

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.03.009

特征自适应的飞机大型蒙皮曲面测量系统与测量规划

李艺达¹, 隋少春², 曾坤³, 杨建平¹, 谢乾¹, 汪俊¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073;
3. 中国航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333002)

摘要: 针对飞机蒙皮零件外形准确度要求高、制造尺寸大和外形复杂的特点, 以及人工手动扫描测量工作量大、效率低的问题, 搭建了基于移动机械臂的柔性测量系统, 并提出一种特征自适应的多站位自动化扫描规划方法, 以实现飞机大型蒙皮曲面的三维测量数据自动化采集。首先构建了柔性测量系统与待测对象坐标系变换模型, 分析扫描规划与执行过程中数据的传递关系, 并通过视觉定位实现系统相对位姿估计。然后通过特征敏感的扫描路径点生成、效率优化的扫描站位规划以及扫描轨迹规划, 实现了基于扫描效率和扫描完整性约束的特征自适应扫描规划。最后, 搭建了一个基于机械臂与移动平台的柔性测量系统, 并以 4 个真实飞机零部件作为测量对象, 从扫描效率与扫描完整性方面对所提出的自动化扫描方法与手动扫描方法进行对比, 并设计试验进一步验证了系统测量精度, 结果验证了所提方法替代手动扫描测量方法的可行性。

关键词: 航空宇航制造工程; 飞机蒙皮; 特征自适应; 扫描路径规划; 柔性测量

中图分类号: TP2; V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)03-0428-11

Feature Adaptive Measurement System and Measurement Planning for Large Aircraft Skin Surface

LI Yida¹, SUI Shaochun², ZENG Kun³, YANG Jianping¹, XIE Qian¹, WANG Jun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu 610073, China;
3. AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Jingdezhen 333002, China)

Abstract: Large curved surface parts of aircraft feature in high shape accuracy, large manufacturing size and complex shape. Manual scanning measurement causes heavy workload and low measurement efficiency. Therefore, a flexible measurement system based on mobile manipulator and an automatic scanning method of adaptive multi station task execution is proposed to realize the automatic acquisition of 3D measurement data of large aircraft skin surface. First, the position relationship between the flexible measurement system and the object to be measured is modeled. The data transfer relationship in the process of scanning planning and execution is analyzed, and the relative pose of the system is estimated by visual positioning. Second, the feature adaptive scan planning based on scanning efficiency and scan integrity constraints is realized by the feature adaptive scanning path point generation, the scanning station planning and the scanning trajectory planning with efficiency optimization. Finally, by taking four real aircraft parts as the measurement objects, the proposed automatic scanning method is compared with the manual scanning method in terms of scanning efficiency and scanning integrity, and experiments are designed to further verify the measurement accuracy of

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707504)。

收稿日期: 2021-06-28; **修订日期:** 2022-01-10

通信作者: 汪俊, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wjun@nuaa.edu.cn。

引用格式: 李艺达, 隋少春, 曾坤, 等. 特征自适应的飞机大型蒙皮曲面测量系统与测量规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 428-438. LI Yida, SUI Shaochun, ZENG Kun, et al. Feature adaptive measurement system and measurement planning for large aircraft skin surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 428-438.

the system. The results demonstrate the feasibility of the proposed method replacing the manual scanning method.

Key words: aerospace manufacturing engineering; aircraft skin; feature adaptive; scanning path planning; flexible measurement

为了检验产品是否满足设计要求,三维测量是生产过程中不可或缺的重要环节。现代飞机为了获得更好的气动性能与隐身性能,对蒙皮外形准确度提出了严格的要求,同时也对测量技术提出了很大的挑战。航空制造企业正积极推进数字化测量技术的应用,如利用三维激光扫描技术快速获取复杂型面点云数据,实现飞机蒙皮曲面的非接触式测量。但是目前的扫描测量仍以人工操作为主,难以满足飞机脉动生产的效率要求。为了提升航空制造业生产自动化水平、扩大自动化数字测量技术应用范围、减少检测人员的工作量、提高检测精度及检测效率、加速航空制造业向智能制造转变的进程,国内外许多学者对航空零部件的自动化测量方法进行了一系列探索^[1-3]。

在自动化测量系统的构建方面,早期的自动化测量较多地采用了三坐标测量机^[4-6]。由于其测量效率较低,在大型曲面测量应用中受到了很大的限制。针对飞机蒙皮类零件尺寸大的特点,构建全局测量场的广域测量方案被广泛研究^[7-8]。Shi等^[9]将三维扫描仪与激光测距仪相结合,实现了大型物体三维测量;文献[10]提出了一种多视场全局标定方法用于全局测量场的建立;Jiang等^[11]将双目视觉系统和光学扫描仪相结合,研究了激光扫描仪在整个扫描过程中的定位与跟踪;于浩等^[12]基于固定站位下柔性测量单元的测量空间及精度分布进行分析,提出了基于K-均值聚类的测量站位规划及自适应控制策略;孟飙等^[13]对组合测量系统的全局标定和数据融合方法进行研究,实现了全局误差控制。然而全局测量场在实际应用中存在建设成本高、测量误差控制难度大、系统灵活性较差等问题。

扫描规划是实现自动化扫描测量的关键问题,扫描路径规划策略直接影响着扫描效率、扫描数据完整性与测量精度。Mahmud等^[14]基于测量不确定度控制进行激光扫描仪扫描路径规划。王鹏等^[15]结合背影轮廓法和凸包法对线结构光传感器的最佳视角确定方法进行了研究。Ding等^[16]对激光扫描过程中被测表面采样点的扫描方向与法向量的位置关系进行分析,提出了一种针对复杂机械零件的扫描路径规划方法。这些方法生成的扫描路径不连续且数据依赖于点云配准,数据精度难以

保证。Minh等^[17]使用最小二乘保角映射将三维曲面展开为二维平面,在平面上进行等距路径规划后再将路径点映射至三维空间,通过控制扫描重叠率完成扫描路径规划,一定程度上简化了扫描规划难度。该算法只能处理曲率变化较平缓的三维曲面,无法自适应特征区域。林晶^[18]基于软件CATIA进行二次开发以生成初始扫描轨迹,并基于粒子群算法和系统误差预测模型对曲面扫描轨迹进行优化。浙江大学的艾小祥等^[19-20]在分析扫描仪扫描约束及测量对象几何特征的基础上,针对机翼骨架的特征集中区域提出了分对象总体最优法,并采用蚁群算法优化扫描路径。这些方法在特定的场景中达到了较好的效果,然而其特征提取需借助三维建模软件进行人机交互,对特征区域的划分仍需较多人工干预。

综上,现有的自动化测量系统存在建设成本高、系统柔性差的问题;现有的自动化扫描规划方法无法针对待测对象的曲率变化大的特征区域自适应调整扫描策略,难以直接应用于飞机大型蒙皮曲面零件的扫描测量。针对以上问题及飞机蒙皮零件制造尺寸大、外形复杂的特点,本文构建了基于移动机械臂的柔性测量系统,提出了特征自适应的多站位自动化扫描规划方法,并对扫描效率,模型完整性以及测量精度进行实验验证。

1 柔性测量系统

柔性测量系统主要包含执行模块和测量模块,如图1所示。执行模块采用机械臂与移动平台的组合方式。机械臂末端夹持扫描仪进行手持扫描动作;移动平台配备激光雷达与视觉传感器,可在复杂车间内建立环境障碍地图,实现车间环境内的动态路径规划与定位及待测对象与柔性测量系统的相对位姿估计。测量模块包含手持式扫描仪和动态跟踪系统。通过工装将扫描仪与机械臂末端连接。扫描过程中,由动态跟踪系统进行扫描仪的实时位姿解算,将扫描获取的型面三维数据转换至动态跟踪系统坐标系下。

为了实现模块间数据传递、保证系统协调工作,首先对系统各组成部分之间的相对坐标关系进行建模,然后对待测工件进行位姿估计。

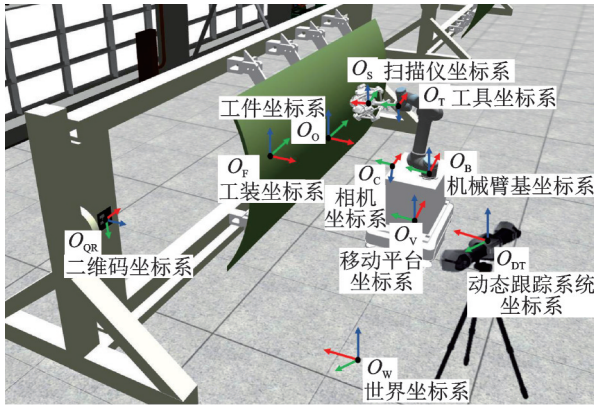


图1 系统组成与坐标系定义示意图

Fig.1 System composition and coordinate system definition

1.1 系统坐标关系建模

系统坐标系定义如图1所示。 O_O 为工件坐标系, O_F 为工装坐标系, O_{QR} 为二维码坐标系,通过工装建立工件坐标系与二维码坐标系的联系,工装同时保证了工件与二维码的定位精度,二维码坐标系到工件坐标系的相对位姿可由工装设计参数确定。执行模块包含机械臂基坐标系 O_B ,工具坐标系 O_T ,移动平台坐标系 O_V 和相机坐标系 O_C ;测量模块包含扫描仪坐标系 O_S ,设定垂直于扫描平面指向扫描对象的方向为扫描仪坐标系 x 轴正方向;动态跟踪系统坐标系为 O_{DT} ;全局参考坐标系定义为 O_W 。

坐标系之间的关系由一个刚性变换矩阵 $T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$ 表示,其中 $R_{3 \times 3}$ 表示旋转矩阵, $t_{3 \times 1}$ 表示平移向量。

待测对象坐标系之间,从工件坐标系到二维码坐标系为固定变换 ${}^{QR}_O T = {}^{QR}_F T \cdot {}^F_O T$,由工装设计参数得到。利用相机成像几何模型可估计出二维码坐标系在相机坐标系下的位姿 ${}^C_{QR} T$ (将在1.2节讨论)。从相机坐标系到机械臂基坐标系的变换 ${}^B_C T$ 由手眼标定得到。扫描仪坐标系与工具坐标系的相对位姿 ${}^T_S T$ 由夹具设计参数得到。由机械臂运动学模型可以得到任意姿态下工具坐标系在机械臂基坐标系的位姿 ${}^B_T T$ 。基于被测对象数模进行扫描路径规划,扫描路径点可转化为扫描仪在工件坐标系下的期待位姿,为了将其转化为执行模块可执行的扫描动作,需要将其从工件坐标系转换到机械臂基坐标系下,根据矩阵乘法结合律,其变换矩阵表达为

$${}^B_O T = {}^B_C T \cdot {}^C_{QR} T \cdot {}^{QR}_O T \quad (1)$$

通过该变换关系得到扫描仪坐标系在机械臂基坐标系下的期望位姿,再通过机械臂运动学逆解求得期望的机械臂各关节角度,实现扫描动作

解算。

当待扫描区域较大,一个站位下无法覆盖所有扫描路径点时,将全局扫描路径点拆分成各站位下的局部扫描路径点,利用柔性测量系统的水平移动分站覆盖完整扫描区域。在系统站位转换过程中,扫描仪在机械臂基坐标系下的期待位姿会随着柔性测量系统与待测工件的相对运动而发生改变。令 s_0 站位为柔性测量系统初始站位,假设从 s_0 站位到 s_n 站位的变换为 ${}^{s_n}_{s_0} T$,则

$$\begin{aligned} p_u &= {}^{s_0}_{s_n} T \cdot {}^B_O T \cdot p_v \\ p_u &\in P_{s_0}, p_v \in P_{s_n} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P_{s_0} 为 s_0 站位坐标系下的扫描仪期待位姿集合, P_{s_n} 为 s_n 站位下的扫描仪期待位姿集合,通过式(2)实现两个集合之间的映射。

另外,扫描数据通过变换 ${}^{DT}_S T$ 从扫描仪坐标系 O_S 转换到动态跟踪系统坐标系 O_{DT} 。在一个工位的扫描中, O_{DT} 与 O_W 相对位姿保持不变,得到坐标统一的工件扫描数据。

在一个工位测量任务中坐标系之间的变换关系如图2所示,图2中使用实线和虚线区分测量任务中固定或动态变化的位姿关系,各坐标系之间通过固定变换或动态变换建立联系。其中,世界坐标系作为参考坐标系,在一个工位的测量任务中其与工装坐标系及动态跟踪系统坐标系的相对位姿保持不变,此外移动平台坐标系与机械臂基座坐标系相对位姿也是固定的,这些固定变换在计算中可以被消去,因此无需进行求解。

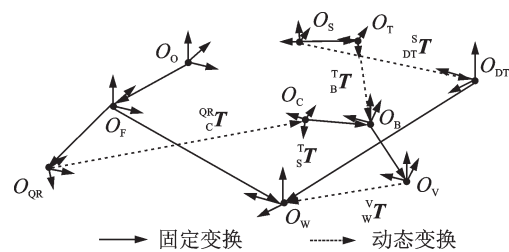


图2 坐标系变换示意图

Fig.2 Coordinate system transformation

1.2 待测工件位姿估计

待测工件与柔性测量系统的相对位姿估计是系统数据传递中的重要内容。本文利用ArUco库^[21-22]自动提取图像中的二维码,并估计出二维码坐标系在相机坐标系下的位姿,实现待测工件相对位姿解算。

基于二维码的位姿估计可描述为多点透视成像(Perspective-n-point, PnP)问题,其求解精度与观测角度与距离相关^[23],如图3所示。由于移动平

台定位精度影响,可能出现无法准确到达预设位置,导致待测工件相对位姿估计精度较低。为此,考虑相机与二维码相对距离、相机成像平面与二维码平面夹角这两个因素对位姿估计精度的影响,设计评价函数

$$E = \alpha \sin \theta + (1 - \alpha) \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (3)$$

式中: θ 为相机光轴与二维码图像平面的夹角, $\theta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right]$; d 为相机坐标系到二维码图像平面距离, d_{\max} 为最大有效距离, d_{\min} 为柔性测量系统与待测对象的最小安全距离,具体参数需要根据相机分辨率、二维码尺寸等实际情况进行调整,若相机分辨率较高或二维码尺寸较大,可适当增大 d_{\max} ;权值 α 用于调整评价函数中夹角和距离的影响比例。当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 且 $d = d_{\min}$ 时,即相机平面与二维码平面平行且距离等于最小安全距离的时候,评价函数 E 取得最大值1。

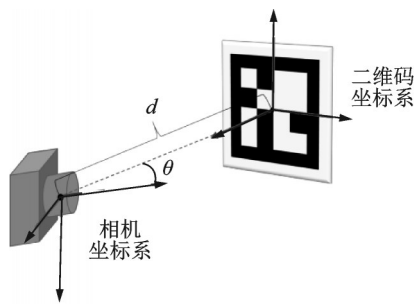


图3 相机位姿估计

Fig.3 Camera pose estimation

设定阈值 T_E ,当评价函数 E 小于 T_E ,则认为位姿估计精度过低,进入移动平台微调程序:首先调整移动平台朝向以使 θ 最小;然后再次评价二维码位姿估计精度,若评价函数仍小于设定阈值则使移动平台向二维码坐标系原点方向移动距离 $\frac{d - d_{\min}}{2}$ 。重复这一过程,在设定最小安全距离约束内对二维码进行逼近,直至满足位姿估计精度要求。

2 特征自适应的大型曲面扫描规划

本节首先根据扫描仪工作原理进行扫描约束分析,建立扫描规划问题模型,然后将特征自适应的大型曲面扫描规划方法分为3个步骤:(1)基于待测曲面网格模型分割得到特征区域,对不同区域自适应采样并偏置,得到离散的扫描路径点集合。(2)根据扫描路径点分布及柔性测量系统工作空间约束对扫描任务进行站位划分。(3)在每个站位下求解扫描路径点遍历顺序,利用运动规划器对有序的

离散目标位姿集合平滑插值,生成每个站位的扫描轨迹,最终得到移动机械臂可执行的任务动作,实现扫描规划。在步骤(1)中主要考虑扫描完整性约束,而在步骤(2,3)中主要考虑扫描效率约束。

2.1 扫描约束分析

如图4所示,将扫描仪视场建模为一个锥形区域,进一步将有效扫描区域简化为一个圆柱体区域,其中视锥方向与扫描仪坐标系 x 轴正方向一致, d_{\min} 、 d_{\max} 、 d_{best} 分别为扫描仪的最小、最大以及最佳工作距离, r_f 为有效扫描区域半径,以最小工作距离下的视锥切圆半径为参考。

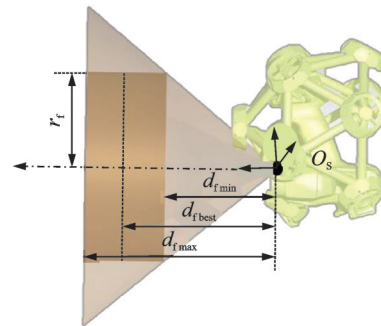


图4 扫描仪视场建模

Fig.4 Scan field modeling

扫描路径点可描述为 $p_i = (x, y, z, n_x, n_y, n_z)$,其中 (x, y, z) 为三维空间坐标, (n_x, n_y, n_z) 为单位方向向量,分别代表扫描仪的位置与朝向。用于自动扫描任务执行的扫描仪空间位姿可表达为 $p_{pi} = (x, y, z, r, \rho, \gamma)$,其中 (x, y, z) 为扫描仪的位置, (r, ρ, γ) 为扫描仪绕 x, y, z 轴的旋转,表示扫描仪的姿态。由于扫描路径点 p_i 的法向量 (n_x, n_y, n_z) 为归一化的方向向量,只提供了两个自由度的约束。令扫描仪视场方向(扫描仪坐标系 x 轴正方向)与扫描路径点法向量方向一致,同时令扫描仪绕 x 轴方向的旋转角度为0(即令 $r = 0$),即可实现扫描路径点和扫描仪的期待位姿之间的相互转换,因此下文对二者不再作区分。

为了保证扫描数据质量,扫描仪的视锥方向应尽可能与待测表面垂直,同时扫描路径点与待测表面的距离应接近扫描仪的最佳工作距离。

定义扫描目标点集合 P_T 为待测曲面网格模型上的采样点集合,每个扫描目标点 p_{T_i} 根据扫描仪的工作条件约束可间接求得对应的扫描路径点 p_i (延法线方向偏置 d_{best} 并将法线反向即可)。通过在待测曲面网格模型上采样扫描目标点的方式将网格离散化,扫描仪在一个扫描路径点下其有效扫描区域可以覆盖扫描目标点所处的曲面局部区域,寻找合适的扫描路径点遍历顺序,并在扫描路径点

间进行平滑插值,即得到可完整获取待测曲面表面数据的扫描路径。

2.2 特征敏感的扫描路径点生成

飞机大型蒙皮曲面上的特征区域主要表现为曲率变化大,因此可基于曲率进行曲面特征识别与分割。首先对待测曲面三角网格模型进行平滑处理,以滤除较小特征(如铆钉等)的干扰。结合飞机大型蒙皮曲面的特点,同时考虑扫描完整性与扫描效率,将扫描目标点采样划分为两部分内容:针对连续平坦曲面区域,采用行切法快速获取曲面整体数据。针对飞机蒙皮曲面上为了满足结构或功能要求(如光电吊舱)而出现的鼓包或者凹陷,如图5所示,对局部复杂结构区域进行精细规划,提高特征区域的扫描覆盖率。具体流程如图6所示。

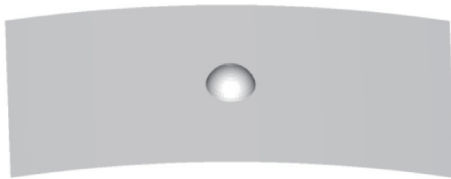


图5 带凸包的飞机蒙皮曲面

Fig.5 Surface of aircraft skin with convex hull

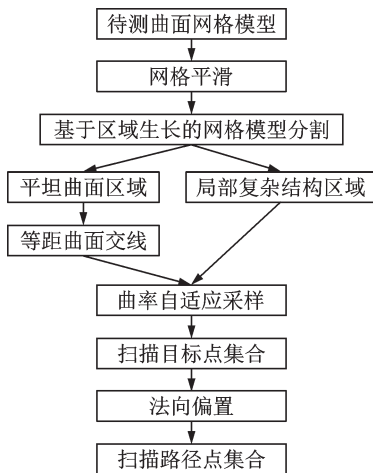


图6 扫描路径点生成流程

Fig.6 Process of scan path point generation

具体的,基于区域生长方法对网格模型进行分割^[24],得到曲率突变的局部复杂结构区域,如图7所示;针对曲率变化相对平缓的连续平坦曲面区域,根据给定扫描参考方向,沿平行于扫描参考方向设置一组等距辅助平面,辅助平面与待测曲面相交得到曲面交线,即行切法的采样空间,曲面交线与局部复杂结构区域共同组成了扫描目标点的采样空间,如图8中的黄色区域。

根据曲面变化趋势动态调整采样密度,设计扫描目标点等效采样间距为

$$d_e = \max \{ d_{\text{Interval}} \cdot \cos^k \langle \mathbf{p}_{T_i}, \mathbf{p}_{T_j} \rangle, 0 \} \quad (4)$$

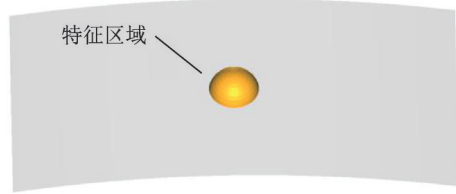


图7 网格模型分割

Fig.7 Mesh segmentation

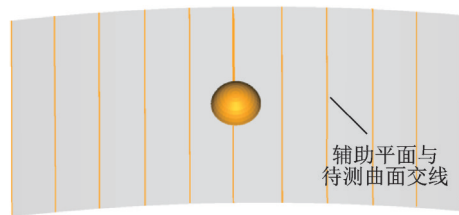


图8 网格采样空间

Fig.8 Sample space of mesh

其中

$$d_{\text{Interval}} = (1 - h) \cdot r_f \quad h \in [0, 1] \quad (5)$$

式中: d_{Interval} 为扫描仪的扫描有效间距,同时也作为辅助平面的间距; r_f 为扫描仪的有效扫描区域半径,系数 h 用以控制扫描重叠率。式(4)中 $\cos \langle \mathbf{p}_{T_i}, \mathbf{p}_{T_j} \rangle$ 为曲面上两扫描目标点法线夹角的余弦值;系数 k 用于调节等效采样间距 d_e 对法向变化的敏感度。当待测区域近似为平面时,相邻扫描目标点的法向夹角很小, d_e 接近于 d_{Interval} ;待测区域曲率变化越大,等效采样距离越小,采样点越密集。当两个法向量夹角为锐角时, k 值越大,曲面的法向变化对等效采样距离的影响越大,采样距离对待测曲面的曲率变化越敏感。如图9为 k 取值1、2、3、6时等效扫描距离随法向量夹角的变化关系。当 $\cos \langle \mathbf{p}_{T_i}, \mathbf{p}_{T_j} \rangle < 0$ 时, $d_e = 0$ 。图10中蓝色点和红色点分别为 k 取2和6时得到的扫描目标点,可以看到 k 值变大后曲率变化率大的特征区域采样密度明显增加,而曲率变化小的平坦区域采样密度无明显变化,符合设计逻辑。

将采样得到的扫描目标点沿着对应法向量方

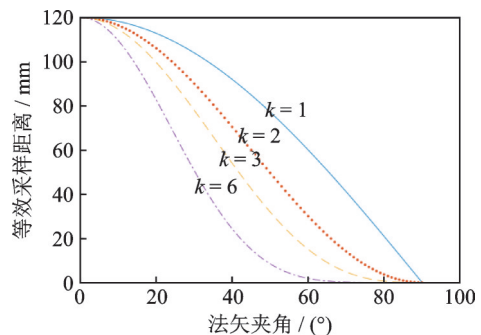


图9 法向量夹角与等效扫描距离关系

Fig.9 Relation between the angle of normals and d_e

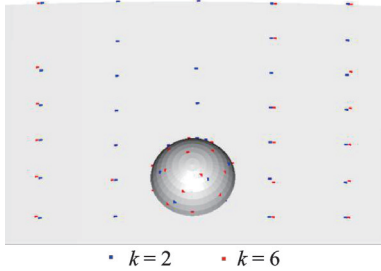


图 10 不同的 k 值对采样结果的影响

Fig.10 Influence of different k values on sampling result

向偏置距离 d_{best} ,再将法向量方向反转,即得到了待测曲面的扫描路径点,如图 11 所示。

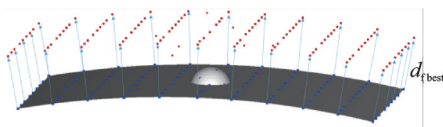


图 11 偏置扫描目标点得到扫描路径点

Fig.11 Offset scan target point obtained by scan path point

通过根据曲率变化对曲面特征进行自动分割和提取,并对不同区域采取不同的扫描规划策略,最终生成的扫描路径点对待测曲面上的局部复杂结构区域具有自适应性,可避免复杂结构区域扫描数据缺失。

2.3 扫描站位规划

由于采用的柔性测量系统不包含高度调节机构,因此其高度覆盖区域不受站位规划影响;转移站位时,移动平台进行水平运动,系统俯仰、滚转两个自由度不予考虑。因此本文将站位求解空间从三维空间压缩至二维平面以简化扫描站位规划过程。以任意站位 $s_i=(x, y, \theta)$ 表示柔性测量系统的平面坐标与朝向,将每个站位下的机械臂工作空间投影到移动平台的运动平面上,并简化为一个矩形区域 r_i ;将三维扫描路径点集合 P 投影至移动平台运动平面,得到投影路径点集合 P' 。扫描站位规划目标是以最少的站位尽可能覆盖集合 P ,将该优化问题转化为以最少的矩形区域 r_i 覆盖投影路径点集合 P' 。

以每个投影路径点为中心生成矩形区域,每个矩形区域对应一个扫描站位,如图 12 所示。计算每个矩形区域覆盖的投影路径点数量,采用非极大值抑制滤除多数矩形区域——若两个矩形区域的交并比 (Intersection over union, IoU) 超过设定阈值,则删除其中覆盖投影路径点数量较少的区域,得到候选站位集合 S_c ,如图 13 所示。

为了得到目标站位集合 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\} \subset S_c$,构造优化问题

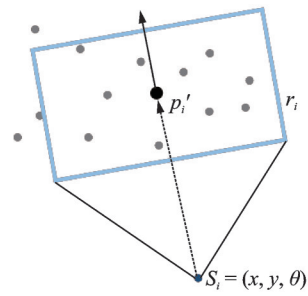


图 12 扫描站位示意图

Fig.12 Diagram of scanning station

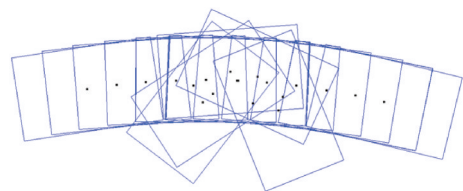


图 13 生成候选扫描站位集合

Fig.13 Generation of the set of candidate scanning station

$$\begin{cases} \text{Min} \{ N(S) + \lambda \sum_{s_i \in S} (D(s_i) + P(s_i)) \} \\ D(s_i) = \left| \|s_i, s_j\| - w \right| \\ P(s_i) = 1 - \cos \langle s_i, s_j \rangle \end{cases} \quad (6)$$

目标函数由两部分组成,其中 $N(S)$ 为站位集合 S 无法覆盖的投影路径点个数, $D(s_i)$ 和 $P(s_i)$ 分别为相邻两个站位之间距离和夹角的函数,系数 λ 用于调节两项的权重。最小化目标函数即得到覆盖尽可能多扫描路径点,且站位分布均匀、朝向一致的目标站位集合 S ,减小移动平台的调姿动作,提高测量效率,如图 14 所示。

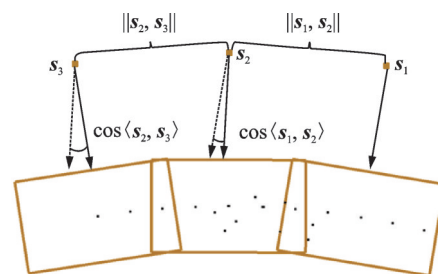


图 14 生成扫描站位集合

Fig.14 Generate a set of scanning station

为使得每个站位下覆盖路径点在站位工作空间内分布均匀,进一步优化扫描站位位置:计算目标站位 s_i 对应矩形工作区域所覆盖的投影路径点集合 P'_i 的质心 p'_i

$$p'_i = \frac{1}{n} \sum_{p'_i \in P'_i} p'_i \quad (7)$$

如图 15 所示,在保证矩形区域完整覆盖路径点集合 P'_i 的约束下,最小化矩形区域中心与质心

p'_s (即图中红点)的距离,最终得到优化后的扫描站位集合 S 。

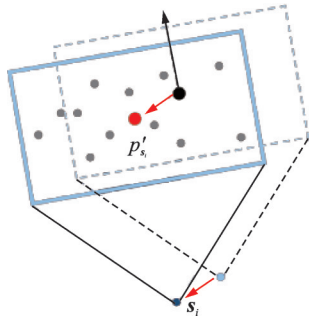


图15 优化扫描站位

Fig.15 Optimized scanning station location

2.4 启发式扫描轨迹规划策略

在任意站位下,柔性测量系统与被测对象的相对位姿已知。将规划的扫描路径点从被测对象坐标系映射到该站位下机械臂基坐标系下,将扫描路径点转化为扫描仪的期待位姿,根据机械臂与扫描仪坐标关系以及机械臂关节约束求解每个期待位姿的可达性,在求解空间中根据待测工件的相对位姿添加障碍约束,剔除不可达路径点,根据该站位下可执行的路径点集合进行机械臂的运动轨迹规划。

为实现机械臂的扫描运动轨迹规划,需要确定该站位下可执行的扫描路径点的遍历顺序。首先对复杂结构扫描路径点按照距离进行 k 聚类,形成若干扫描路径点簇 P_C ,并依照式(7)计算每个点簇的质心;然后将行切法扫描路径点串联形成 Z 字形扫描路径,以链表形式存储;在点簇质心与行切法路径几何距离最近处,将乱序的扫描路径点簇作为子链表插入,如图 16 所示。

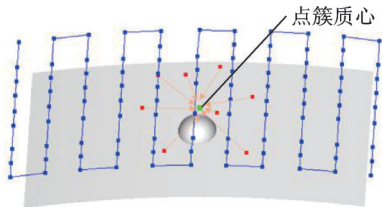


图16 扫描路径点簇聚类

Fig.16 Scan path point clustering

为确定子链表中扫描路径点的遍历顺序,考虑以下启发式原则以同时保障机械臂运动平稳性与扫描效率:(1)扫描轨迹应尽可能平滑,避免运动方向突变造成运动冲击;(2)两个扫描路径点之间的扫描方向差异尽可能小,避免频繁调整扫描仪位姿;(3)扫描路径总长应尽可能小。

基于上述原则,确定扫描路径点遍历顺序的

流程为:以最接近点簇质心的行切法扫描路径点作为初始点和终点,遍历并寻找下一个最优路径点,重复这个过程直至完成子链表内所有扫描路径点的排序。假设 $p_{i-1}, p_i \in P_{C_j}$ 分别表示顺序的两个路径点,为下一个路径点 $p_{i+1} \in P_{C_j}$ 设计评价函数

$$S_{NBP} = \frac{w(1 + \cos\alpha) + (1 - w)(1 + \cos\beta)}{1 + e^{k(d - d_0)}} \quad (8)$$

式中 $\alpha = \langle p_{i-1}p_i, p_i p_{i+1} \rangle$, 即扫描路径运动方向的变化角度; $\beta = \langle p_i, p_{i+1} \rangle$, 即扫描方向的变化角度,系数 w 用于调整运动方向与扫描方向的权重; $d = \|p_i, p_{i+1}\|$, 即两个扫描路径点的距离(图 17); d_0 为参考距离,当 $d < d_0$ 时,距离对评价函数的影响较小;系数 k 用于控制函数对距离的敏感度。

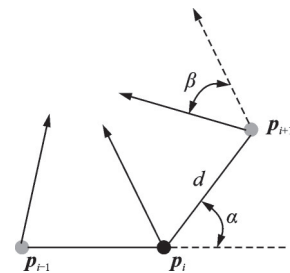


图17 路径点遍历顺序评价函数计算

Fig.17 Evaluation calculation of path point traversal sequence

选择得分最高的点作为下一个最优路径点,满足扫描轨迹运动方向变化角度小、扫描角度变化小且运动距离较短。确认所有路径点遍历顺序后,使用运动规划器进行平滑插值,得到机械臂可执行的扫描轨迹。

3 飞机大型曲面自动化测量

为验证所提出方法的有效性,搭建了柔性测量系统,如图 18 所示。其中机械臂型号为 UR5 协作机器人,其工作空间为基座关节周围 850 mm 范围内的球形区域,有效负载 5 kg,同时重复定位精度达到 ± 0.03 mm;移动平台采用 MiR100 移动机器人,其有效定位精度 ± 5 cm;使用 RealSense D435 深度相机同时用于移动机器人的辅助避障和待测对象的视觉定位;扫描设备为 Creafom 的 Metra Scan 三维扫描仪,使用 C-Track 视觉跟踪仪对扫描仪进行位姿跟踪定位。执行模块与测量模块解耦,保证测量数据精度不受执行累计误差影响。

面向飞机大型曲面的自动化测量系统完整测量流程如图 19 所示。



图 18 柔性测量系统与试验环境

Fig.18 Flexible measuring system and experiment environment

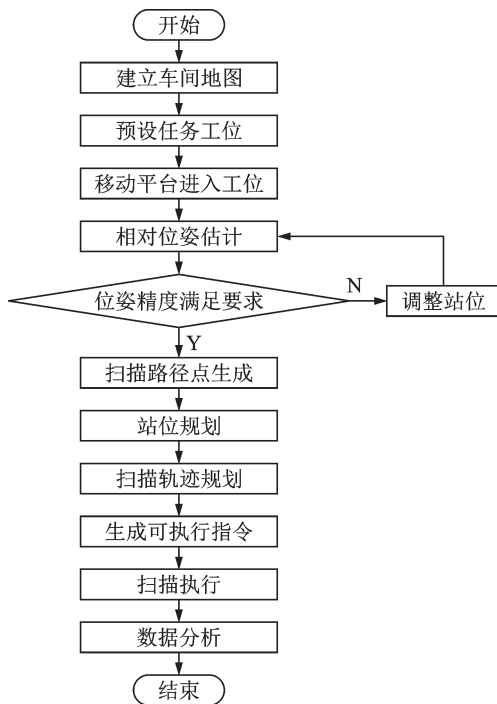


图 19 自动化测量流程图

Fig.19 Automatic measurement flow chart

首先在预备阶段需要人工辅助移动平台利用激光雷达在车间内建立高精度环境地图,并设定移动平台在任务工位中的初始站位。完成预备阶段工作后,自动化测量系统工作流程如下:根据测量任务规划,柔性测量系统进入预设任务工位。视觉定位模块识别待测对象工装上的二维码,利用二维码估计待测工件与柔性测量系统的相对位姿,并微调系统站位以满足位姿估计精度要求。然后针对飞机蒙皮曲面外形复杂、尺寸大的特点,根据待测对象的网格模型,通过特征敏感的扫描路径点生成、扫描站位规划及扫描轨迹规划 3 个步骤实现特征自适应的扫描规划。将规划数据基于系统坐标关系模型转换到机械臂及移动平台坐标系下,得到柔性测量系统可执行的任务指令。针对尺寸较大的蒙皮零件,单一站位下机械臂的工作空间无法有

效覆盖全部扫描区域,将扫描任务分站位执行,并将每个扫描站位下的局部扫描数据统一到动态跟踪系统建立的测量参照系下。基于扫描数据进行分析处理,得到测量结果,即实现待测对象的单次完整测量。

4 试验与分析

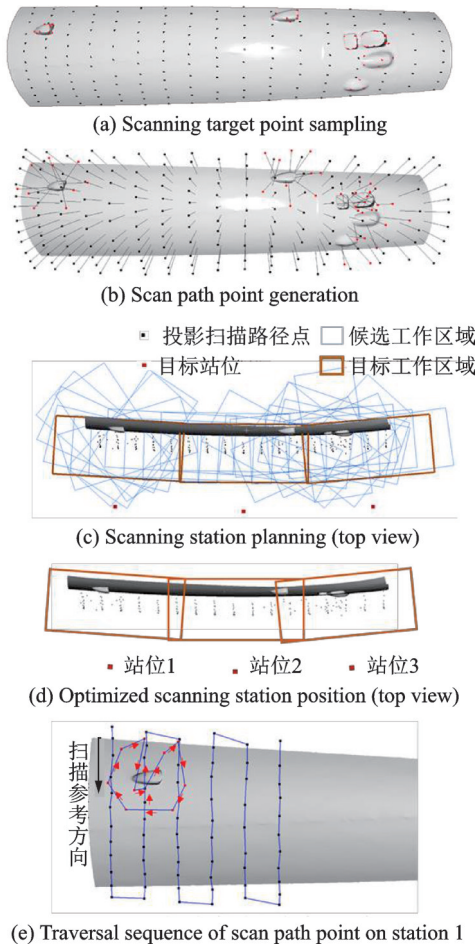
使用真实飞机产品作为测量对象,选取如飞机机身桶段、机翼上、下壁板等典型的飞机蒙皮壁板结构测试所提出的飞机大型蒙皮曲面自动化三维扫描测量方法。

试验测试了 4 个场景对象:场景 1 中测量对象为机翼上壁板,其曲率变化较小且表面平整。场景 2 中的测量对象为直升机尾翼垂直安定面,其表面有许多为了增加结构刚性而设计的沟槽结构。场景 3 和场景 4 分别为机翼下壁板和机身蒙皮,其表面有一定的曲率变化且包含部分鼓包或凹槽等复杂结构区域。

4.1 扫描规划试验

以场景 4 中的飞机机身作为测量对象进行自动化扫描规划测试。首先在待测对象数模上进行扫描目标点采样,在式(4,5)中,取 $k=2, h=0.6, r_f=200$,得到采样结果如图 20(a)所示,图 20 中红点为复杂结构区域采样点,黑点为行切法采样点,采样点的分布密度与曲面曲率变化率一致,符合设计要求。将扫描目标点沿着对应法向量方向偏置,再将法向量偏置,得到待测曲面扫描路径点,如图 20(b)所示,其中黑色细线表示扫描路径点的法向量。根据扫描路径点进行扫描路径规划,如图 20(c),蓝色矩形框为候选站位对应的系统工作区域,红色点为算法求解的目标站位点,对应的目标站位工作区域为图示棕色粗矩形框。测试中,算法从 32 个候选站位中选择出 3 个目标站位,该组合为目标函数(6)限定下的最优解。最小化矩形区域中心与质心的距离,最终得到优化后

的扫描站位集合,如图20(d)所示。对于评价函数(8),取 $d_0 = 3 \cdot d_{Interval}$, $k = 0.02$, $\omega = 0.9$,得到扫描站位1扫描路径点遍历顺序如图20(e)所示(图示轨迹为路径点的顺序连接,未进行平滑插值,并非最终执行轨迹),该结果符合扫描轨迹规划策略预期。



(e) Traversal sequence of scan path point on station 1

图20 特征自适应的扫描规划

Fig.20 Feature adaptive scan planning

图21为行切法和本文提出的特征自适应方法对飞机蒙皮曲面扫描路径的规划路径点,以及根据规划路径点进行扫描的结果对比。从扫描路

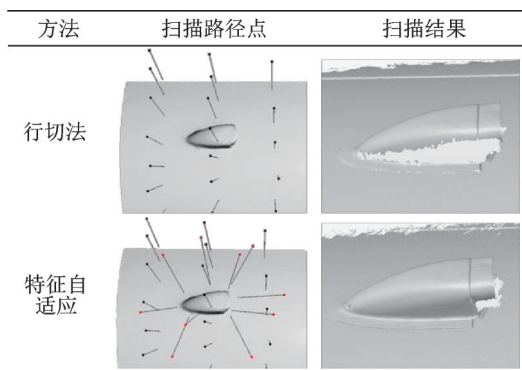


图21 两种规划策略对特征区域效果对比

Fig.21 Comparison of the effects of two planning strategies on feature area

径点规划结果可以看出,本文提出的特征自适应方法在行切法的基础上可自适应规划对局部特征区域进行精细规划,针对特征区域增加扫描位姿,图21中红色点即为针对特征区域的扫描路径点。从扫描结果来看,在曲率变化较大的特征区域,由于扫描仪与被测曲面夹角过大,使用行切法的扫描结果在凸起部位侧面出现了大面积的数据缺失,而本文所提方法则可以获取较完整的特征区域数据。

4.2 测量结果分析

4.2.1 扫描效率

在正常工况下手动对待测对象进行扫描,同时分别针对4个场景中的待测对象进行扫描规划,并执行自动化扫描。两种扫描方式分别重复进行4次,表1记录了测量对象的尺寸、对应的规划扫描站位数以及两种扫描方法所花费的平均扫描时间。

表1 试验场景扫描时间对比

Table 1 Comparison of scanning time of test scenes				
场景	尺寸/ (m×m)	扫描 站位数	手动扫描 时间 t_1/s	自动扫描 时间 t_2/s
场景1	1.8×1.0	2	158	123
场景2	0.7×0.6	1	127	91
场景3	2.5×0.9	3	265	259
场景4	2.9×0.8	3	272	256

在场景1和场景2中待测对象尺寸较小,自动化扫描方法所花费时间较手动扫描时间有较大优势,尤其在场景2中扫描时间减少接近30%,这是因为自动化扫描路径规划可以在保证扫描完整性的同时避免重复扫描;而随着待测对象尺寸增大,扫描站位增加,柔性测量系统扫描站位转移耗费时间较长(由实验中所使用的移动平台所限制,若使用全向移动平台则可以很大程度上减少站位调姿耗时),在场景3和场景4中自动扫描速度优势降低,但是仍优于手动扫描。整体而言,自动化扫描方法的扫描效率更高,并且在连续的、重复性的扫描任务中,自动化扫描方法有更大的优势。

4.2.2 扫描完整性

图22展示了手动和自动扫描方式的扫描结果的直观对比。对于场景1中的平板类型对象,两种扫描方式的直观扫描效果相近,在表面铆钉细节处也有较高的扫描质量;对于场景2的沟槽结构,自动化扫描结果基本完整;分析场景3和场景4可以看出自动化扫描方式整体扫描效果较好,且在局部复杂结构区域对细节特征也能很好地覆盖,验证了特征自适应的扫描规划的有效性。受限于测试系

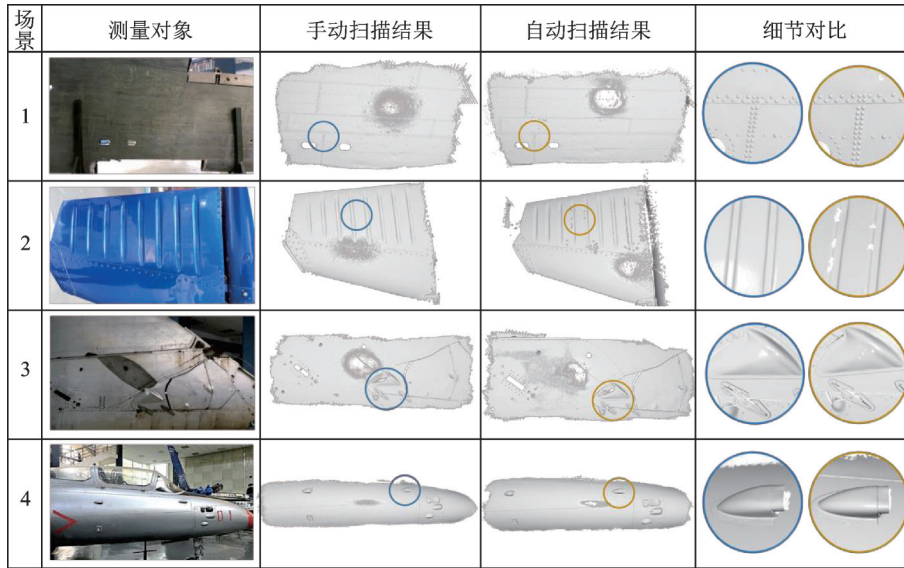


图 22 扫描结果对比

Fig.22 Comparison of scan results

统中机械臂的运动空间,只能对对象局部数据进行采集,实际应用中根据待测对象的尺寸可以选用不同型号的机械臂和移动平台。

4.2.3 测量精度

为进一步验证系统的测量精度,设计了系统精度验证实验:将两个直径为 22.225 mm 的激光跟踪仪靶球固定于测试场景中,使用激光跟踪仪测量并计算两各靶球的球心距离 d_s ,同时使用柔性测量系统对其进行自动化扫描,采用 PloyWorks 软件根据扫描数据拟合两靶球,得到靶球直径 d_L 和 d_R ,并计算两个靶球的球心距离 d_M 。重复进行 6 次测量,测量结果如表 2 所示。计算 d_L 和 d_R 与标准直径的差值,得到球径测量误差 e_L 和 e_R ;以激光跟踪仪的 6 次测量结果的均值 1 847.732 mm 作为球心距参考值,计算扫描数据拟合球心距相对参考值的误差 e_s 。得到测量误差分布如图 23 所示,图 23 中系统对球径的尺寸探测准确度高于 0.01 mm,在 1.8 m 范围内对球心距的测量准确度高于 0.05 mm,满足飞机蒙皮曲面检测的精度要求。

表 2 测量精度验证

Table 2 Verification of measurement accuracy mm

测量次数	球径 d_L	球径 d_R	球心距 d_s	球心距 d_M
第 1 次	22.233	22.222	1 847.732	1 847.781
第 2 次	22.228	22.231	1 847.731	1 847.765
第 3 次	22.229	22.219	1 847.735	1 847.778
第 4 次	22.224	22.220	1 847.732	1 847.769
第 5 次	22.227	22.217	1 847.729	1 847.766
第 6 次	22.234	22.220	1 847.731	1 847.775
平均值	22.230	22.221	1 847.732	1 847.772

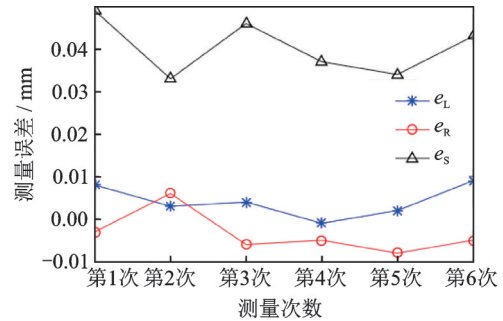


图 23 测量误差分布

Fig.23 Distribution of measurement error

5 结 论

本文提出了一个用于飞机蒙皮自动化测量的柔性测量系统及特征自适应的待测对象扫描规划方法,实现了大型曲面的三维测量数据自动化采集。对测量系统坐标关系进行建模分析,并提出了基于视觉的待测工件位姿估计方法。提出特征自适应的扫描规划方法,对扫描站位和扫描路径进行优化,实现了扫描效率的提升,同时可以对飞机蒙皮上的小尺寸特征保持较好的扫描完整性。在实际场景中对所提出方法进行了测试,从扫描效率与扫描完整性两个维度与人工扫描的结果进行了对比,并进一步设计了系统精度验证试验,验证了所提出的自动化测量方案替代手动扫描测量的可行性。

参考文献:

[1] 汪俊,李红卫.飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2020,52(3):353-362.
WANG Jun, LI Hongwei. Aircraft large-scale automation flexible measurement technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,

- 2020, 52(3): 353-362.
- [2] 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.
- [3] 孙彬, 王建华, 赫东锋, 等. 基于激光测量的航发叶片表面几何缺陷识别技术[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 594-599.
- SUN Bin, WANG Jianhua, HE Dongfeng, et al. Identification of aero-engine blade surface geometric defects with laser measurement[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 594-599.
- [4] EIKOTT D F, VELDHUIS S C. CAD-based sampling for CMM inspection of models with sculptured features[J]. Engineering with Computers, 2007, 23(3): 187-206.
- [5] SONG C K, KIM S W. Reverse engineering: Autonomous digitization of free-formed surfaces on a CNC coordinate measuring machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(7): 1041-1051.
- [6] JAE H, JUNG A W. Precision inspection system for aircraft parts having very thin features based on CAD/CAI intergration[J]. Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12: 442-449.
- [7] 金涨军, 李江雄, 俞慈君, 等. 大尺寸空间测量中转站误差分析与评估[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(4): 655-661.
- JIN Zhangjun, LI Jiangxiong, YU Cijun, et al. Registration error analysis and evaluation in large-volume metrology system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2015, 49(4): 655-661.
- [8] 杜福洲, 陈哲涵, 唐晓青. iGPS 测量场精度分析及其应用研究[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1737-1745.
- DU Fuzhou, CHEN Zhehan, TANG Xiaoqing. Precision analysis and application of iGPS survey field[J]. Journal of Aeronautics, 2012, 33(9): 1737-1745.
- [9] SHI Jinlong, SUN Zhengxing, BAI Suqin. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser rangefinder[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 14-23.
- [10] ZHANG Y, LIU W, LAN Zhiguang, et al. Global measurement method for large-scale components based on a multiple field of view combination[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017: 1-12.
- [11] JIANG T, CHENG X, CUI H, et al. Combined shape measurement based on locating and tracking of an optical scanner[J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(1): 1006-1019.
- [12] 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(5): 1037-1046.
- YU Hao, DU Fuzhou. Flexible inspection technology of large scale products based on combination measurement[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(5): 1037-1046.
- [13] 孟飙, 曲学军. 大尺寸复杂形状组合测量系统的全局标定与多视数据融合[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 2051-2060.
- MENG Biao, QU Xuejun. Global calibration and multi-view data fusion for combination measurement system of large complicate shapes[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(11): 2051-2060.
- [14] MAHMUD M, JOANNIC D, ROY M, et al. 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(4): 345-355.
- [15] 王鹏, 孙长库, 陶立. 最佳视角3-D激光扫描路径的自动确定方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(11): 1980-1983.
- WANG Peng, SUN Changku, TAO Li. Automatic determination method of 3-D laser scanning path with the best viewing angle[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2007, 47(11): 1980-1983.
- [16] DING L J, DAI S G, MU P A. CAD-Based path planning for 3D laser scanning of complex surface[J]. Procedia Computer Science, 2016, 92: 526-535.
- [17] MINH P N D, YANN Q, SYLVAIN L, et al. Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 629-643.
- [18] 林晶. 基于激光扫描的结构件测量轨迹规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- LIN Jing. Research on automatic measurement technology of components based on laser scanning technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [19] 艾小祥. 飞机机翼装配中的扫描路径规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- AI Xiaoxiang. Research on path planning of scanning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [20] 艾小祥, 俞慈君, 方强, 等. 基于遗传算法的机翼壁板扫描路径优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 448-456.
- AI Xiaoxiang, YU Cijun, FANG Qiang, et al. Optimization of scanning path of wing panel based on genetic algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2015, 49(3): 448-456.
- [21] FRANCISCO J R, RAFAEL M S, RAFAEL M C. Speeded up detection of squared fiducial markers[J]. Image and Vision Computing, 2018, 76: 38-47.
- [22] GARRIDO-JURADO S, MUÑOZ SALINAS R, MADRID-CUEVAS F J, et al. Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming[J]. Pattern Recognition, 2016, 51: 481-491.
- [23] 屈也频, 侯旺. 基于误差传播理论的PnP问题姿态精度分析[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 214-222.
- QU Yepin, HOU Wang. Attitude accuracy analysis of PnP based on error propagation theory[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 214-222.
- [24] VIEIRA M, SHIMADA K. Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing[J]. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22(8): 771-792.