



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Intelligent Manufacturing—Article

一种飞机装配用便携式非接触轮廓扫描系统

梁冰, 刘巍*, 刘坤, 周孟德, 张洋, 贾振元

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2020

Revised 25 July 2020

Accepted 20 September 2020

Available online 14 April 2021

关键词

飞机测试
三坐标测量
轮廓重建
自动扫描
扫描策略

摘要

在大型飞机装配过程中,三维轮廓扫描对于装配质量检测具有关键作用。为实现大型飞机零部件高反光曲面轮廓的扫描测量,本文提出一种兼顾精度与效率的非接触式自动化测量系统和方法。首先,以距离传感器辅助摄影测量,建立一种非接触式三维坐标复合测量系统,避免被测表面高反光对摄影测量精度的影响。同时,建立一种蕴含距离传感器一维测距信息与视觉全局转换关系的复合式坐标测量模型,高精度解算被测量点的三维坐标。其次,构建一种轮廓信息驱动的形面自动扫描方法和策略,在距离传感器有效量程内实现形面的非接触快速扫描与轮廓重建。最后,在某型号飞机平尾升降舵(尺寸约1760 mm × 460 mm)装配过程中对所提系统及方法进行试验与精度分析。实验表明:整个测量过程用时仅208 s,形面轮廓重建精度优于0.121 mm,因此,鉴于大型飞机装配过程中形面轮廓的高精度和高效率测量要求,所提系统及方法具有广阔应用前景。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在航空航天等高端装备制造过程中,大型零部件装配至关重要[1],其工作量往往达到整体制造过程的50%及以上[2–3]。此外,飞机零件尺寸大、装配关系复杂等严重制约核心部件的装配精度,需对核心部件的装配体进行定期检测。鉴于飞机制造过程中采用大量的大型曲面结构,装配精度难以精确控制,直接影响整机装配质量,因此对核心装配部件关键点及关键形面的检测极为重要。

在现代化先进制造[4–5]过程中,常采用激光跟踪仪、工业摄影测量、距离传感器等高精度设备进行复合测量,

建立数字孪生系统,进而指导装配进程。鉴于多种测量设备性能各异,其应用场合也呈现多元化。激光跟踪仪精度高[6–8],适用于飞机工装及飞机部件关键点和关键形面的线下定期检测。然而,激光跟踪仪采用光学方式进行逐点测量,严重制约仪器在狭小空间及在线检测等方面的测量性能。工业摄影测量[9–11]兼备高精度和高效率的优点,广泛应用于诸多领域,如加工制造及健康监测。然而,飞机装配过程中复杂工况严重干扰摄影测量环境,摄影测量难以实现狭小空间内关键点及关键形面的高精度检测。距离传感器[12–14]具有体积小、重量轻、精度高、响应快等优势,可实现高精度位移检测。然而,距离传感器获取的信息为一维距离量,无法满足实际测量过程中的

* Corresponding author.

E-mail address: Lw2007@dlut.edu.cn (W. Liu).

三维测量要求。因此，距离传感器通常与机械臂、三坐标测量仪等复合使用，进而实现空间几何信息的高精度测量。

鉴于飞机装配过程对关键点及关键形面测量精度、效率等要求严苛，因此，本文提出一种距离传感器与摄影测量复合的三维坐标测量方法，并研发便携式非接触轮廓扫描系统，以兼顾飞机装配过程中大型零部件关键点与关键形面的测量精度、效率、便捷性及成本。

本文其余部分结构如下：第2节综述了与本文内容相关的工作，第3节描述了距离传感器与摄影测量复合式三维坐标测量模型的建立方法，第4节阐述了轮廓信息驱动的形面自动扫描策略，第5节开展了测量实验及精度分析，第6节对本文工作进行总结。

2. 相关研究工作综述

多传感复合测量是满足高端装备制造过程中关键形面在线高精度、高效率检测的有效手段。相关领域内诸多学者已在多传感复合测量模型建立及自动化测量策略等方面开展了大量研究工作。

2.1. 三维坐标测量模型建立

三维坐标测量模型的研究工作主要集中于基于视觉、距离传感器、激光跟踪仪和机器人等，并利用设备的固有测量特性和空间几何约束关系等进行模型建立。

Lembono等[15]提出了一种基于机器人和激光测距仪的三维测量系统和校准方法，实验结果表明，该方法和系统将平面平均测量误差从0.53 mm减少至约0.23 mm；此外，该方法成本低廉、使用便捷。Kim等[16]提出了一种基于相机和激光传感器的新型非接触测量系统，实现远距离亚毫米级的姿态测量，并在30 m距离处对测量系统性能进行验证，准确度可达4 mm和0.5°，精确度可达0.7 mm和0.3°。Wu和Ren[17]提出了一种利用三维坐标数据的手眼标定方法，该方法通过优化坐标转换误差实现机器人三维运动学基准坐标的高精度解算，并确定基准坐标系的未知参数。An等[18]开发了一种新型全向三维激光测距系统，该系统由激光测距仪、相机和旋转平台组成，经校准后，平均误差可达0.9875像素，在室内和室外场景测试中稳定性良好。Kim等[19]结合一维激光传感器和相机，开发了一种低成本激光探测器，可在30 m范围内测量六自由度位姿；误差分析表明，位置测量误差优于3 mm，姿态测量误差优于1°。

2.2. 三维扫描方法及策略

对于飞机装配过程中大尺寸形面检测，与传统的逐点检测相比，自动扫描和多点同步测量可大幅提升三维点云数据的测量精度及效率。目前，扫描方法研究主要集中于三坐标测量仪和测量头、机器人和距离传感器、机器人和相机、相机和激光测量仪等的复合测量。

Zhang和Tang[20]提出了一种基于三坐标测量仪和测量头的任意形面自动检测方法，同时考虑了被测形面几何信息和测量头运动能力，以最大化检测效率，使得总检测时间减少为原来的1/7以上。Huang等[21]提出了一种三维自动成像的机器人系统，该系统采用深度相机和机器人捕捉形面三维点云，并根据形面轮廓自动确定测量范围和测量路径；实验结果表明，该系统在形面三维重建中具有良好性能。Macleod等[22]提出了一种自动化大范围遥感测厚系统，该系统可在15 min内对标称厚度为10 mm的2 m²碳钢样品进行测量，厚度测量误差最小可达0.21 mm，大幅提高了大尺寸形面的检测效率。Palomer等[23]提出了一种基于线激光投影仪和相机的水下激光扫描仪，0.5~1.2 m量程内的标定误差低于1 mm；实验表明，该系统在空气和水下的平均误差分别达到0.44 mm和0.98 mm，标准偏差可达0.35 mm和0.72 mm。

2.3. 讨论

形面测量方法包括接触式和非接触式扫描两种。激光跟踪仪和三坐标测量仪等接触式测量通常采用测量头接触被测件，并获取形面的三维轮廓信息；然而，对于表面质量要求严苛的零件，接触式测量将降低被测表面质量，尤其在曲面自动测量过程中，测量头将不可避免地过度接触形面或与形面分离，需进行人工干预。工业摄影测量和激光扫描等非接触式测量主要采用光学手段进行轮廓扫描，然而，对于高反光形面，图像或光条极易出现过度曝光，从而降低测量精度。

本文综合利用接触和非接触式测量方法优势，提出了一种非接触距离传感器与工业摄影测量结合的复合式测量方法，满足了飞机装配过程中大尺寸形面非接触测量需求，并避免了被测形面高反光对测量精度的影响。此外，还提出了一种轮廓信息驱动的形面自动扫描策略，以避免在机翼、尾翼、蒙皮等复杂曲率形面测量过程中，距离传感器测量头触碰被测表面或超出传感量程。综上所述，本文所提出的方法有利于实现飞机装配过程中大尺寸形面的高精度、高效率自动测量。

3. 三维坐标复合测量模型

工业摄影测量具备高精度和高效等优势, 可对大尺寸形面进行快速检测。此外, 距离传感器体积小、响应快、灵敏度高, 可在狭小空间内实现高精度距离检测。因此, 面向飞机装配过程中测量范围大、被测关键点及关键形面数量多、测量空间狭小等严苛需求, 本文采用距离传感器和摄影测量结合的复合式测量方法, 利用距离传感器在狭小空间内的高精度测距能力及摄影测量大尺寸快速测量优势, 实现飞机零部件上关键点与关键形面的跨尺度检测。

基于距离传感器与摄影测量的复合式测量模型如图1所示。

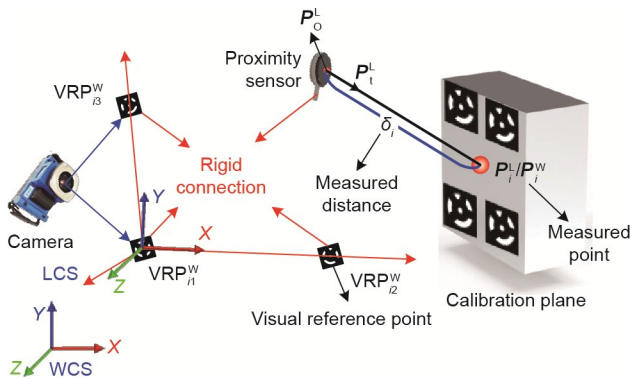


图1. 三维坐标测量模型原理。WCS: 世界坐标系 (world coordinate system); LCS: 局部坐标系 (local coordinate system); P_0^L : LCS下距离传感器测量原点; P_t^L : LCS下距离传感器单位位移矢量; P_i^L : LCS下第*i*次测量过程中测量点的三维坐标; P_i^W : WCS下第*i*次测量过程中测量点的三维坐标; VRP_{il}^W ($l=1,2,3$): WCS下第*i*次测量过程中第*l*个视觉参考点坐标; δ_i : 第*i*次测量过程中距离传感器的测量距离; i : 第*i*次测量; l : 视觉参考点编号。

首先, 基于相机建立世界坐标系 (world coordinate system, WCS)。然后, 在世界坐标系下, 采用摄影测量对视觉参考点 (visual reference points, VRP) 进行测量。由于距离传感器与视觉参考点采用刚性连接方式, 因此距离传感器与视觉参考点之间的几何位置关系恒定。进而, 通过获取视觉参考点的三维坐标信息和距离传感器的测距信息, 即可解算测量点的三维空间坐标。以下, 对三维测量模型的建立进行详细介绍。

如图1所示, 在第*i*次测量过程中, 获取世界坐标系下的视觉参考点三维坐标信息和每个距离传感器测量距离信息。进而, 测量信息与世界坐标系下测量点坐标的关系可描述为:

$$P_i^W = h(VRP_{il}^W, \delta_i) \quad (1)$$

式中, h 表示 P_i^W 、 VRP_{il}^W 、 δ_i 之间的函数关系; P_i^W 代表第

i 次测量过程中世界坐标系下的测量点坐标; VRP_{il}^W ($l=1,2,3$)代表第*i*次测量过程中世界坐标系下的第*l*个视觉参考点坐标; δ_i 代表第*i*次测量过程中距离传感器的测量距离; i 为测量次数, l 为视觉参考点编号。

然后, 以 VRP_{i1}^W 为局部坐标系 (local coordinate system, LCS) 原点, 以 VRP_{il}^W ($l=1,2,3$)建立局部坐标系的XY平面, 并假设 VRP_{i2}^W 在局部坐标系X轴正方向、 VRP_{i3}^W 在Y轴正方向, 从而确定局部坐标系的唯一性。因此, 局部坐标系下的视觉参考点坐标 (VRP_{il}^L) 可表示为:

$$VRP_{i1}^L = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

$$VRP_{i2}^L = [1 \ 0 \ 0]^T \cdot \|VRP_{i2}^W - VRP_{i1}^W\| \quad (3)$$

$$VRP_{i3}^L = [\cos \theta \ \sin \theta \ 0]^T \cdot \|VRP_{i3}^W - VRP_{i1}^W\| \quad (4)$$

式中, θ 代表 $VRP_{i3}^W - VRP_{i1}^W$ 与 $VRP_{i2}^W - VRP_{i1}^W$ 之间的夹角。

进而, 局部坐标系下测量模型的控制向量 e_m^L ($m=1,2,3$)可表示为:

$$e_{i2}^L = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (5)$$

$$e_{i3}^L = VRP_{i3}^L / \|VRP_{i3}^L\| \quad (6)$$

$$e_{i1}^L = e_{i2}^L \otimes e_{i3}^L \quad (7)$$

式中, n 是控制向量的数量。

在局部坐标系下, 第*i*次测量过程中测量点的三维坐标 P_i^L 与传感器测量原点 (probe base point, PBP) 和传感器单位位移矢量 (unit displacement vector, UDV) 有如下关系:

$$P_i^L = P_0^L + \delta_i P_t^L \quad (8)$$

式中, P_0^L 代表距离传感器测量原点; P_t^L 代表距离传感器单位位移矢量。

进一步地, 传感器测量原点 P_0^L 和传感器单位位移矢量 P_t^L 可表示为控制向量 e_m^L 的函数。

$$P_0^L = [e_{i1}^L \ e_{i2}^L \ e_{i3}^L] \cdot [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T \quad (9)$$

式中, λ_k ($k=1,2,\dots,5$)为三维测量模型的参数。

$$P_t^L = [\lambda_4 \ \lambda_5 \ 1]^T / \|\lambda_4 \ \lambda_5 \ 1\| \quad (10)$$

将公式(9)和公式(10)代入公式(8), 可得:

$$P_i^L = [e_{i1}^L \ e_{i2}^L \ e_{i3}^L] \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} + \frac{[\lambda_4 \ \lambda_5 \ 1]^T}{\|\lambda_4 \ \lambda_5 \ 1\|} \cdot \delta_i \quad (11)$$

通过世界坐标系及局部坐标系下视觉参考点的坐标转换, 可解算两坐标系间的旋转矩阵 R_i 及平移矩阵 T_i , 且满足以下关系。

$$VRP_{il}^W = R_i \cdot VRP_{il}^L + T_i \quad (12)$$

进而, 世界坐标系下测量点坐标可表示为:

$$\mathbf{P}_i^W = \mathbf{R}_i \left[\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{i1}^L & \mathbf{e}_{i2}^L & \mathbf{e}_{i3}^L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} + \frac{\begin{bmatrix} \lambda_4 & \lambda_5 & 1 \end{bmatrix}^T}{\|\begin{bmatrix} \lambda_4 & \lambda_5 & 1 \end{bmatrix}\|} \cdot \delta_i \right] + \mathbf{T}_i \quad (13)$$

采用具备视觉参考点信息的标定平面对三维坐标测量模型参数 $\lambda_k(k=1,2,\dots,5)$ 进行解算。利用标定平面上的视觉参考点计算世界坐标系下的标定平面方程 S_i^W ，进而，测量点与标定平面之间的几何约束关系可表示为：

$$S_i^W(\mathbf{P}_i^W) = 0 \quad (14)$$

进一步地，构建以下优化问题：

$$\min \|\mathbf{S}_i^W(\mathbf{P}_i^W)\| \rightarrow 0 \quad (15)$$

最后，通过优化函数获取以上优化问题的最优解 $\lambda_k^*(k=1,2,\dots,5)$ ，并将其代入公式(13)，测量模型可最终建立为：

$$\mathbf{P}_i^W = \mathbf{R}_i \left[\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{i1}^L & \mathbf{e}_{i2}^L & \mathbf{e}_{i3}^L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1^* \\ \lambda_2^* \\ \lambda_3^* \end{bmatrix} + \frac{\begin{bmatrix} \lambda_4^* & \lambda_5^* & 1 \end{bmatrix}^T}{\|\begin{bmatrix} \lambda_4^* & \lambda_5^* & 1 \end{bmatrix}\|} \cdot \delta_i \right] + \mathbf{T}_i \quad (16)$$

4. 轮廓信息驱动的三维形面自动扫描策略

在飞机装配质量监测过程中，上述三维坐标测量模型具有以下两种应用情形：一是将距离传感器固定在特定位置进行三维坐标监测，二是手持距离传感器进行形面轮廓扫描。对于第二种情形，为提高扫描效率和准确性，可设计一种特殊的测量头结构，并安装多个距离传感器，从而在单次测量中获取更多测距信息；此外，为实现快速、稳定的自动化测量，可将测量头安装至机械臂，并设计一种自动化扫描策略。该策略包含单次测量过程中形面重建方法、扫描过程中的轮廓信息更新方法以及轮廓信息驱动的自动化扫描方法。

4.1. 单次测量过程中形面重建方法

在单次测量过程中，可采用多个距离传感器获取测距信息，以提高扫描过程的效率和准确性。

如图2所示，根据测量点 $\mathbf{P}_{i1}^W, \mathbf{P}_{i2}^W, \dots, \mathbf{P}_{ij}^W$ 可将形面 S_i^W 重建为：

$$S_i^W = f_i(\mathbf{P}_{i1}, \mathbf{P}_{i2}, \dots, \mathbf{P}_{ij}) \quad (17)$$

式中， S_i^W 是根据第 i 次测量信息对形面轮廓的重建方程； \mathbf{P}_{ij}^W 代表在世界坐标系下第 i 次测量过程中第 j 个测量点坐标； f_i 代表测量点坐标 $\mathbf{P}_{i1}^W, \mathbf{P}_{i2}^W, \dots, \mathbf{P}_{ij}^W$ 向重建方程 S_i^W 的映射关系。

为便于指定自动扫描过程中的传感器位置，定义单次

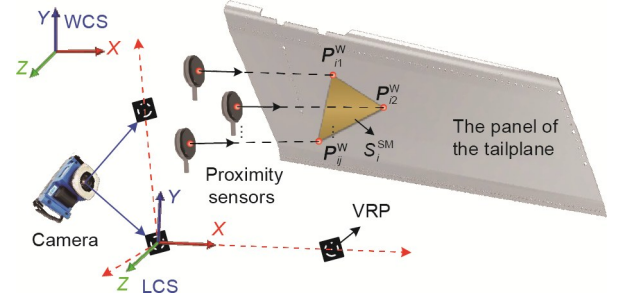


图2. 基于单次测量的形面重建原理。 S_i^SM ：根据第 i 次测量信息对形面轮廓的重建方程； \mathbf{P}_{ij}^W ：WCS下第 i 次测量过程中第 j 个测量点坐标； j ：单次测量过程中的第 j 个测量点。

测量过程中的测量中心及测量矢量。

$$\mathbf{c}_i^SM = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathbf{P}_{ij}^W \quad (18)$$

式中， \mathbf{c}_i^SM 为测量中心坐标； m 代表单次测量过程中的测量点数量。

$$\mathbf{n}_i^SM \Big|_{\mathbf{c}_i^SM} = g_i(\mathbf{P}_{i1}^W, \mathbf{P}_{i2}^W, \dots, \mathbf{P}_{ij}^W) \quad (19)$$

式中， $\mathbf{n}_i^SM \Big|_{\mathbf{c}_i^SM}$ 为在测量中心 \mathbf{c}_i^SM 处的测量矢量； g_i 代表测量点坐标 $\mathbf{P}_{i1}^W, \mathbf{P}_{i2}^W, \dots, \mathbf{P}_{ij}^W$ 向测量矢量 $\mathbf{n}_i^SM \Big|_{\mathbf{c}_i^SM}$ 的映射关系。

因此在第 i 次测量过程中，需计算形面重建方程 S_i^SM 、测量中心 \mathbf{c}_i^SM 以及测量矢量 $\mathbf{n}_i^SM \Big|_{\mathbf{c}_i^SM}$ ，并在第 $i+1$ 次测量过程中进行更新计算。

4.2. 基于多次测量的轮廓信息更新方法

在第 i 次测量过程中，形面轮廓方程 S_i^SM 已采用上述方法进行重建，然而，单次测量结果无法满足测量范围及测量精度的严格要求。因此，需采用多次测量对单次测量结果进行反复更新。

如图3所示，在第一次测量过程中，根据单次测量形面重建原理可将形面重建为 S_1^SM ，现将基于多次测量形面重建原理解算的方程定义为 S_1^MM ，则在第一次测量过程中， S_1^MM 与 S_1^SM 相同，有：

$$S_1^MM = F_1(S_1^SM) = S_1^SM \quad (20)$$

式中， F_1 代表 S_1^SM 向 S_1^MM 的映射关系。

在第二次测量过程中，单次测量原理下的形面重建结果为 S_2^SM ，同时，基于多次测量形面重建原理，根据前两次测量结果，可将形面重建为 S_2^MM ，有：

$$S_2^MM = F_2(S_1^MM, S_2^SM) \quad (21)$$

式中， F_2 代表 S_1^MM, S_2^SM 向 S_2^MM 的映射关系。

因此，进行 i 次测量后，根据单次测量的形面重建结果 S_1^SM 至 S_i^SM ，形面可重建为 S_i^MM ，有：

$$S_i^MM = F_i(S_{i-1}^MM, S_i^SM) \quad (22)$$

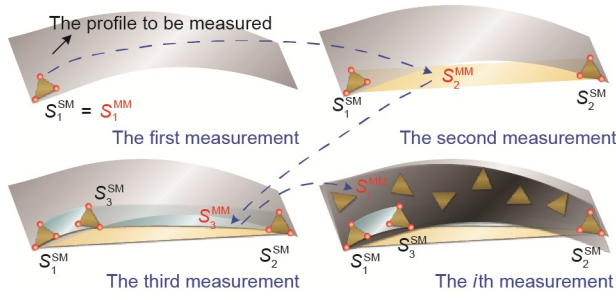


图3. 基于多次测量的形面重建原理。\$S_i^{MM}\$: 根据 \$S_1^{SM}\$ 至 \$S_i^{SM}\$ 多次测量结果的轮廓重建方程。

式中, \$F_i\$ 代表 \$S_{i-1}^{MM}\$、\$S_i^{SM}\$ 向 \$S_i^{MM}\$ 的映射关系。

在轮廓信息更新过程中, 形面 \$S_i^{MM}\$ 的测量中心 \$\mathbf{c}_i^{SM}\$ 及其测量矢量 \$\mathbf{n}_i^{MM}|_{\mathbf{c}_i^{SM}}\$ 同步更新, 有:

$$\mathbf{n}_i^{MM}|_{\mathbf{c}_i^{SM}} = G_i(S_i^{MM}, \mathbf{c}_i^{SM}) \quad (23)$$

式中, \$G_i\$ 代表 \$S_i^{MM}\$、\$\mathbf{c}_i^{SM}\$ 向 \$\mathbf{n}_i^{MM}|_{\mathbf{c}_i^{SM}}\$ 的映射关系。

4.3. 轮廓信息驱动的自动化扫描方法

为实现自动化扫描, 扫描路径规划策略不可或缺, 包括扫描路径趋势预测、扫描路径断点定义及扫描终点定义。

如图4所示, 采用回旋式路径从外向内对形面进行扫描。根据公式(18), 将扫描过程中第 \$I\$ 个扫描回路中第 \$J\$ 条测量线上的第 \$K\$ 个扫描中心定义为 \$s_{IJK}\$。

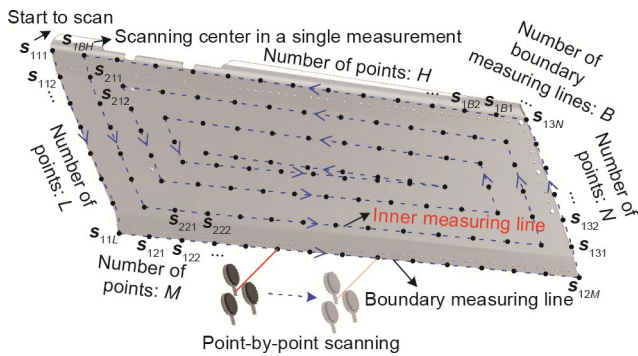


图4. 自动化扫描策略。\$B\$: 边界测量线的数量; \$L\$、\$M\$、\$N\$、\$H\$: 每条测量线上的扫描中心数量。

首先, 手动扫描边界测量线, 定义边界测量线的数量为 \$B\$, 每条测量线上的扫描中心的数量分别记为 \$L, M, N, \dots, H\$, 同时可解算边界测量线上的扫描中心 \$(s_{IJK})\$ 坐标。

然后, 轮廓信息驱动的自动化扫描过程从 \$s_{211}\$ 开始, 并将其预测为 \$s'_{211}\$, 有:

$$s'_{211} = s_{210} + (s_{112} - s_{111}) \quad (24)$$

$$s_{210} = s_{1BH} \quad (25)$$

进一步地, 扫描路径中各点的测量中心可预测为公式(24)的一般形式:

$$s'_{IJK} = s_{IJ(K-1)} + (s_{(I-1)J(K+1)} - s_{(I-1)JK}) \quad (26)$$

同时, 测量矢量可预测为:

$$\mathbf{n}'_{IJK}|_{s'_{IJK}} = G_{IJK}(S_{IJK}^{MM}) \quad (27)$$

式中, \$S_{IJK}^{MM}\$ 代表基于 \$s_{IJK}\$ 之前多次测量的形面重建方程, 并且通过对形面轮廓信息的反复更新, 可不断地预测下一测量点的测量中心和测量矢量, 进而保障测量点的有效性。

对于扫描路径断点, 如第 \$J\$ 条测量线与下一测量线之间的断点, 则定义为在第 \$L-2I+2\$ 个测量点处, 并且定义某条测量线上的测量点少于三个时, 便不再对该测量线进行检测。

对于扫描终点的定义, 则是当某一测量回路中测量线条少于三个时, 扫描测量终止。自动化扫描测量伪代码如图5所示。

Algorithm	Predict the next scanning center and scanning vector
Input	\$B\$: number of boundary measuring lines \$L, M, N, \dots, H\$: number of scanning centers on each boundary measuring line
Output	\$s'_{IJK}, \mathbf{n}'_{IJK} _{s'_{IJK}}\$
1:	Initialization: \$I = 1, J = B, K = H, \text{flag} = B\$ (number of the sides left)
2:	While \$\text{flag} \ge 3\$, do
3:	\$K + 1\$
4:	Switch \$J\$
5:	Case 1:
6:	If \$K > L - 2 \{ s_{I20} = s_{I1(K-1)}, J = 2, K = 1, L - = 2 \}\$
7:	If \$L < 3 \{ \text{flag} - = 1 \}\$
8:	Case 2:
9:	If \$K > M - 2 \{ s_{I30} = s_{I2(K-1)}, J = 3, K = 1, M - = 2 \}\$
10:	If \$M < 3 \{ \text{flag} - = 1 \}\$
11:	Case 3:
12:	If \$K > N - 2 \{ s_{I40} = s_{I3(K-1)}, J = 4, K = 1, N - = 2 \}\$
13:	If \$N < 3 \{ \text{flag} - = 1 \}\$
14:	...
15:	Case \$B\$:
16:	If \$K > H - 2 \{ s_{IH0} = s_{I(H-1)(K-1)}, J = 1, K = 1, H - = 2 \}\$
17:	If \$H < 3 \{ \text{flag} - = 1 \}\$
18:	End switch
19:	\$s_{IJK} = s_{IJ(K-1)} + (s_{(I-1)J(K+1)} - s_{(I-1)JK})\$
20:	\$\mathbf{n}'_{IJK} _{s'_{IJK}} = G_{IJK}(S_{IJK}^{MM})\$
21:	End while

图5. 自动化扫描程序伪代码。

5. 实验

面向飞机装配过程中平尾升降舵形面检测, 基于本文提出的便携式非接触形面轮廓扫描系统开展了相关实验。扫描系统主要配置如下:

(1) 采用KD2306-4SB型距离传感器(美国Kaman公

司) 获取传感器至升降舵表面的距离信息; 该传感器分辨率高达 $0.4 \mu\text{m}$, 频响达 50 kHz , 且体积小, 仅 $\Phi 22.2 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ 。在实际测量过程中, 采用三个传感器同时测量, 保障测量头结构紧凑的同时, 大幅提高扫描效率。此外, KD2306-4SB 型传感器采用涡流测距原理, 可对升降舵表面进行非接触测量, 且不受表面强反光影响。

(2) 设计一种可同时安装三个距离传感器的扫描头结构, 并布置多个视觉参考点, 扫描头可手持使用或安装至机器臂使用。此外, 扫描头采用低反射率材料, 确保视觉参考点坐标信息的高精度获取。

(3) 采用 MPS/M20 型号相机 (郑州辰维科技股份有限公司) 高精度测量视觉参考点的三维坐标, 精度高达 $8 \mu\text{m} + 8 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$, 且频响达 20 Hz 。同时, 采用相机对光学靶标进行测量, 以建立世界坐标系。

(4) 采用 KR10 R1420 型机械臂 (德国 KUKA 公司), 并在末端安装扫描头, 实现自动化扫描过程。机械臂六轴移动速度超过每秒 200° , 工作半径可达 1420 mm 。

系统整体布局如图 6 所示。

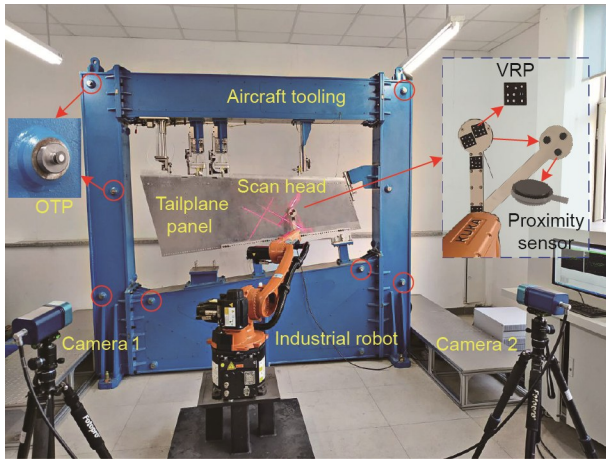


图 6. 便携式非接触扫描系统。

5.1. 三维坐标测量模型建立

布置扫描头结构, 将三个距离传感器与三个视觉参考点安装至扫描头。为建立三维坐标测量模型, 采用标定平面 (平面度加工误差低于 $3 \mu\text{m}$) 对测量头进行标定, 以获取模型参数。标定过程如图 7 所示。

首先, 采用相机测量标定平面上的视觉参考点以确定

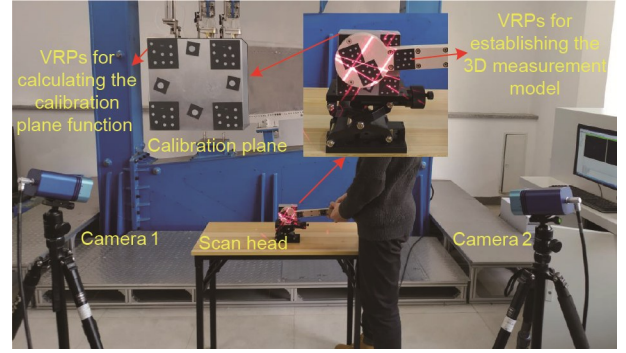


图 7. 三维坐标测量模型建立及模型参数标定。

标定平面方程; 其次, 手持扫描头对标定平面进行多次测量, 同时获取距离传感器至标定平面的距离信息与扫描头上视觉参考点三维坐标信息; 最后, 可解算公式 (13) 中模型参数 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, 5)$ 。标定结果如表 1 所示。

将 e_m^l 和 λ_k 代入公式 (11), 可解算出局部坐标系下测量点的三维坐标。进而通过世界坐标系下视觉参考点坐标 VRP_i^w 和局部坐标系下视觉参考点坐标 VRP_i^l , 利用公式 (12) 可解算旋转矩阵 R_i 和平移矩阵 T_i 。最后, 世界坐标系下的三维坐标测量模型可通过公式 (13) 建立。

5.2. 平尾升降舵形面重建

目前, 形面重建方法主要采用激光跟踪仪进行逐点测量以及采用相机进行摄影测量。激光跟踪仪精度高, 但摄影测量速度快, 而本研究的目标旨在提出一种兼顾高精度与高效率的扫描方法和系统, 且同时考虑自动化性能及成本。

本文在第 3 节和第 4 节详细介绍了自动化扫描策略, 并在图 6 中给出扫描系统布局。为提高形面重建准确性, 在扫描过程中应尽可能多地获取测量点坐标。然而, 为兼顾扫描效率, 测量点数量不宜设置太大。值得注意的是, 扫描头可在 50 mm 直径内同时测量三个点, 则扫描间隔最终设计为 100 mm 。图 8 为某型号平尾升降舵 (尺寸约 $1760 \text{ mm} \times 460 \text{ mm}$) 形面重建结果。

5.3. 准确性和实用性分析

本节将本文所提出的方法与激光跟踪仪和摄影测量方法进行比较试验。与飞机实际装配现场相同, 采用光学靶标与激光跟踪仪对平尾升降舵形面进行逐点测量; 此外,

表 1 模型参数标定结果

Number of the sensors	VRP_i^l	Control vectors e_m^l	Model parameters of the sensors $\lambda_k (k=1, 2, \dots, 5)$
1	$\text{VRP}_{i1}^l = [0, 0, 0]$	$e_{i1}^l = [1, 0, 0]$	$[2.648, 31.885, 16.979, 0.138, 1.081]$
2	$\text{VRP}_{i2}^l = [184.711, 0, 0]$	$e_{i2}^l = [0.7152, 0.6989, 0]$	$[3.559, 24.382, 17.479, 0.213, -1.421]$
3	$\text{VRP}_{i3}^l = [23.435, 22.902, 0]$	$e_{i3}^l = [0, 0, 1]$	$[2.648, 31.885, 16.979, 0.137, 1.081]$

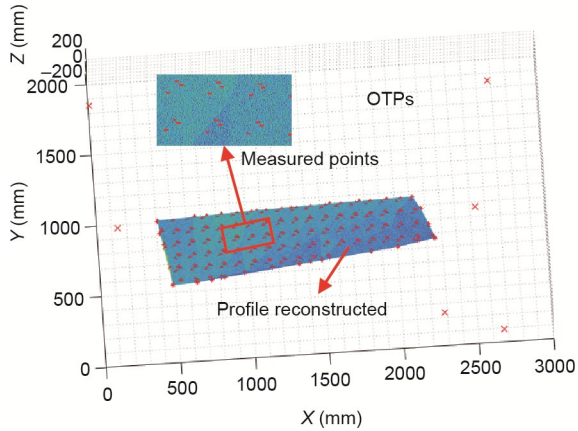


图 8. 基于本文所提方法及自动扫描系统的平尾升降舵形面重建。

在升降舵表面布置摄影测量点并进行摄影测量，最后将两种测量方式的测量结果统一至世界坐标系进行比较，测量系统与测量结果如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出，激光跟踪仪和本文所提出的方法的扫描间距相对较小，而对于摄影测量，因测量点需更大的布置空间，其扫描间距相对较大，重建精度也会受到一定制约。

以激光跟踪仪测量结果为标准值，对本文所提出的方法和摄影测量方法的形面重建误差进行比较，如图 10 所示。

本文在准确性、效率和自动化水平方面对以上几种测量方法进行比较，并记录扫描过程的操作步骤、测量点数量、扫描用时以及形面重建精度。鉴于激光跟踪仪是公认的高精度三维坐标测量仪器，因此本文采用激光跟踪仪测量结果作为标准值。文中使用的 Leica AT960 型激光跟踪仪精度为 $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ，在 4 m 范围内，测量精度高达 0.039 mm。以上测量方法的各项指标如表 2 所示。

从表 2 可以看出，激光跟踪仪测量过程耗时最长，但精度最高。因本文采用激光跟踪仪测量结果作为标准值，所以测量点数量较多，形面重建精度较高。在效率方面，在激光跟踪仪测量过程中，人工测量 456 个点，耗时约 985 s，每个点平均测量时间为 2.16 s。与基于激光跟踪仪测量相比，摄影测量共 40 个点，耗时 341 s，平均每个点耗时 8.53 s。然而用本文提出的方法扫描 349 个点，耗时仅 208 s，每个测量点耗时约 0.60 s。在精度方面，因本文提出的方法效率高、获取测量点信息量大，精度明显优于同等设备条件下的摄影测量方法。本文提出的方法的形面重建误差为 0.003~0.378 mm，平均误差为 0.121 mm。综上所述，本文提出的方法和系统兼顾飞机装配过程中测量精度及效率的严格要求，可对大尺寸形面进行非接触自动化快速检测。

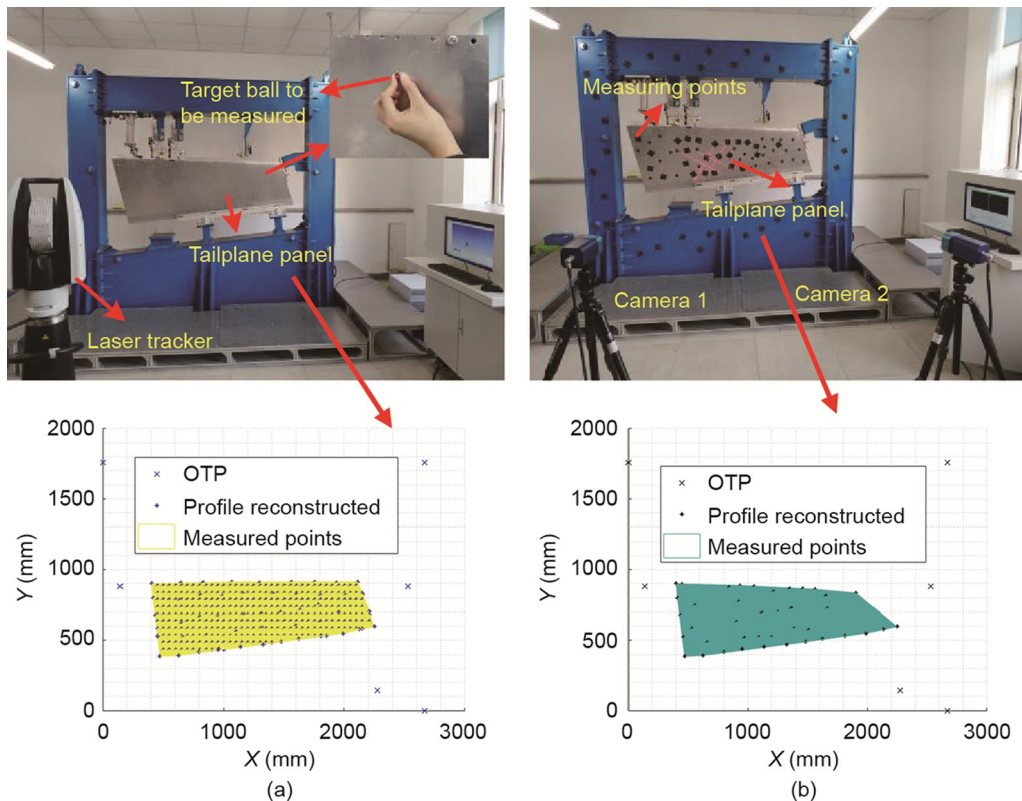


图 9. 基于激光跟踪仪 (a) 和摄影测量 (b) 的平尾升降舵形面重建。

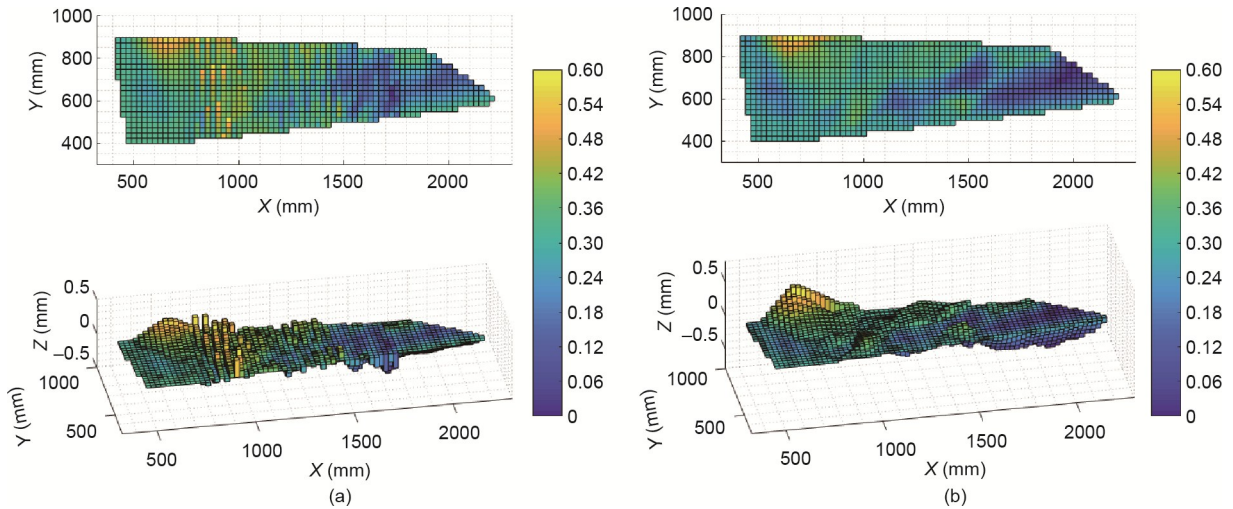


图10. 准确度测试。(a) 基于本文方法的形面重建误差；(b) 基于摄影测量方法的形面重建误差。

表2 准确性和实用性比较结果

Index	Task steps	Quantity of measured points	Duration (s)	Duration per point (s)	Accuracy	Automation
Laser tracker	Point-by-point measurement	456	≈ 985	2.16	Maximum: 0.039 mm in the range of 4 m (as the benchmark)	No
Photogrammetry	Add the measurement points; photograph to measure all the points, and remove the measurement points	40	≈ 341	8.53	Maximum: 0.552 mm Minimum: 0.000 mm Mean: 0.184 mm	No
Method in this paper	Scanning the boundary measurement line and automated scanning	349	≈ 208	0.60	Maximum: 0.378 mm Minimum: 0.003 mm Mean: 0.121 mm	Yes

6. 结论

本文旨在提出一种满足大尺寸形面的高精度、高效率、自动化轮廓重建的测量方法及系统，目前现有检测系统主要基于激光跟踪仪、三坐标测量仪和摄影测量，均难以满足上述要求。与现有方法及系统相比，本文提出的距离传感器与摄影测量复合式自动扫描系统采用一种新颖的测量模式，通过结合多种传感设备的测量优势，建立复合式非接触三维测量模型，在多点同时测量基础上，以轮廓信息实时规划扫描路径，极大地提高了检测精度与效率。因此，该方法特别适用于对表面质量要求高的大尺寸零部件形面测量，如飞机或汽车面板、蒙皮和发动机叶片等。最后，对本方法及系统在某型号飞机平尾升降舵（尺寸约 1760 mm × 460 mm）形面原位扫描过程中进行了测试，受益于系统的操作便捷性及自动化程度，扫描过程仅需 208 s；同时，对测量结果进行了精度分析，形面重建误差低于 0.378 mm，平均误差低于 0.121 mm。因此本文所提出的方法及系统可为大型飞机装配部件的检测提供强大

的数据支撑。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目(2018YFA07033 04)、国家自然科学基金项目(U1808217)、国家自然科学基金青年项目(51905077)和辽宁省振兴人才计划(XLYC1807086)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Bing Liang, Wei Liu, Kun Liu, Mengde Zhou, Yang Zhang, and Zhenyuan Jia declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Peng G, Sun Y, Xu S. Development of an integrated laser sensors based measurement system for large-scale components automated assembly

- application. *IEEE Access* 2018;6:45646–54.
- [2] McKenna V, Jin Y, Murphy A, Morgan M, Fu R, Qin X, et al. Cost-oriented process optimisation through variation propagation management for aircraft wing spar assembly. *Robot Comput Integr Manuf* 2019;57:435–51.
- [3] Shah A, Blumberg L, Shah J. Planning for manipulation of interlinked deformable linear objects with applications to aircraft assembly. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2018;15(4):1823–38.
- [4] Bao Y, Chen Z, Wei S, Xu Y, Tang Z, Li H. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring. *Engineering* 2019;5(2):234–42.
- [5] Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman ST. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. *Engineering* 2017;3(5):616–30.
- [6] Schmitt RH, Peterek M, Morse E, Knapp W, Galetto M, Härtig F, et al. Advances in large-scale metrology—review and future trends. *CIRP Ann* 2016; 65(2):643–65.
- [7] Pérez Muñoz P, García JAA, Mazo JS. Analysis of the initial thermal stabilization and air turbulences effects on laser tracker measurements. *J Manuf Syst* 2016;41:277–86.
- [8] Lei P, Zheng L. An automated in-situ alignment approach for finish machining assembly interfaces of large-scale components. *Robot Comput Integr Manuf* 2017;46:130–43.
- [9] Spencer Jr BF, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering* 2019;5(2):199–222.
- [10] Lee T, Kim C, Cho DD. A monocular vision sensor-based efficient SLAM method for indoor service robots. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(1): 318–28.
- [11] Xu Y, Gao F, Jiang X. Performance analysis and evaluation of geometric parameters in stereo deflectometry. *Engineering* 2018;4(6):806–15.
- [12] Cervera A, Ezra O, Kuperman A, Peretz MM. Modeling and control of magnetic actuation systems based on sensorless displacement information. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(6):4849–59.
- [13] Beyca OF, Rao PK, Kong Z, Bukkapatnam STS, Komanduri R. Heterogeneous sensor data fusion approach for real-time monitoring in ultraprecision machining (UPM) process using non-parametric Bayesian clustering and evidence theory. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2016;13(2):1033–44.
- [14] Lee KM, Hao B, Li M, Bai K. Multiparameter eddy-current sensor design for conductivity estimation and simultaneous distance and thickness measurements. *IEEE Trans Ind Inform* 2019;15(3):1647–57.
- [15] Lembono TS, Suárez-Ruiz F, Pham QC. SCALAR: simultaneous calibration of 2D laser and robot kinematic parameters using planarity and distance constraints. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2019;16(4):1971–9.
- [16] Kim YK, Kim KS, Kim S. A portable and remote 6-DOF pose sensor system with a long measurement range based on 1D laser sensors. *IEEE Trans Ind Electron* 2015;62(9):5722–9.
- [17] Wu L, Ren H. Finding the kinematic base frame of a robot by hand–eye calibration using 3D position data. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2017;14(1): 314–24.
- [18] An Y, Li B, Hu H, Zhou X. Building an omnidirectional 3D color laser ranging system through a novel calibration method. *IEEE Trans Ind Electron* 2019; 66(11):8821–31.
- [19] Kim YK, Kim Y, Jung YS, Jang IG, Kim KS, Kim S, et al. Developing accurate long-distance 6-DOF motion detection with one-dimensional laser sensors: three-beam detection system. *IEEE Trans Ind Electron* 2013;60(8):3386–95.
- [20] Zhang Y, Tang K. Automatic sweep scan path planning for five-axis free-form surface inspection based on hybrid swept area potential field. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2019;16(1):261–77.
- [21] Huang Q, Lan J, Li X. Robotic arm based automatic ultrasound scanning for three-dimensional imaging. *IEEE Trans Ind Inform* 2019;15(2):1173–82.
- [22] Macleod CN, Dobie G, Pierce SG, Summan R, Morozov M. Machining-based coverage path planning for automated structural inspection. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2018;15(1):202–13.
- [23] Palomer A, Ridao P, Forest J, Ribas D. Underwater laser scanner: ray-based model and calibration. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 2019;24(5):1986–97.