



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

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



Research
Intelligent Manufacturing—Article

基于自动原位校准的大型飞机构件装配过程三维微位移监测系统

贾振元, 梁冰, 刘巍*, 刘坤, 马建伟

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 April 2020

Revised 20 July 2020

Accepted 21 February 2021

Available online 2 November 2021

关键词

飞机制造

装配

校准

状态监测

位移测量

摘要

三维(3D)微位移监测在大型飞机装配中起着至关重要的作用。本文提出了一种广泛适用的基于接近传感器的高精度在线3D微位移监测方法和系统,以及相应的原位校准方法,可应用于飞机装配过程中遇到的各种极端工作条件,如紧凑和遮挡的空间。首先建立了一个3D监测模型,仅基于接近传感器测量的一维距离实现3D微位移监测,该模型涉及传感器外部参数,如测量原点(PBP)和单位位移矢量(UDV)。然后,结合空间变换原理和加权优化校准方法,获得高精度外部参数。最后,针对尾翼装配过程开展了校准和监测实验。PBP的校准精度在X、Y方向优于 $\pm 10 \mu\text{m}$,在Z方向优于 $\pm 2 \mu\text{m}$,UDV的校准精度优于 0.07° 。此外,3D微位移监测系统的精度可达到 $\pm 15 \mu\text{m}$ 。总体而言,本文为基于接近传感器的3D微位移监测的建模和校准提供了新的见解,并为飞机装配过程中紧凑空间内的几何测量提供了一种高精度、高效率、低成本的技术手段。

© 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

飞机装配是飞机生产中最重要过程之一。由于装配过程极其复杂,包括结构支撑[1]、组件对齐[2]、钻孔部件的表面法线测量[3]和无间隙的姿态调整[4],因此,飞机装配在飞机制造总工作量中的占比超过50%。支撑和定位航空组件的装配工装在很大程度上决定了飞机装配的质量。然而,由于装配过程中不可避免的应力集中和振动,装配工装系统的关键定位器会产生微位移,可能会导致装配产品出现间隙和其他变形。随着当前智能制造的发展[5],为了实现测量信息的自我感知、装配过程的自我决策和飞机装配操作的自我执行,结构健康监测已成为航空

航天工程领域不可或缺的一部分[6]。因此,在大型飞机装配过程中,装配工装的高精度、高效的微位移监测在提高大型飞机装配的精度和可靠性方面发挥着越来越重要的作用。

在装配工装微位移检测中,采用了高精度的测量方法。激光雷达(LiDAR)技术[7–9]广泛应用于装配准备和装配站协调任务,如装配站定位和飞机组件预定位。激光雷达技术精度可达 $100 \mu\text{m}$,测量范围超过 100m 。激光跟踪仪[10–12]广泛应用于装配工装的离线位移检测和原位校准,其测量范围为 $10\sim 60 \text{m}$,测量精度可达到 $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$,成为位置测量的基准。对于装配工装上关键轮廓的三维(3D)重建,3D结构扫描[13–14]广泛用于在

* Corresponding author.

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

小视场范围内实现高精度。在 $35\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的视野范围内，3D 结构扫描设备的精度可达 $12\text{ }\mu\text{m}$ 。对于工业摄影测量[15–17]，其高精度可达 $\pm(14\text{ }\mu\text{m} + 14\text{ }\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ ，且其高效率能够对装配工装轮廓上的关键点进行精确和快速的位移检查。然而，在飞机装配过程中经常遇到各种极端的工作条件：一个典型的例子是飞机尾翼的多步装配过程，其中各种尾翼部件、复杂的装配工装结构、大量的人工操作、紧凑的测量空间（低至 $5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 或更小）和高精度要求（7 m 范围内达到 $\pm 76\text{ }\mu\text{m}$ ）都使得装配工装定位器的在线微位移监测变得异常困难。因此，有必要采用一种同时考虑精度、效率、体积和成本的在线监测方法来确定装配工装定位器的位置精度。在测量信息的完整性方面，由于传感器体积、测量空间和测量频率的限制，现有集成设备难以同时获取全部测量信息。从效率的角度来看，激光跟踪仪和 3D 结构化扫描设备的动态性能不足以满足在线监测的需求。考虑成本，激光跟踪仪和工业摄像机过于昂贵，无法通过增加设备数量克服因复杂工作条件导致的测量信息不完整的问题。因此，考虑装配工装组件和人工操作引起的测量空间紧凑和装配工装遮挡情况，上述测量方法在高精度、高效率、低成本等方面一般无法满足在线微位移监测的要求。

接近传感器[18–20]因其高精度、体积紧凑、重量轻、响应快、成本低等优点，被广泛应用于各个领域的高精度距离检测。类似地，在飞机装配中，这些传感器可以放置在紧凑的空间中，并用于监测与装配工装系统定位器的一维（1D）距离。然后，为了获取定位器的 3D 位移，需要建立一个将 1D 距离信息转换为 3D 信息的测量模型，这直接关系到 3D 监测的精度。目前的研究大多集中在基于由高精度执行器操作的接近传感器的测量过程上，如三坐标测量机（CMM）或机器人上的接近传感器。在这种情况下，通过将执行器的运动学信息与接近传感器的 1D 距离测量信息相结合，可以建立 3D 测量模型。然而，在基于固定传感器的在线监测过程中只能获得距离信息，因此，CMM 或机器人的 3D 建模方法不能直接应用于本文所考虑的 3D 监测场景的建模和校准。

本文的动机是提出一种广泛适用的基于接近传感器的 3D 微位移监测方法，可应用于飞机装配过程中遇到的各种极端工作条件，如紧凑和遮挡的空间。同时提出了一种基于 3D 微位移模型的自动原位校准方法，该方法可以用于计算高精度的接近传感器外部参数，包括测量原点（PBP）和单位位移矢量（UDV），从而实现精确的 3D 位移监测过程。本研究的重要性和独创性在于为基于接近传感器的 3D 微位移监测的建模和校准提供了新的见解，并

提供了一种精确、高效、低成本的技术手段，能够在飞机装配过程中的紧凑空间内进行相关测量。

本文其余部分的结构如下。第 2 节综述了与本文相关的研究工作。第 3 节介绍了 3D 微位移监测的方法和系统。第 4 节详细介绍了所提出的自动原位外部校准策略。第 5 节展示了校准实验和监测实验。最后，第 6 节对全文进行了总结。

2. 相关工作

为了在世界坐标系（WCS）中将传感器测量值转化为 3D 测量值，各领域学者对建立外部传感器参数校准的 3D 测量模型和方法进行了大量的研究。

2.1. 三维测量模型的建立

在 3D 测量模型方面，基于视觉、接近传感器和多传感器的方法都得到了广泛研究。研究者主要利用传感器的固有测量特性和位置参考信息来建立 3D 测量模型。

An 等[9]开发了一种基于相机和二维（2D）激光测距仪的 3D 激光测距系统，平均校准误差为 0.9875 像素。实验结果表明，该激光测距系统在室外和室内均具有良好的性能。Uekita 等[21]开发了一种基于接触式探头和激光跟踪仪的汽轮机转子直径测量系统，最大差异为 0.028 mm。Kim 等[22]提出了一种新的 6 自由度（6-DOF）测量系统，由一个摄像机和 1D 激光传感器组成。实验验证了该系统的性能，并证明了在 30 m 测量范围内的精度分别为 4 mm 和 0.5° 。Liu 等[23]开发了一种基于三个正交显微摄像机的 3D 传感系统，实现了两个组件的高精度装配。实验结果表明，该系统方向误差小于 $\pm 0.1^\circ$ ，位置误差小于 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 。Kim 等[24]开发了一种基于三个 1D 激光传感器、红外标记传感器和视觉摄像机的远程运动传感系统，在 30 m 的距离上精度为 3 mm。

2.2. 外部参数校准

对于基于 1D 或 2D 传感器的 3D 测量模型的外部参数校准，经常采用空间变换理论和基准数据约束。

Zapico 等[25]提出了一种外部校准方法，以促进集成到 CMM 中的 1D 传感器捕获的坐标相对于 CMM 坐标系的转换。球的直径测量残差小于 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。Liu 等[26]阐述了一种新的校准方法，通过单一的 1D 涡流位移传感器来实现 3D 测量。实验结果表明，平均测量精度为 $21.2\text{ }\mu\text{m}$ 。Bi 等[27–28]开发了一种基于 1D 激光位移传感器的非接触坐标测量系统，用标准球体校准传感器的光束方向。根据校准

结果, 该测量系统的测量不确定度约为 $30 \mu\text{m}$ 。Wu 和 Ren [29]提出了一种求解机器人运动基架的手眼校准方法, 通过最小化坐标转换误差来计算基架的未知外部参数。Guo 等[30]提出了一种基于激光位移传感器的新型测量方法。结合粒子群优化算法和最小二乘算法对机器人的运动学参数进行了校准。实验结果表明, 预估的定位误差的平均值可以降低到 0.845 mm 。Sharifzadeh 等[31]提出了一种基于单个平面伪影的半自动手眼校准策略, 该策略只需要 4 条手动扫描线。结果表明, 该校准策略简单、稳健、准确, 重建的 3D 点与对应拟合平面之间的误差为 0.066 mm , 因此, 这是一种合适的低成本方法, 适用于机器人部署激光扫描的多种工业应用。Zou 和 Lan [32]提出了一种基于深度强化学习的激光视觉系统的手眼校准方法。此外, 还采用了强化学习框架进行网络训练, 从而处理训练数据不足的问题。实验结果表明, 该方法的定位误差小于 0.8 mm , 精度和稳定性都得到了显著提高。

2.3. 讨论

为了更直观地理解基于激光跟踪仪、2D 摄像机和 1D 接近传感器的最先进的 3D 监测方法, 表 1 [10–11,21–32]对这些多 DOF 传感器进行了总结和比较。可以看出, 该方法的精度为 $\pm 0.076 \text{ mm}$, 并支持在紧凑的空间内完成高效的检测, 完全满足装配工装检验的要求。

一般来说, 为了建立基于摄像机等 2D 传感器的 3D 测量模型, 通常采用空间变换原理进行外部参数校准。多维信息可以被测量并应用于校准, 以提供附加约束和提高校准精度。为了建立基于接近传感器等 1D 传感器的 3D 测量模型, 通常采用基于标量约束 (如距离和直径) 的优化方法。除了测量距离的尺寸信息外, 还需要一个高精度的运动机构来驱动传感器, 从而完成对外部参数的校准过程。

在大型飞机装配过程中的 3D 微位移监测中, 接近传感器被固定在装配工装上的不同位置。局部微距离是用毫米级甚至微米级进行测量的。然后将这些距离转换为飞机装配的 WCS 中的位移 (长、宽、高均达到数米)。在从局

部坐标系到 WCS 的转换过程中, 局部微距离的误差极易被放大, 从而导致校准精度显著降低。因此, 需要将 2D 传感器和 1D 传感器的校准方法相结合, 以实现固定传感器的高精度校准。通过利用本文提出的校准方法, 可以实现这一目的。

3. 三维微位移监测方法

在大型飞机的装配过程中, 由于尺寸误差和组件的热变形、钻孔作业、操作失误等, 不可避免地会发生强制装配和振动, 从而严重影响装配过程的精度。由于装配工装系统在飞机部件定位中具有重要意义, 因此对装配工装核心定位器进行在线 3D 微位移监测是必不可少的。

图 1 展示了所提出的基于分布式接近传感器和计算机的 3D 微位移监测系统。每个传感器都在自身的传感器坐标系 (SCS) 中工作, 其中 δ 是计算机最终获得的测量距离。

由于接近传感器测量的距离 δ 是一个标量值, 因此需要一个 3D 测量模型来获得被测点的 3D 坐标。为此引入了每个接近传感器的外部参数, 包括 PBP 和 UDV。要将测

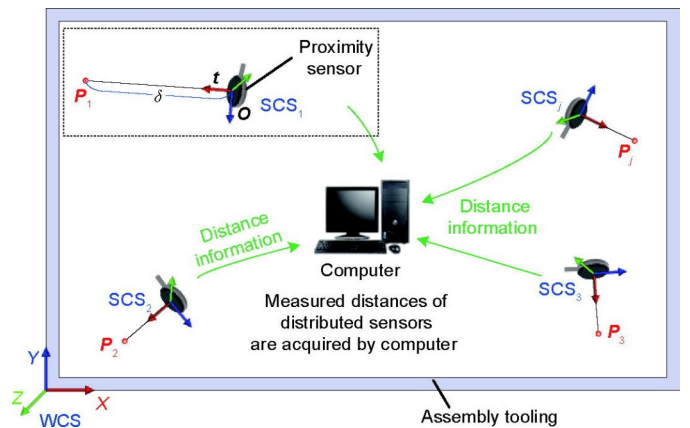


图 1. 3D 微位移监测系统及工作原理。 δ : 测量距离; O : PBP; t : UDV; $P_j (j = 1, 2, 3 \dots)$: 第 j 个传感器的测量点; $SCS_j (j = 1, 2, 3 \dots)$: 第 j 个传感器的坐标系; j : 传感器编号。

表 1 用于 3D 监测的多自由度传感器比较

Methods	Main sensing devices	Measurement mode	Accuracy (at 7 m)	Remark
Refs. [10–11,29]	3D laser trackers	Optical, noncontact	< 0.100 mm	High accuracy, low efficiency, and invalid measurement of obstructed objects
Refs. [22–24,31–32]	2D cameras or laser scanners	Optical, noncontact	~0.070–1.000 mm	Low accuracy, high efficiency, and invalid measurement of obstructed objects
Refs. [21,25–28,30]	1D movable proximity sensors	Optical, noncontact or contact	~0.010–0.100 mm	High accuracy, high efficiency, sensors driven by manipulators, and equipment volume too large to permit measurement in a compact space
Proposed method	1D fixed proximity sensors	Magnetic, noncontact	< 0.076 mm	High accuracy, high efficiency, compact sensor volume, and sensors distributed in the measurement space

量的距离转换为WCS中的位移，假设WCS中传感器的PBP \mathbf{O}^W 和UDV \mathbf{t}^W 可以表示为：

$$\mathbf{O}^W = [O_X^W \ O_Y^W \ O_Z^W]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{t}^W = [t_X^W \ t_Y^W \ t_Z^W]^T \quad (2)$$

式中， O_X^W 、 O_Y^W 、 O_Z^W 、 t_X^W 、 t_Y^W 和 t_Z^W 是从 \mathbf{O}^W 和 \mathbf{t}^W 投影到WCS的X、Y、Z轴的6个外部传感器参数。存在以下隐式约束：

$$\|\mathbf{t}^W\|_2 = (t_X^W)^2 + (t_Y^W)^2 + (t_Z^W)^2 = 1 \quad (3)$$

从而该传感器在WCS中的3D测量模型可以表示如下：

$$\mathbf{P}^W = (x^W \ y^W \ z^W)^T = \mathbf{O}^W + \delta \mathbf{t}^W \quad (4)$$

式中， $\mathbf{P}^W = (x^W \ y^W \ z^W)^T$ 为要在WCS中测量的定位器上的点； x^W 、 y^W 、 z^W 分别为点 \mathbf{P}^W 在X、Y、Z轴上的坐标分量。因此，基于外部传感器的参数建立了监测模型。

在飞机工装系统的核心定位器上，需要监测的关键点是高度分散的，因此传感器也分布在相应的位置上。微位移监测系统的结构如图2所示。传感器通过设计的柔性夹具分布并固定在特定的位置。从而获得测量的距离，用于计算3D微位移。

如图2所示，采用基于接近传感器的监测系统对尾翼装配工装系统进行监控。该监测系统由几十个接近传感器组成，用于监测不同位置。为满足实际监测要求，需要校准每个分布式接近传感器的外部参数。因此，提出了以下校准方法。

4. 校准方法

校准策略包括4个部分：求解坐标运动的变换矩阵，

建立点到面约束，对校准结果进行加权优化，以及设计自动校准过程。首先，将校准平面放置在不同的位置，通过求解变换矩阵，计算出相应的关系。其次，基于变换矩阵建立点到面约束，作为优化目标的基础。然后，进行了基于样本均衡化的加权优化方法。最后，设计一个自动校准过程来完成整个校准过程。

校准策略和过程如图3所示。

采用带有校准末端执行器和激光跟踪仪的工业机器人对传感器的外部参数进行校准。校准末端执行器由高精度6-DOF运动平台和校准平面组成。基于6-DOF运动平台本身的坐标系，建立了校准平面坐标系（CPCS）。WCS是飞机装配过程的基本坐标系，由激光跟踪仪建立，CPCS是校准过程的工作坐标系，由6-DOF运动平台建立。校准过程在CPCS中进行，其中校准平面在6-DOF运动平台的驱动下移动到不同的姿态。然后，在接近传感器与校准平面获得的测点坐标之间建立点到面约束。在约束条件中出现的接近传感器的外部参数（PBP和UDV）在CPCS中确定。最后，采用多个孔作为基准点，便于基于激光跟踪仪的CPCS和WCS之间的转换。针对下一个传感器，工业机器人自动重复校准过程，直到所有传感器都被校准。

4.1. 坐标运动的变换矩阵

为了保证约束和校准过程的后续精度，需要精确的平面方程。在CPCS中，校准平面的运动顺序被指定为 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n$ ，其中 α 、 β 、 γ 分别为X、Y、Z轴的旋转角度， l 、 m 、 n 分别为6-DOF运动平台沿X、Y、Z轴的平移距离，如图3（b）所示。

然后，经过第 i 次运动后，CPCS中校准平面上各点的3D坐标 \mathbf{P}_i^{CP} 可以表示为：

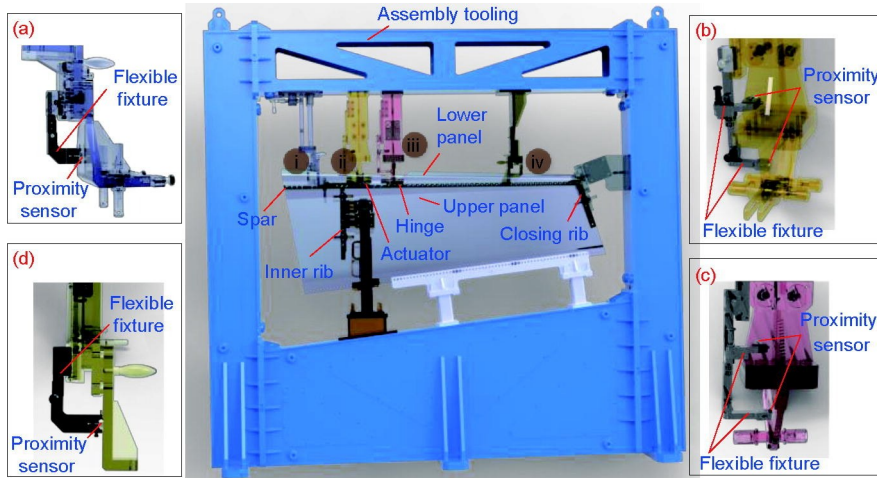


图2. 装配工装的3D微位移监测系统。(i) 前梁定位器；(ii) 作动器定位器；(iii) 铰链孔定位器；(iv) 前梁辅助定位器。

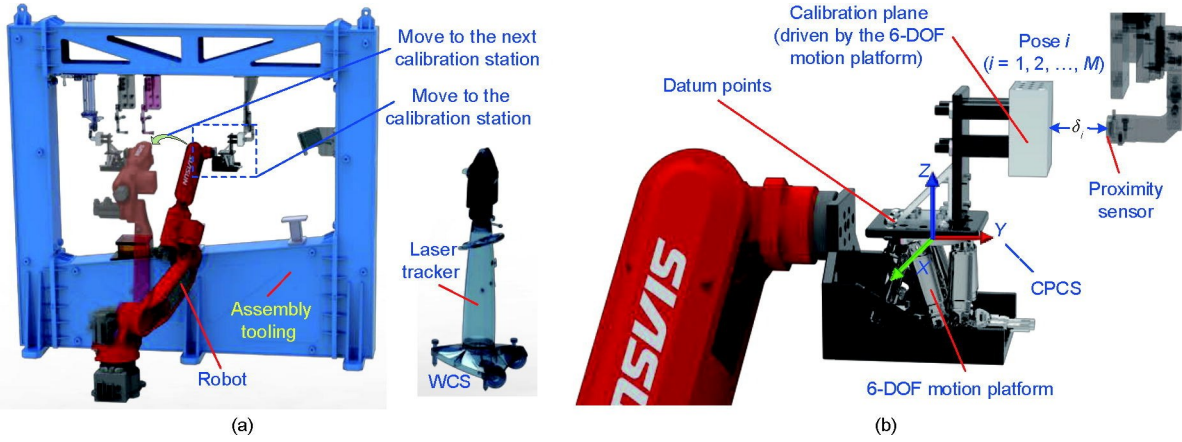


图3. 校准策略和过程。(a) 校准过程。(b) 校准末端执行器和校准策略。 i : 6-DOF运动平台的第 i 次运动后校准平面的第 i 个姿态； δ_i : 校准平面第 i 次运动后接近传感器测得的距离； M : 校准接近传感器过程中采集的校准样本数；WCS: 世界坐标系；CPCS: 校准平面坐标系。

$$\mathbf{P}_i^{\text{CP}} = (x_i^{\text{CP}} \ y_i^{\text{CP}} \ z_i^{\text{CP}})^{\text{T}} = \mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} (x_0^{\text{CP}} \ y_0^{\text{CP}} \ z_0^{\text{CP}})^{\text{T}} + \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

式中, M 为校准接近传感器的过程中采集的校准样本数； x_i^{CP} 、 y_i^{CP} 、 z_i^{CP} 为CPCS中 X 、 Y 、 Z 轴上点 \mathbf{P}_i^{CP} 的坐标分量； $\mathbf{P}_0^{\text{CP}} = (x_0^{\text{CP}} \ y_0^{\text{CP}} \ z_0^{\text{CP}})^{\text{T}}$ 表示初始校准平面上点的3D坐标(用姿态0表示)； x_0^{CP} 、 y_0^{CP} 、 z_0^{CP} 分别为CPCS中 X 、 Y 、 Z 轴上点 \mathbf{P}_0^{CP} 的坐标分量； $\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}}$ 和 $\mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}}$ 分别为旋转矩阵和平移矩阵。然后, 在CPCS中, 校准平面从姿态0到姿态 i 的转换可以表示为:

$$\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} = (l \ m \ n)^{\text{T}} \quad (7)$$

4.2. 点到面约束

由于接近传感器测得的点坐标始终满足标定平面方程, 因此本文采用点对面约束来确定接近传感器的外部参数。

应预先知道CPCS初始位置的平面方程, 且该方程可以在CMM上测量, 得到的相应空间方程如下:

$$\mathbf{N}_0^{\text{CP}} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

式中, \mathbf{N}_0^{CP} 为校准平面在初始位置的参数向量(姿态0)。

当校准平面移动时, 将建立一个新的关系。

$$\mathbf{N}_i^{\text{CP}} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中, \mathbf{N}_i^{CP} 为姿态 i 处校准平面的参数向量。

根据公式(5), 可以得到

$$\mathbf{P}_i^{\text{CP}} = [\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \ \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}}] \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过将公式(10)代入公式(8), 可以得到

$$\mathbf{N}_0^{\text{CP}} \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} \mathbf{P}_i^{\text{CP}} - (\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

式中, $(\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1}$ 表示 $(\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})$ 的逆矩阵。

在分解了这个矩阵后, 公式(11)可表示为:

$$\mathbf{N}_0^{\text{CP}} \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} & -(\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

结合公式(9)和公式(12), 可以得到:

$$\mathbf{N}_i^{\text{CP}} = \mathbf{N}_0^{\text{CP}} \begin{pmatrix} (\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} & -(\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

当校准平面移动到姿态 i , 公式(4)在CPCS中可以表示如下:

$$\mathbf{P}_i^{\text{CP}} = \mathbf{O}^{\text{CP}} + \delta_i \mathbf{t}^{\text{CP}} \quad (14)$$

式中, δ_i 为校准平面第 i 次运动后接近传感器测得的距离； \mathbf{O}^{CP} 和 \mathbf{t}^{CP} 分别为CPCS中接近传感器的PBP和UDV。

由于测量点 \mathbf{P}_i^{CP} 在校准平面上, 公式(14)服从公式(9)。当校准平面移动到不同的位置(姿态 i , $i=1, 2, \dots, M$)时, 通过将公式(13)和公式(14)代入公式(8), 可以得到一个相应的约束集, 如下所示:

$$\mathbf{N}_0^{\text{CP}} \begin{pmatrix} (\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} & -(\mathbf{R}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}})^{-1} \mathbf{T}_{0 \rightarrow i}^{\text{CP}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{O}^{\text{CP}} + \delta_i \mathbf{t}^{\text{CP}} \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (15)$$

4.3. 加权优化

容易看出, 公式(15)是一个没有理论解的超定线性方程组。此外, 由于在实际测试中会出现各种错误, 因此公式(15)几乎无法被满足。因此, 需要引入一个允许的最小常数误差 ε 以获得近似解, 如 $\varepsilon=0.1$ 。为了简洁起见, 设 $\mathbf{s}^{\text{CP}} = (\mathbf{O}^{\text{CP}}, \mathbf{t}^{\text{CP}})$, 并设 $f(\mathbf{s}^{\text{CP}})$ 表示公式(15)的左

侧。从而可将公式 (15) 修改如下:

$$\|f(\mathbf{s}^{\text{CP}})\|_2 \leq \varepsilon \quad (16)$$

由于各校准样本对近似解误差的贡献不同, 因此为每个样本引入权重系数 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$, 以使近似解更接近名义解。因此, 公式 (16) 可以转化为

$$\|f(\mathbf{s}^{\text{CP}})\|_2 \leq \lambda \varepsilon \quad (17)$$

根据实际应用的需要, λ 可以构造为常数向量或函数向量。本文根据校准样本的分布构造了 λ 。为避免接触接近传感器或超出其测量范围, 传感器测量值在其中间范围的采样率将远远高于传感器测量值在接近零或最大范围时的采样率。然而, 由此产生的样本不平衡会导致基本求解程序过分重视高采样区域的误差, 而忽视了低采样率区域的误差, 最终使近似解与名义解之间出现偏差。因此采用了以下的权重函数。

$$\lambda_i = c_k / \max(\mathbf{c}), i \Rightarrow c_k, (i = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K) \quad (18)$$

式中, c_k 表示第 k 个箱中的样本计数; \mathbf{c} 表示计数 $c_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 的向量; K 是划分样本的箱数量。根据传感器的测量值将样本划分为 K 个箱, 得到样本的分布。另外, $i \Rightarrow c_k$ 表示第 i 个样本属于第 k 个箱。因此, 通过公式 (18) 对样本进行加权, 可以减少不平衡样本的影响。

为了有效地应用权重 λ_i , 需要将 λ_i 包含在一组新的约束条件中, 如下所示:

$$g_i(\mathbf{s}^{\text{CP}}) = \max\left\{\|f_i(\mathbf{s}^{\text{CP}})\|_2 - \lambda_i \varepsilon, 0\right\}, (i = 1, 2, \dots, M) \quad (19)$$

式中, $g_i(\cdot) (i = 1, 2, \dots, M)$ 表示组合公式 (17) 和公式 (18) 的新约束集。

因此, 就充分性和必要性而言, 只需要找到一个 $(\mathbf{s}^{\text{CP}})^*$ 满足

$$\min_{\mathbf{s}^{\text{CP}}} \|g(\mathbf{s}^{\text{CP}})\|_2 \quad (20)$$

而无需求解公式 (17), 其中, $g(\cdot)$ 表示 $g_i(\cdot) (i = 1, 2, \dots, M)$ 的向量。

公式 (20) 是一个标准的优化问题, 一般通过优化以下方程来求解。

$$\min_{\mathbf{s}^{\text{CP}}} G(\mathbf{s}^{\text{CP}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M [g_i(\mathbf{s}^{\text{CP}})]^2 = \frac{1}{2} \mathbf{g}(\mathbf{s}^{\text{CP}})^T \mathbf{g}(\mathbf{s}^{\text{CP}}) \quad (21)$$

式中, $G(\cdot)$ 表示由公式 (20) 得到的最终优化目标。

最后, 通过采用一种常用的优化方法即可得到最优解, 如莱文贝格-马夸特算法。

$$(\mathbf{s}^{\text{CP}})^* = \arg \min_{\mathbf{s}^{\text{CP}}} \{G(\mathbf{s}^{\text{CP}})\} \quad (22)$$

值得一提的是, 由于 \mathbf{O}^{CP} 和 \mathbf{t}^{CP} 是传感器的外部参数, 因此在解决问题时可以考虑 \mathbf{O}^{CP} 和 \mathbf{t}^{CP} 的实际意义。 \mathbf{O}^{CP} 、

\mathbf{t}^{CP} 和 \mathbf{s}^{CP} 的值可以通过测量设备粗略估计, \mathbf{s}^{CP} 的解应接近 \mathbf{s}^{CP} 的估计值。此外, 根据公式 (3) 中所示的隐式约束, 为了确定公式 (1) 和公式 (2) 中所示的 6 个外部参数, 应将校准平面至少放置在 5 个不同的位置。图 4 [33] 展示了校准过程。

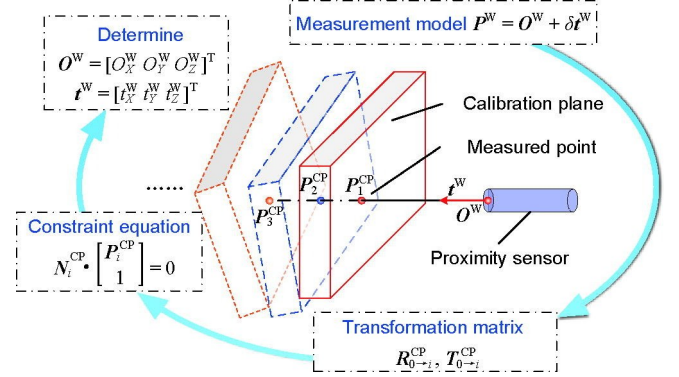


图 4. 外部参数校准过程[33]。

4.4. 自动控制和校准

图 5 展示了自动控制和校准系统。最初, 一个初始的运动控制指令 $(l, m, n, \alpha, \beta, \gamma)$ 被发送到自动校准系统。然后, 在执行器模块中, 6-DOF 运动平台根据运动控制指令将校准平面移动到一个特定的姿势。在测量模块中, 接近传感器产生了在该特定位置下从接近传感器到校准平面的距离测量值。

由于接近传感器的测量范围有限, 该距离不能大于最大范围, 也不能小于安全距离 (以避免碰撞传感器探头)。因此, 在过滤模块中, 对姿态-距离对进行过滤, 形成校准数据集。此外, 使用增量或减量来调整运动控制指令, 直到在可测量的间隔内获得足够数量的样本以形成校准数据集。

从 CPCS 的数据集中计算校准结果, 然后根据基准孔的坐标将结果转换为 WCS。至此, 校准过程才算最终完成。

5. 实验

在本研究中, 进行了 3D 微位移监测实验和原位校准实验 (在之前的工作[33]中进行了仿真测试, 以验证所提方法的可行性)。为了验证所提出的校准和监测系统的准确性, 本文开发了一个实验室系统:

(1) 为了模拟飞机装配工装系统实际测量的接近传感器的安装, 设计了一个固定的测量框架。

(2) 为了避免个别意外, 在测量框架上安装了 4 个接

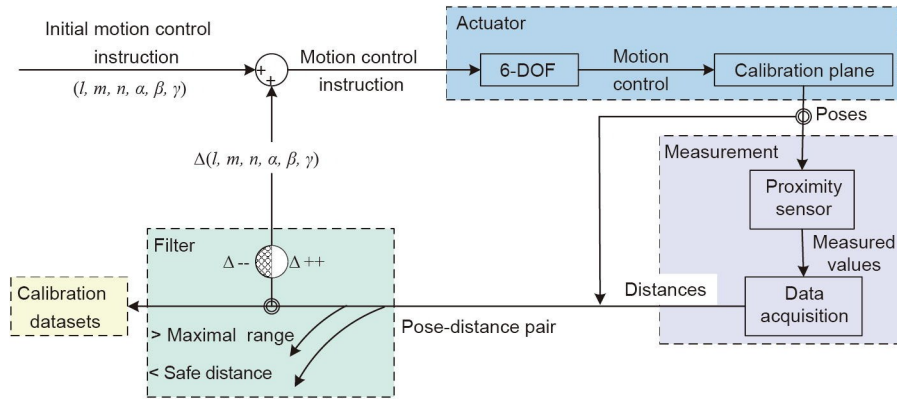


图5. 自动校准系统的流程图。

近传感器 (KD2306-4SB, 卡曼航空公司, 美国), 测量范围在 4 mm 的范围内, 可重复精度在 $7 \mu\text{m}$ 以内。

(3) 采用铝 6061-T 制备了一个校准平面, 平面度误差小于 $3 \mu\text{m}$ 。然后, 建立了一个高精度的 6-DOF 运动平台 (H-811.I2, Physik Instrumente 公司, 德国) 对校准平面应用精确的运动控制指令, 旋转重复性为 3 微弧度 (μrad), 平移重复性为 $0.15 \mu\text{m}$ 。

(4) 类似地, 为了便于系统的验证, 将 6-DOF 运动平台安装在一个灵活的校准框架中, 模拟机器人将 6-DOF 运动平台和校准平面以三个正交方向靠近接近传感器, 然后锁定并保持。然后, 在 CPCS 中测量出精度较高的校准平面, 并且可以忽略安装误差。

该仪器的总体配置如图 6 所示。

5.1. 实验室实验

首先, 安装了接近传感器, 并将其外部参数作为要校准的目标。校准平面的姿态数据在旋转范围 $(-0.6, 0.6)^\circ$ 内

设计为 0.3° 步长, 在平移范围 $(-1, 1)$ mm 内设计为 0.1 mm 步长。接近传感器测量的值是由美国国家仪器 (PXI-6289) 的采集模块获得的。整个实验过程重复 100 次, 以测试其重复性。每次校准试验中获得的测量距离的分布如图 7 所示。图中采用不同的颜色来区分各个校准试验, 根据测量值将每个校准试验的样本分为 20 个箱子。横轴表示不同的距离箱, 纵轴表示每次校准测试中属于每个箱的样本计数。可以看出, 只有当距离值在 1.15~2.85 mm 之间时, 采样率才会达到高且平衡的水平, 并与接近传感器的实际使用情况一致, 以避免接触到探头或超过测量范围。然而, 高采样区域和低采样区域之间的采样率差异很容易导致校准结果与名义值的偏差。为了解决这个问题, 采用了公式 (18) 中定义的权重函数。

实验室实验的校准结果见表 2。

实验结果表明, 校准过程是收敛的。PBP 误差波动的范围在 X 和 Y 方向小于 $\pm 10 \mu\text{m}$ (范围分别为 900 mm 和

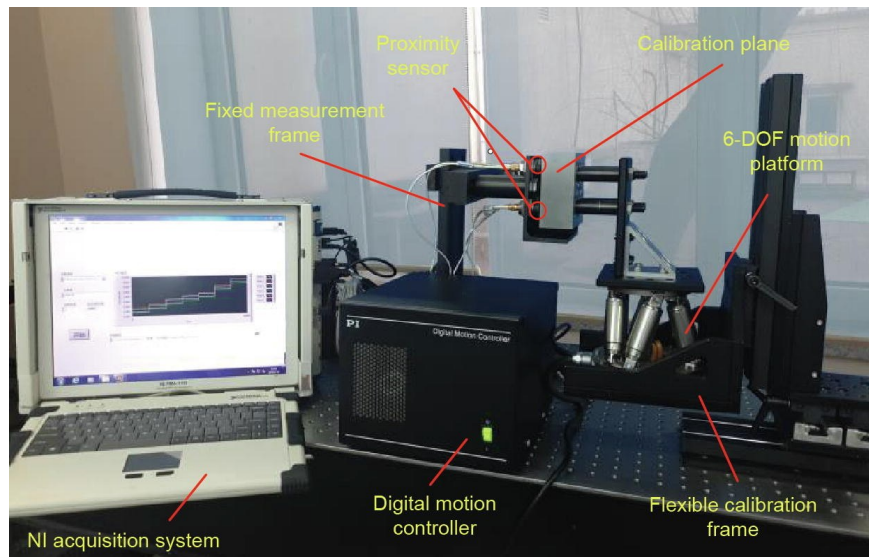


图6. 实验室仪器的配置[33]。NI: 美国国家仪器公司。

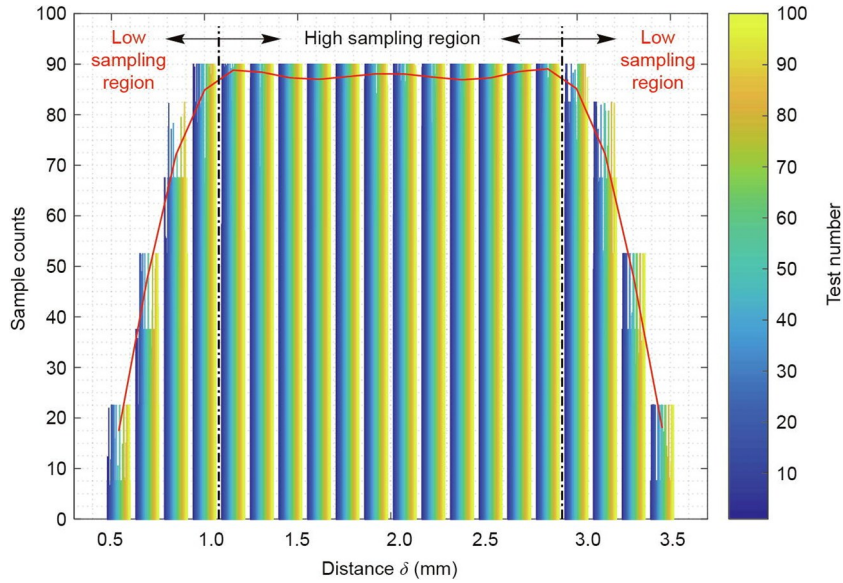


图7. 位移测量值的分布。

表2 实验室校准实验结果

Parameter (mm)	Mean	Standard deviation
Pose 1 O	[18.351 -132.296 131.764]	$10^{-3} \times [4.99 \ 8.55 \ 1.12]$
t	[-0.001 0.307 -0.949]	0.0373°
Pose 2 O	[-28.151 -135.772 133.268]	$10^{-3} \times [4.82 \ 8.55 \ 0.79]$
t	[-0.031 0.282 -0.955]	0.0482°
Pose 3 O	[29.461 90.590 132.799]	$10^{-3} \times [6.38 \ 7.24 \ 0.30]$
t	[0.037 0.307 -0.951]	0.0635°
Pose 4 O	[-19.378 91.536 131.732]	$10^{-3} \times [4.13 \ 4.97 \ 0.20]$
t	[-0.053 0.233 -0.971]	0.0314°

1200 mm), 在 Z 方向小于 $\pm 2 \mu\text{m}$ (范围为 650 mm), 而 UDV 误差波动的范围小于 0.07° , 从而验证了该方法的稳定性。

5.2. 精度分析

在一个 CMM 上进行了精度测试。精度测试系统的布局如图 8 所示。校准平面由 6-DOF 运动平台驱动, 并通过 CMM 进行测量来获得平面参数。基于校准后的接近传感器的外部参数, 获得测量平面上测点的 3D 信息, 并计算测量平面上的投影误差, 以验证校准过程的准确性。

基于加权和非加权校准的结果如图 9 所示。以传感器 1 为例进行说明。基于非加权优化的校准后, 3D 微位移的测量误差在 $-23.50 \mu\text{m}$ 到 $43.30 \mu\text{m}$ 之间; 第一四分位数、中位数和第三四分位数分别为 $-12.50 \mu\text{m}$ 、 $-3.04 \mu\text{m}$ 和 $8.40 \mu\text{m}$ 。相比之下, 基于加权优化校准后, 3D 微位移的测量误差降低到 $-9.80 \mu\text{m}$ 到 $14.12 \mu\text{m}$ 之间, 范围相对较小; 第一四分位数、中位数和第三四分位数分别为 $-4.27 \mu\text{m}$ 、 $-1.56 \mu\text{m}$ 和 $3.48 \mu\text{m}$ 。由此可以看出, 根据

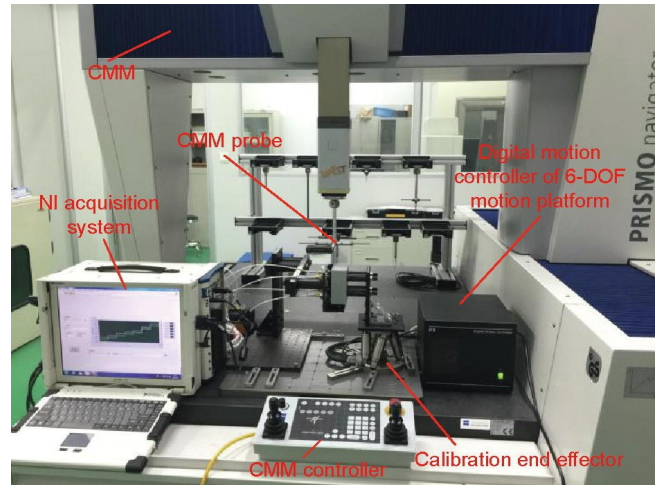


图8. 实验室的监测精度测试系统。

CMM 数据, 加权校准方法可将测量误差显著降低到 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的范围内 ($0.9 \mu\text{m} + 2.85 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$, 在 X/Y/Z 方向上的变化范围为 900 mm/1200 mm/650 mm)。因此, 所提出的自动校准方法和系统可以实现高精度的空间测量。

5.3. 原位校准和在线监测

最终在实验室对尾翼装配过程进行了校准和 3D 微位移监测试验, 并在生产现场模拟了装配过程。校准过程如图 10 所示, 结果见表 3。

校准后, 将定位器安装在装配工装上, 并监测其 3D 位移。在飞机装配过程中, 前梁、作动器和铰链孔、内部肋和封闭肋以及上下蒙皮依次组装, 导致重力、人工推力、装配应力和钻孔振动逐渐增加。因此, 需要监测前梁定位器 (SP)、作动器定位器 (AP) 和铰链孔定位器

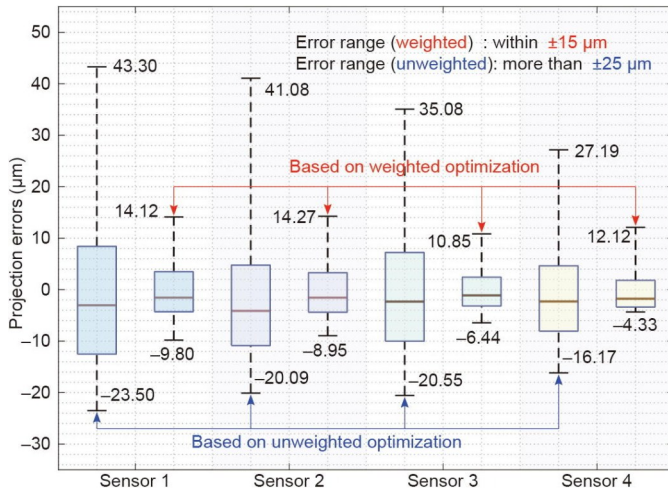


图9. 监测精度测试结果。

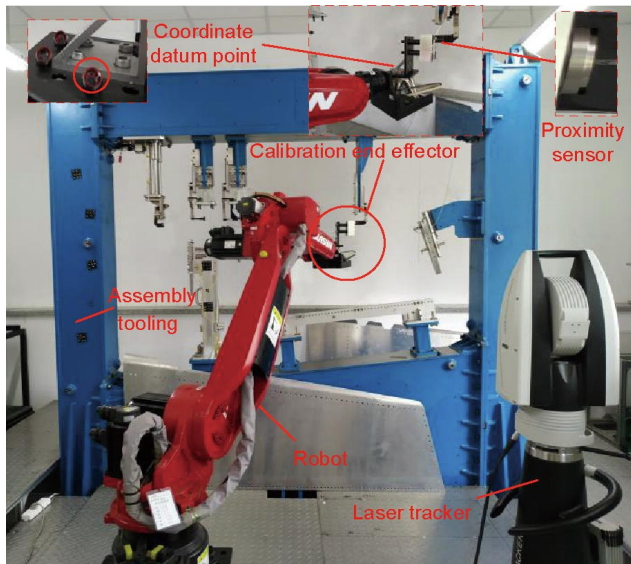


图10. 原位校准系统。

表3 原位校准结果

Sensor number	O_x (mm)	O_y (mm)	O_z (mm)	t_x	t_y	t_z
SP 1 sensor	-1680.845	-748.645	123.805	-0.028	0.910	-0.414
AP 1 sensor	-1871.246	-480.598	109.775	0.326	-0.197	-0.925
AP 2 sensor	-1742.015	-469.605	106.003	-0.116	0.993	0.021
HP 1 sensor	-1870.849	-229.299	115.794	0.007	-0.210	-0.978
HP 2 sensor	-1717.989	-209.531	81.399	0.279	0.946	-0.163
SP 2 sensor	-1672.594	571.228	113.139	0.080	0.992	-0.096

(HP) 的3D微位移, 以保障装配精度和质量。监测过程和监测系统如图11所示。在整个装配过程中, 关键定位器(如SP1、AP1等)之间的偏移距离由传感器获得, 结果如图12所示, 其中横轴表示装配过程中所经过的时间, 纵轴表示定位器的偏移距离。计算出的位移如表4所示。

从图12可以看出, 当对飞机部件(如前梁和作动器)

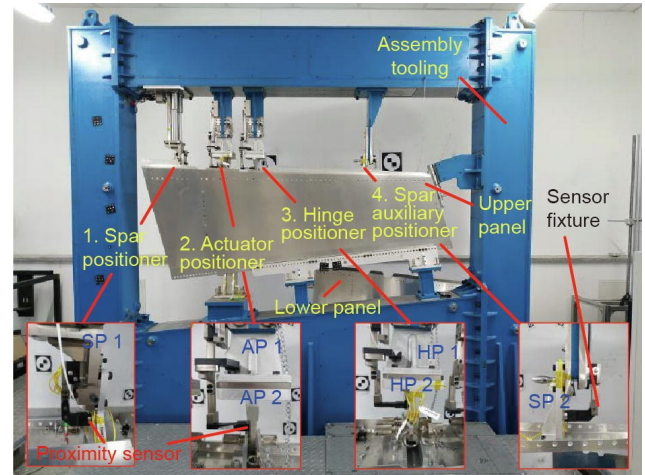


图11. 装配过程中的3D微位移监测系统。

进行装配时, 由于装配操作引起的振动, 定位器(如SP和AP)的测量距离将在零值附近浮动。通过根据实时测量的位移值来调整装配操作, 可以将定位器偏移量的振幅控制在可接受范围内。此外, 从表4可以看出, 也可以将每个装配步骤后定位器的微位移控制到微小的值, 以完全满足装配工装的精度要求。

同时也对现有监测方法在装配过程中的应用进行了测试, 以比较它们在生产现场(范围为7 m)的效率和准确性。如前所述, 采用激光跟踪仪作为飞机装配过程中的精度评价基准。通过使用一台激光跟踪仪(AT960, Leica公司, 德国), 精度可以在生产现场的范围(7 m)内达到 $\pm 57 \mu\text{m}$ 。然而, 由于激光跟踪仪采用逐点测量方式, 效率低, 无法满足3D微位移在线监测的要求。而工业摄影测量方法和3D微位移监测方法效率较高, 可用于装配工装的在线监测。因此, 采用了精度为 $\pm(14 \mu\text{m} + 14 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ 的工业摄影测量系统(MPS/MPS/M20, 辰维科技, 中国)与本文提出的监测方法进行比较。在生产现场范围内, 该工业摄影测量系统的精度可达到 $\pm 112 \mu\text{m}$ 。同时, 本文提出的方法采用激光跟踪仪(AT960, Leica公司, 德国)建立WCS, 并采用接近传感器(KD2306-4SB, 卡曼航空公司, 美国)进行3D微位移监测。精度可以达到 $\pm 72 \mu\text{m}$, 包括3D微位移的测量误差($\pm 15 \mu\text{m}$)和由激光跟踪仪引起的WCS误差($\pm 57 \mu\text{m}$)。因此, 该方法所获得的测量精度可以完全满足对装配工装检验的精度要求($\pm 76 \mu\text{m}$)。

综上所述, 该微位移监测方法在效率和精度方面都具有优势, 更适合于复杂飞机装配过程中的在线位置监测。微位移的高精度监测可以为人工装配操作提供更好的指导, 而微位移的在线监测将进一步改进飞机的装配。

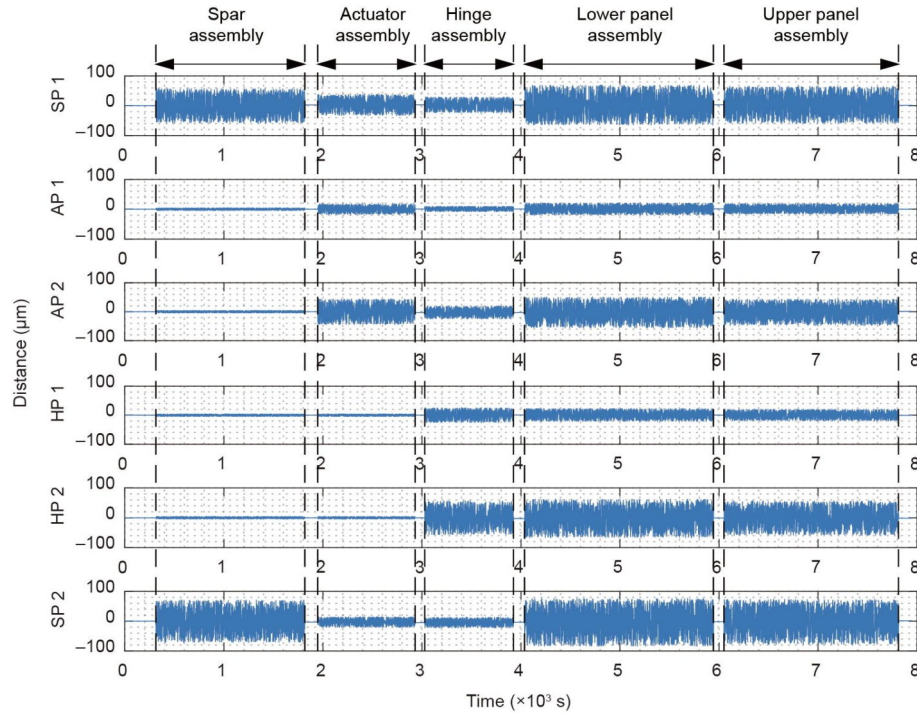


图12. 装配过程中的距离偏移量。

表4 在线监测结果

Assembly process stage	SP 1 (μm)	AP 1 (μm)	AP 2 (μm)	HP 1 (μm)	HP 2 (μm)	SP 2 (μm)
Pework						
d (Dur.)	0	0	0	0	0	0
D (Aft.)	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]
Spar						
d (Dur.)	-57.7-56.2	-4.4-4.6	-4.2-4.4	-3.9-4.8	-4.7-4.1	-71.2-69.8
D (Aft.)	[-0.1 2.3 -1.0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[0 0 0]	[-0.2 -3.1 0.3]
Actuator						
d (Dur.)	-33.1-38.0	-17.8-18.4	-44.5-42.3	-4.5-4.7	-5.1-3.9	-20.9-14.6
D (Aft.)	[-0.1 1.6 -0.7]	[-0.2 -0.1 0.6]	[-0.3 2.4 0.1]	[0 0 0]	[0 0 0]	[-0.1 -1.8 0.2]
Hinge						
d (Dur.)	-24.8-28.5	-9.5-8.2	-19.8-24.6	-25.4 -25.7	-56.7-59.2	-19.6-15.9
D (Aft.)	[-0.1 2.6 -1.2]	[-0.2 0.1 0.6]	[-0.3 2.4 0.1]	[0 -0.1 -0.7]	[0.7 2.3 -0.4]	[-0.2 -2.5 0.2]
Lower panel						
d (Dur.)	-63.9-69.5	-20.7-19.3	-50.8-55.7	-21.5-22.9	-62.6-67.3	-82.4-77.5
D (Aft.)	[-0.1 1.7 -0.8]	[-0.1 0.1 0.3]	[-0.2 1.7 0]	[0 -0.2 -1.0]	[1.1 3.6 -0.6]	[-0.3 -4.0 0.4]
Upper panel						
d (Dur.)	-60.4-64.2	-18.0-17.5	-44.1-47.5	-19.0-21.0	-54.0-61.4	-79.6-71.5
D (Aft.)	[0 1.5 -0.7]	[-0.1 0 0.2]	[0.1 -0.9 0]	[0 0.1 0.5]	[0.4 1.5 -0.3]	[0.1 1.7 -0.2]

“d (Dur.)” represents the distance measured during the assembly process. “D (Aft.)” represents the microdisplacement after the assembly process.

6. 结论

本文提出了一种基于接近传感器的3D微位移监测方法，并详细地介绍了一种外部参数校准方法。采用CMM进行了实验室实验，精度测试表明，3D微位移监测的误

差小于 $\pm 15 \mu\text{m}$ 。当将该方法应用于原位校准和在线监测时，考虑基于激光跟踪仪建立的WCS的精度，3D微位移监测的精度可达到 $\pm 72 \mu\text{m}$ ，完全满足装配工装检测的精度要求（ $\pm 76 \mu\text{m}$ ）。该方法已成功应用于生产现场尾翼装配工装的位移监测，结果表明该方法能准确地实时获取各

定位器的位移，并为后续装配操作提供指导。重要的是，3D位移监测在制造、测试和许多其他领域，如汽车和船舶工业中不可或缺。本文提出的3D位移监测和校准方法具有精度高、响应速度快、体积紧凑等优点，可以有效地支持飞机、汽车、船舶等设备的智能制造。

致谢

本工作得到了国家自然科学基金(U1808217)、国家杰出青年科学基金(52125504)、大连市高层次人才创新支持计划(2017RJ04)和兴辽英才计划(XLYC1807086和XLYC1801008)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Zhenyuan Jia, Bing Liang, Wei Liu, Kun Liu, and Jianwei Ma declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Müller R, Esser M, Vette M. Reconfigurable handling systems as an enabler for large components in mass customized production. *J Intell Manuf* 2013;24(5):977–90.
- [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] Yu L, Zhang Y, Bi Q, Wang Y. Research on surface normal measurement and adjustment in aircraft assembly. *Precis Eng* 2017;50:482–93.
- [4] Deng Z, Huang X, Li S, Xing H. On-line calibration and uncertainties evaluation of spherical joint positions on large aircraft component for zero-clearance posture alignment. *Robot Comput Integr Manuf* 2019;56:38–54.
- [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] 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.
- [7] Chen Z, Du F. Measuring principle and uncertainty analysis of a large volume measurement network based on the combination of iGPS and portable scanner. *Measurement* 2017;104:263–77.
- [8] Hoang VD, Jo KH. A simplified solution to motion estimation using an omnidirectional camera and a 2D LRF sensor. *IEEE Trans Ind Inform* 2016;12(3):1064–73.
- [9] An Yi, Li Bo, 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.
- [10] 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.
- [11] Pérez Muñoz P, Albajez García JA, Santolaria Mazo J. Analysis of the initial thermal stabilization and air turbulences effects on laser tracker measurements. *J Manuf Syst* 2016;41:277–86.
- [12] 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.
- [13] Li X, Li X, Ge SS, Khyam MO, Luo C. Automatic welding seam tracking and identification. *IEEE Trans Ind Electron* 2017;64(9):7261–71.
- [14] Wang Z. An imaging and measurement system for robust reconstruction of weld pool during arc welding. *IEEE Trans Ind Electron* 2015;62(8):5109–18.
- [15] Spencer BF, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering* 2019;5(2):199–222.
- [16] 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.
- [17] Xu Y, Gao F, Jiang X. Performance analysis and evaluation of geometric parameters in stereo deflectometry. *Engineering* 2018;4(6):806–15.
- [18] 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.
- [19] Caetano DM, Rabuske T, Fernandes J, Pelkner M, Fermon C, Cardoso S, et al. High-resolution nondestructive test probes based on magnetoresistive sensors. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(9):7326–37.
- [20] Peng K, Yu Z, Liu X, Chen Z, Pu H. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision. *IEEE Trans Ind Electron* 2017;64(9):7377–86.
- [21] Uekita M, Takaya Y. On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools. *Precis Eng* 2016;43:200–10.
- [22] Kim YK, Kim KS, Kim S. A portable and remote 6-DOF pose sensor system with a long measurement range based on 1-D laser sensors. *IEEE Trans Ind Electron* 2015;62(9):5722–9.
- [23] Liu S, Xu De, Zhang D, Zhang Z. High precision automatic assembly based on microscopic vision and force information. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2016;13(1):382–93.
- [24] 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.
- [25] Zapico P, Fernández P, Rico JC, Valiño G, Patiño H. Extrinsic calibration of a conoscopic holography system integrated in a CMM. *Precis Eng* 2018;52:484–93.
- [26] Liu W, Wang T, Liang B, Feng Di, Jiang X, Zhang Y, et al. Measurement of three-dimensional information by single eddy current displacement sensor. *IEEE Sens J* 2019;19(9):3543–52.
- [27] Bi C, Fang J, Li K, Guo Z. Extrinsic calibration of a laser displacement sensor in a non-contact coordinate measuring machine. *Chin J Aeronaut* 2017;30(4):1528–37.
- [28] Bi C, Liu Y, Fang J, Guo X, Lv L, Dong P. Calibration of laser beam direction for optical coordinate measuring system. *Measurement* 2015;73:191–9.
- [29] 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.
- [30] Guo Y, Song B, Tang X, Zhou X, Jiang Z. A measurement method for calibrating kinematic parameters of industrial robots with point constraint by a laser displacement sensor. *Meas Sci Technol* 2020;31(7):075004.
- [31] Sharifzadeh S, Biro I, Kinnell P. Robust hand-eye calibration of 2D laser sensors using a single-plane calibration artefact. *Robot Comput Integr Manuf* 2020;61:101823.
- [32] Zou Y, Lan R. An end-to-end calibration method for welding robot laser vision systems with deep reinforcement learning. *IEEE Trans Instrum Meas* 2020;69(7):4270–80.
- [33] Liang B, Liu W, Jiang X, Feng D, Liu K, Zhou M, et al. A novel automatic calibration method for displacement sensors based on the spatial transformation theory. In: *Proceedings of 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*; 2019 Jul 8–12; Hong Kong, China; 2019.