能

本示例所用与点云坐标转换相关的测量设备及其技术性能见表 B.1。

表 B.1 测量设备及其技术性能汇总表

序号	测量设备	技术性能
1	三维视觉测量设备	体积测量最大允许误差: $0.015\text{mm} + 0.012\text{mm} / \text{m}$
2	位姿跟踪测量设备	角度测量最大允许误差: $\pm 1''$ 距离测量最大允许误差: $\pm (0.005\text{mm} + 0.005\text{mm} / \text{m} \cdot L)$
备注	a) 测量设备的技术性能依据校准证书或技术文件确定; b) 表中标称长度用“ L ”表示。	

B.3 测量模型及其输入量与输出量

B.3.1 点云坐标转换模型

根据测量原理和坐标转换关系,点云数据中单个三维点在全局坐标系下的测量模型按式(B.1)表示。

$$P = R^C (R^S P^S + t^S) \quad (\text{B.1})$$

式中:

P —三维点在全局坐标系下的三维坐标;

P^S —三维点在三维视觉测量设备坐标系下的三维坐标;

R^S —三维视觉测量设备到位姿跟踪测量设备标定位姿的旋转矩阵;

t^S —三维视觉测量设备到位姿跟踪测量设备标定位姿的平移向量;

R^C —位姿跟踪测量设备到全局坐标系位姿的旋转矩阵;

t^C —位姿跟踪测量设备到全局坐标系位姿的平移向量。

B.3.2 点云坐标转换输入量

点云坐标转换输入量见表 B.2。

表 B.2 点云坐标转换输入量汇总表

序号	输入量描述	输入量符号	单位
1	P^S 的 x 轴坐标分量	X^S	mm
2	P^S 的 y 轴坐标分量	Y^S	mm
3	P^S 的 z 轴坐标分量	Z^S	mm
4	R^C 的绕 x 轴旋转角度	ω^C	°
5	R^C 的绕 y 轴旋转角度	φ^C	°
6	R^C 的绕 z 轴旋转角度	κ^C	°
7	t^C 的 x 轴平移分量	t_1^C	mm
8	t^C 的 y 轴平移分量	t_2^C	mm
9	t^C 的 z 轴平移分量	t_3^C	mm

B.3.3 点云坐标转换输出量

点云坐标转换输出量见表 B.3。

表 B.3 点云坐标转换输出量汇总表

序号	输出量描述	输出量符号	单位
1	P 的 x 轴坐标分量	X	mm
2	P 的 y 轴坐标分量	Y	mm
3	P 的 z 轴坐标分量	Z	mm

B.3.4 其他量值说明

R^S 和 t^S 均为测量前标定得到的相对位姿参数。本示例在其稳定且标定不确定度相对于主要不确定度分量可忽略时按常量处理；不能忽略时，应作为输入量纳入测量不确定度评定。

将相对位姿参数按常量处理时，应给出校准状态、稳定性证据和可忽略性判断依据；对输出量贡献不可忽略时，应在不确定度预算中列出相应分量。

B.4 不确定度来源

B.4.1 三维坐标引入的不确定度

三维视觉测量设备输出的三维点坐标 P^S 存在不确定度，其不确定度由坐标分量 X^S 、 Y^S 与 Z^S 分别引入。

B.4.2 旋转角度引入的不确定度

位姿跟踪测量设备输出的旋转矩阵 $\mathbf{R}^C$ 存在不确定度。 $\mathbf{R}^C$ 为三轴旋转角度的函数， $\mathbf{R}^C$ 的不确定度由 ω^C 、 φ^C 与 κ^C 分别引入。

B.4.3 平移分量引入的不确定度

位姿跟踪测量设备输出的平移向量 $\mathbf{t}^C$ 存在不确定度，其不确定度由平移分量 t_1^C 、 t_2^C 与 t_3^C 分别引入。

B.5 输入量的标准不确定度

B.5.1 三维坐标的标准不确定度

三维坐标输入量的标准不确定度应综合考虑三维视觉测量设备校准结果或技术性能指标、测量重复性和环境条件的影响。本示例采用三维视觉测量设备校准证书或技术文件给出的体积测量最大允许误差为 $0.015\text{mm} + 0.012\text{mm/m}$ ，对应的距离测量最大允许误差 $\text{MPE}_1 = \pm(0.015\text{mm} + 0.012\text{mm/m} \cdot L)$ ，折算为坐标分量测量最大允许误差为 $\text{MPE}_1 / \sqrt{3}$ 。假设坐标分量测量误差服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ，坐标分量的标准不确定度按式(B.2)计算。

$$u(X^S) = u(Y^S) = u(Z^S) = |\text{MPE}_1| / 3 = (0.005 + 0.004L) \text{ mm} \quad (\text{B.2})$$

B.5.2 旋转角度的标准不确定度

旋转角度输入量的标准不确定度应综合考虑位姿跟踪测量设备校准结果或技术性能指标、测量重复性和环境条件的影响。本示例采用位姿跟踪测量设备校准证书或技术文件给出的角度测量最大允许误差为 $\text{MPE}_2 = \pm 1 \text{ ii}$ 。假设旋转角度测量误差服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ，位姿跟踪测量设备到全局坐标系位姿的旋转角度标准不确定度按式(B.3)计算。

$$u(\omega^C) = u(\varphi^C) = u(\kappa^C) = |\text{MPE}_2| / \sqrt{3} = 0.57 \text{ ii} \pm 0.000158^\circ \quad (\text{B.3})$$

B.5.3 平移分量的标准不确定度

平移分量输入量的标准不确定度应综合考虑位姿跟踪测量设备校准结果或技术性能指标、测量重复性和环境条件的影响。本示例采用位姿跟踪测量设备校准证书或技术文件给出的距离测量最大允许误差为 $\text{MPE}_3 = \pm(0.005\text{mm} + 0.005\text{mm/m} \cdot L)$ ，折算为平移分量测量最大允许误差为 $\text{MPE}_3 / \sqrt{3}$ 。假设平移分量测量误差服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ，位姿跟踪测量设备到全局坐标系

位姿的平移分量标准不确定度按式(B.4)计算。

$$u(t_1^C) = u(t_2^C) = u(t_3^C) = |\text{MPE}_3|/3 = (0.00167 + 0.00167L) \text{ mm} \quad (\text{B.4})$$

B.6 灵敏系数

为计算输出量相对于各输入量的灵敏系数，测量模型可改写为式(B.5)。

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_\varphi^C \mathbf{R}_\omega^C \mathbf{R}_\kappa^C (\mathbf{R}^S \mathbf{P}^S + \mathbf{t}^S) + \mathbf{t}^C \quad (\text{B.5})$$

式中：

$$\mathbf{R}_\omega^C \text{—将 } \mathbf{R}^C \text{ 分解后得到的绕 } x \text{ 轴旋转矩阵，具体为 } \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega^C & -\sin \omega^C \\ 0 & \sin \omega^C & \cos \omega^C \end{pmatrix} ;$$

$$\mathbf{R}_\varphi^C \text{—将 } \mathbf{R}^C \text{ 分解后得到的绕 } y \text{ 轴旋转矩阵，具体为 } \begin{pmatrix} \cos \varphi^C & 0 & -\sin \varphi^C \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi^C & 0 & \cos \varphi^C \end{pmatrix} ;$$

$$\mathbf{R}_\kappa^C \text{—将 } \mathbf{R}^C \text{ 分解后得到的绕 } z \text{ 轴旋转矩阵，具体为 } \begin{pmatrix} \cos \kappa^C & -\sin \kappa^C & 0 \\ \sin \kappa^C & \cos \kappa^C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} .$$

B.6.1 三维坐标的灵敏系数

输出量相对于三维坐标输入量的灵敏系数按式(B.6)计算。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_1(X)}{\partial X^S} \quad \frac{\partial c_1(Y)}{\partial Y^S} \quad \frac{\partial c_1(Z)}{\partial Z^S} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{X}^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \frac{\partial \mathbf{P}^S}{\partial X^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \frac{\partial c_2(X)}{\partial X^S} \quad \frac{\partial c_2(Y)}{\partial Y^S} \quad \frac{\partial c_2(Z)}{\partial Z^S} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial Y^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \frac{\partial \mathbf{P}^S}{\partial Y^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \frac{\partial c_3(X)}{\partial X^S} \quad \frac{\partial c_3(Y)}{\partial Y^S} \quad \frac{\partial c_3(Z)}{\partial Z^S} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial Z^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \frac{\partial \mathbf{P}^S}{\partial Z^S} = \mathbf{R}^C \mathbf{R}^S \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

B.6.2 旋转角度的灵敏系数

输出量相对于旋转角度输入量的灵敏系数按式(B.7)计算。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_4(X)}{\partial \omega^C} \quad \frac{\partial c_4(Y)}{\partial \omega^C} \quad \frac{\partial c_4(Z)}{\partial \omega^C} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \omega^C} = \mathbf{R}_\varphi^C \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\sin \omega^C & -\cos \omega^C & 0 \\ \cos \omega^C & -\sin \omega^C & 0 \end{pmatrix} \mathbf{R}_\kappa^C (\mathbf{R}^S \mathbf{P}^S + \mathbf{t}^S) \\ \frac{\partial c_5(X)}{\partial \varphi^C} \quad \frac{\partial c_5(Y)}{\partial \varphi^C} \quad \frac{\partial c_5(Z)}{\partial \varphi^C} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \varphi^C} = \begin{pmatrix} \sin \varphi^C & 0 & -\cos \varphi^C \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos \varphi^C & 0 & -\sin \varphi^C \end{pmatrix} (\mathbf{R}_\varphi^C)^{-1} \mathbf{R}^C (\mathbf{R}^S \mathbf{P}^S + \mathbf{t}^S) \\ \frac{\partial c_6(X)}{\partial \kappa^C} \quad \frac{\partial c_6(Y)}{\partial \kappa^C} \quad \frac{\partial c_6(Z)}{\partial \kappa^C} &= \mathbf{R}^C (\mathbf{R}_\kappa^C)^{-1} \begin{pmatrix} \sin \kappa^C & -\cos \kappa^C & 0 \\ \cos \kappa^C & -\sin \kappa^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (\mathbf{R}^S \mathbf{P}^S + \mathbf{t}^S) \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

B.6.3 平移分量的灵敏系数

输出量相对于平移分量输入量的灵敏系数按式(B.8)计算。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_7(X)}{\partial t_1^C} &= \frac{\partial c_7(Y)}{\partial t_1^C} = \frac{\partial c_7(Z)}{\partial t_1^C} = \frac{\partial P}{\partial t_1^C} = [1 \ 0 \ 0]^T \\ \frac{\partial c_8(X)}{\partial t_2^C} &= \frac{\partial c_8(Y)}{\partial t_2^C} = \frac{\partial c_8(Z)}{\partial t_2^C} = \frac{\partial P}{\partial t_2^C} = [0 \ 1 \ 0]^T \\ \frac{\partial c_9(X)}{\partial t_3^C} &= \frac{\partial c_9(Y)}{\partial t_3^C} = \frac{\partial c_9(Z)}{\partial t_3^C} = \frac{\partial P}{\partial t_3^C} = [0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned} \quad (B.8)$$

B.7 输出量的不确定度分量

B.7.1 三维坐标引入的不确定度分量

由三维坐标输入量引入的输出量不确定度分量按式(B.9)计算。

$$\begin{aligned} u_1(X) &= |c_1(X)|u(X^S), u_1(Y) = |c_1(Y)|u(X^S), u_1(Z) = |c_1(Z)|u(X^S) \\ u_2(X) &= |c_2(X)|u(Y^S), u_2(Y) = |c_2(Y)|u(Y^S), u_2(Z) = |c_2(Z)|u(Y^S) \\ u_3(X) &= |c_3(X)|u(Z^S), u_3(Y) = |c_3(Y)|u(Z^S), u_3(Z) = |c_3(Z)|u(Z^S) \end{aligned} \quad (B.9)$$

B.7.2 旋转角度引入的不确定度分量

由旋转角度输入量引入的输出量不确定度分量按式(B.10)计算。

$$\begin{aligned} u_4(X) &= |c_4(X)|u(\omega^C), u_4(Y) = |c_4(Y)|u(\omega^C), u_4(Z) = |c_4(Z)|u(\omega^C) \\ u_5(X) &= |c_5(X)|u(\varphi^C), u_5(Y) = |c_5(Y)|u(\varphi^C), u_5(Z) = |c_5(Z)|u(\varphi^C) \\ u_6(X) &= |c_6(X)|u(\kappa^C), u_6(Y) = |c_6(Y)|u(\kappa^C), u_6(Z) = |c_6(Z)|u(\kappa^C) \end{aligned} \quad (B.10)$$

B.7.3 平移分量引入的不确定度分量

由平移分量输入量引入的输出量不确定度分量按式(B.11)计算。

$$\begin{aligned} u_7(X) &= |c_7(X)|u(t_1^C), u_7(Y) = |c_7(Y)|u(t_1^C), u_7(Z) = |c_7(Z)|u(t_1^C) \\ u_8(X) &= |c_8(X)|u(t_2^C), u_8(Y) = |c_8(Y)|u(t_2^C), u_8(Z) = |c_8(Z)|u(t_2^C) \\ u_9(X) &= |c_9(X)|u(t_3^C), u_9(Y) = |c_9(Y)|u(t_3^C), u_9(Z) = |c_9(Z)|u(t_3^C) \end{aligned} \quad (B.11)$$

B.8 合成标准不确定度

在各输入量互不相关的条件下，输出量的合成标准不确定度按式(B.12)计算；输入量之间存在显著相关性时，应计及协方差项。

$$u_c(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(X)}, u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(Y)}, u_c(Z) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(Z)} \quad (B.12)$$

B.9 扩展不确定度

本示例取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 U 按式(B.13)计算；采用其他包含因子时，应说明其确定方法。

$$U(X) = 2u_c(X), U(Y) = 2u_c(Y), U(Z) = 2u_c(Z) \quad (\text{B.13})$$

B.10 点云数据估计值及其测量不确定度

根据表 B.4 给出的测量值，计算点云数据中单个三维点的估计值和测量不确定度。

表 B.4 参数测量值汇总表

序号	参数	测量值
1	$\boldsymbol{P}^S$	$[-12.180 \ 162.313 \ 396.013]^T$ (mm)
2	$\boldsymbol{R}^S$	$\begin{bmatrix} 0.999 & -0.004 & -0.005 \\ 0.004 & 0.999 & 0.006 \\ 0.005 & -0.006 & 0.999 \end{bmatrix}$
3	$\boldsymbol{t}^S$	$[-17.098 \ 112.896 \ -119.633]^T$ (mm)
4	ω^C	35.711°
5	φ^C	27.984°
6	κ^C	44.263°
7	$\boldsymbol{t}^C$	$[-1134.271 \ 40123.113 \ 207.830]^T$ (mm)

B.10.1 点云数据估计值

根据表 B.4 给出的测量值，点云数据中单个三维点的估计值按式(B.14)计算。

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{P} &= \begin{bmatrix} 0.441 & -0.812 & -0.381 \\ 0.566 & 0.581 & -0.583 \\ 0.695 & 0.041 & 0.717 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.999 & -0.004 & -0.005 \\ 0.004 & 0.999 & 0.006 \\ 0.005 & -0.006 & 0.999 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 12.180 \\ 162.313 \\ 396.013 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 17.098 \\ 112.896 \\ 119.633 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1134.271 \\ 40123.113 \\ 207.830 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -1478.917 \\ 40105.514 \\ 394.327 \end{bmatrix} \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

(B.14)

输出量估计值见表 B.5。

表 B.5 输出量估计值汇总表

序号	输出量	估计值/mm
1	X	-1478.917
2	Y	40105.514
3	Z	394.327

B.10.2 输入量的标准不确定度

根据表 B.4 给出的测量值，计算各输入量的标准不确定度。

B.10.2.1 三维坐标的标准不确定度

坐标输入量的标准不确定度按式(B.15)计算。

$$\begin{aligned} \dot{\ddot{\ddot{u}}}(X^S) &= (0.005 + 0.004' \cdot 12.180/1000) \text{ mm} = 0.005 \text{ mm} \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(Y^S) &= (0.005 + 0.004' \cdot 162.313/1000) \text{ mm} = 0.005 \text{ mm} \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(Z^S) &= (0.005 + 0.004' \cdot 12.180/1000) \text{ mm} = 0.006 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

B.10.2.2 旋转角度的标准不确定度

旋转角度输入量的标准不确定度按式(B.16)计算。

$$\begin{aligned} \dot{\ddot{\ddot{u}}}(\omega^C) &= 0.00016^\circ \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(\varphi^C) &= 0.00016^\circ \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(\kappa^C) &= 0.00016^\circ \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

B.10.2.3 平移分量的标准不确定度

平移分量输入量的标准不确定度按式(B.17)计算。

$$\begin{aligned} \dot{\ddot{\ddot{u}}}(t_1^C) &= (0.00167 + 0.00167' \cdot 1134.271/1000) \text{ mm} = 0.003 \text{ mm} \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(t_2^C) &= (0.00167 + 0.00167' \cdot 40123.113/1000) \text{ mm} = 0.068 \text{ mm} \\ \dot{\ddot{\ddot{u}}}(t_3^C) &= (0.00167 + 0.00167' \cdot 207.830/1000) \text{ mm} = 0.002 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

输入量标准不确定度见表 B.6。

表 B.6 输入量标准不确定度值汇总表

序号	输入量	标准不确定度符号	包含因子	标准不确定度的值
1	X^S	$u(X^S)$	$\sqrt{3}$	0.005 mm
2	Y^S	$u(Y^S)$	$\sqrt{3}$	0.005 mm
3	Z^S	$u(Z^S)$	$\sqrt{3}$	0.006 mm
4	ω^C	$u(\omega^C)$	$\sqrt{3}$	0.00016°
5	φ^C	$u(\varphi^C)$	$\sqrt{3}$	0.00016°
6	κ^C	$u(\kappa^C)$	$\sqrt{3}$	0.00016°
7	t_1^C	$u(t_1^C)$	$\sqrt{3}$	0.003 mm

8	t_2^C	$u(t_2^C)$	$\sqrt{3}$	0.068 mm
9	t_3^C	$u(t_3^C)$	$\sqrt{3}$	0.002 mm

B.10.3 灵敏系数

根据表 B.4 给出的测量值，计算输出量相对于各输入量的灵敏系数。

B.10.3.1 三维坐标的灵敏系数

输出量相对于三维坐标输入量的灵敏系数按式(B.18)计算。

$$\begin{aligned}
 R^c &= R_{\varphi}^c * R_{\omega}^c * R_{\kappa}^c \\
 [c_1(X), c_1(Y), c_1(Z)]^T &= R^c * [1, 0, 0]^T = [0.435, 0.566, 0.700]^T \\
 [c_2(X), c_2(Y), c_2(Z)]^T &= R^c * [0, 1, 0]^T = [-0.812, 0.582, 0.033]^T \\
 [c_3(X), c_3(Y), c_3(Z)]^T &= R^c * [0, 0, 1]^T = [-0.812, -0.582, 0.033]^T
 \end{aligned} \quad (B.18)$$

B.10.3.2 旋转角度的灵敏系数

输出量相对于旋转角度输入量的灵敏系数按式(B.19)计算。

$$\begin{aligned}
 [c_4(X), c_4(Y), c_4(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta \omega^c} = [8.258, -326.408, -15.541]^T \text{ mm} / ^\circ \\
 [c_5(X), c_5(Y), c_5(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta \varphi^c} = [-186.497, 0, -344.646]^T \text{ mm} / ^\circ \\
 [c_6(X), c_6(Y), c_6(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta \kappa^c} = [-96.238, -176.068, -194.463]^T \text{ mm} / ^\circ
 \end{aligned} \quad (B.19)$$

B.10.3.3 平移分量的灵敏系数

输出量相对于平移分量输入量的灵敏系数按式(B.20)计算。

$$\begin{aligned}
 [c_7(X), c_7(Y), c_7(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta t_1^c} = [1, 0, 0]^T \\
 [c_8(X), c_8(Y), c_8(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta t_2^c} = [0, 1, 0]^T \\
 [c_9(X), c_9(Y), c_9(Z)]^T &= \frac{\delta P}{\delta t_3^c} = [0, 0, 1]^T
 \end{aligned} \quad (B.20)$$

输出量相对于输入量的灵敏系数见表 B.7。

表 B.7 灵敏系数值汇总表

序号	输出量	相应输入量	灵敏系数符号	灵敏系数的值
1	X	X^s	$c_1(X)$	0.435
2	Y		$c_1(Y)$	0.566
3	Z		$c_1(Z)$	0.700

4	X	Y^S	$c_2(X)$	-0.812
5	Y		$c_2(Y)$	0.582
6	Z		$c_2(Z)$	0.033
7	X	Z^S	$c_3(X)$	-0.388
8	Y		$c_3(Y)$	-0.583
9	Z		$c_3(Z)$	0.713
10	X	ω^C	$c_4(X)$	8.258 (mm / °)
11	Y		$c_4(Y)$	-326.408 (mm / °)
12	Z		$c_4(Z)$	-15.541 (mm / °)
13	X	φ^C	$c_5(X)$	-186.497 (mm / °)
14	Y		$c_5(Y)$	0 (mm / °)
15	Z		$c_5(Z)$	-344.646 (mm / °)
16	X	κ^C	$c_6(X)$	-96.238 (mm / °)
17	Y		$c_6(Y)$	-176.068 (mm / °)
18	Z		$c_6(Z)$	-194.463 (mm / °)
19	X	t_1^C	$c_7(X)$	1
20	Y		$c_7(Y)$	0
21	Z		$c_7(Z)$	0
22	X	t_2^C	$c_8(X)$	0
23	Y		$c_8(Y)$	1
24	Z		$c_8(Z)$	0
25	X	t_3^C	$c_9(X)$	0
26	Y		$c_9(Y)$	0
27	Z		$c_9(Z)$	1

B.10.4 输出量的不确定度分量

根据表 B.6 和表 B.7 的数据，按式 (B.9) 至式 (B.11) 计算输出量相应于

各输入量的不确定度分量，计算结果见表 B.8。

表 B.8 输出量不确定度分量汇总表

序号	输出量	相应输入量	不确定度分量符号	不确定度分量的值/mm
1	X	X^S	$u_1(X) = c_1(X) u(X^S)$	0.002
2	Y		$u_1(Y) = c_1(Y) u(X^S)$	0.002
3	Z		$u_1(Z) = c_1(Z) u(X^S)$	0.003
4	X	Y^S	$u_2(X) = c_2(X) u(Y^S)$	0.004
5	Y		$u_2(Y) = c_2(Y) u(Y^S)$	0.003
6	Z		$u_2(Z) = c_2(Z) u(Y^S)$	0
7	X	Z^S	$u_3(X) = c_3(X) u(Z^S)$	0.002
8	Y		$u_3(Y) = c_3(Y) u(Z^S)$	0.003
9	Z		$u_3(Z) = c_3(Z) u(Z^S)$	0.004
10	X	ω^C	$u_4(X) = c_4(X) u(\omega^C)$	0.001
11	Y		$u_4(Y) = c_4(Y) u(\omega^C)$	0.052
12	Z		$u_4(Z) = c_4(Z) u(\omega^C)$	0.002
13	X	φ^C	$u_5(X) = c_5(X) u(\varphi^C)$	0.029
14	Y		$u_5(Y) = c_5(Y) u(\varphi^C)$	0
15	Z		$u_5(Z) = c_5(Z) u(\varphi^C)$	0.055
16	X	κ^C	$u_6(X) = c_6(X) u(\kappa^C)$	0.015
17	Y		$u_6(Y) = c_6(Y) u(\kappa^C)$	0.028
18	Z		$u_6(Z) = c_6(Z) u(\kappa^C)$	0.031
19	X	t_1^C	$u_7(X) = c_7(X) u(t_1^C)$	0.003
20	Y		$u_7(Y) = c_7(Y) u(t_1^C)$	0

21	Z		$u_7(Z) = c_7(Z) u(t_1^C)$	0
22	X	t_2^C	$u_8(X) = c_8(X) u(t_2^C)$	0
23	Y		$u_8(Y) = c_8(Y) u(t_2^C)$	0.068
24	Z		$u_8(Z) = c_8(Z) u(t_2^C)$	0
25	X	t_3^C	$u_9(X) = c_9(X) u(t_3^C)$	0
26	Y		$u_9(Y) = c_9(Y) u(t_3^C)$	0
27	Z		$u_9(Z) = c_9(Z) u(t_3^C)$	0.002

B.10.5 合成标准不确定度

根据表 B.8 的数据，输出量的合成标准不确定度按式(B.21)计算。

$$\begin{aligned}
 u_c(X) &= \sqrt{\sum_{i=1}^9 a_i^2 u_i^2(X)} = 0.03 \\
 u_c(Y) &= \sqrt{\sum_{i=1}^9 a_i^2 u_i^2(Y)} = 0.09 \\
 u_c(Z) &= \sqrt{\sum_{i=1}^9 a_i^2 u_i^2(Z)} = 0.06
 \end{aligned} \tag{B.21}$$

B.10.6 扩展不确定度

本示例取包含因子 $k = 2$ ，根据式(B.21)的合成标准不确定度计算扩展不确定度，计算结果按式(B.22)表示。 $k = 2$ 对应近似 95 % 的包含概率。

$$\begin{aligned}
 U(X) &= 2u_c(X) = 0.06 \text{ (mm)} \\
 U(Y) &= 2u_c(Y) = 0.18 \text{ (mm)} \\
 U(Z) &= 2u_c(Z) = 0.12 \text{ (mm)}
 \end{aligned} \tag{B.22}$$

点云数据中单个三维点的测量结果按式(B.23)表示。

报告测量结果时，扩展不确定度 U 一般保留一位或两位有效数字，被测量估计值应修约至与 U 的末位一致；采用基于有效自由度确定的包含因子时，还应给出包含概率和有效自由度。

$$\begin{aligned}
 X &= (-1478.917 \pm 0.06) \text{ mm}; k = 2 \\
 Y &= (40105.514 \pm 0.18) \text{ mm}; k = 2 \\
 Z &= (394.327 \pm 0.12) \text{ mm}; k = 2
 \end{aligned} \tag{B.23}$$