

面向飞机管线装配的多点精准虚实注册方法

成昌志¹, 崔海华^{1*}, 刘勇强¹, 王嘉瑞¹, 罗苑琪², 李鸣远², 李鹏程¹¹南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;²中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089

摘要 提出一种基于多点的虚实注册方法。首先,设计一种手持式靶标探针,根据飞机零部件上的典型特征设计了不同的探针测头,并采用单目相机对探针进行标定,标定出测头尖点相对靶标的位置。然后,在虚实注册过程中在三维模型上设置几个点,借助靶标探针测量真实零件上对应的几个点,利用奇异值矩阵分解法,求解出增强现实设备虚实映射空间中三维模型到真实零件的刚体变换,根据此变换即可实现虚实配准。最后,选取3 m×1.4 m×0.5 m尺寸范围内的机翼为验证对象,采用所设计的靶标探针验证其虚实配准精度,并分析注册时点的数量与布局对虚实注册精度的影响。实验结果表明,所提方法可以实现大尺寸零部件整体较高的虚实配准精度。

关键词 测量; 飞机装配; 增强现实; 虚实配准; 探针标定; 多点注册

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231549

1 引言

增强现实(AR)技术可以将虚拟信息叠加到真实环境中,在航空航天复杂产品的设计研发、制造、培训、维护保障等多个阶段具有良好的应用前景^[1]。目前,飞机管路和线缆仍然主要依赖于人工装配,通常使用二维图纸或三维模型进行指导,然而,二维图纸通常难以准确地展示复杂的装配细节,容易导致误解或遗漏,又由于计算机通常被放置在装配区域外的指定位置,工人须中断装配工作来查看三维模型,装配效率较低^[2]。借助增强现实技术,可以将三维模型、工艺信息等虚拟内容直接投影到实际的装配场景中,为工人提供三维可视化的引导,降低其理解难度,后续还可以应用于装配质量检测过程^[1,3],从而显著提升生产效率。

虚实注册技术作为增强现实系统的一项关键技术,是实现虚拟三维模型和真实零件精准对齐的关键。评价虚实配准程度的一个重要指标是虚实注册精度,在娱乐和教育应用中,注册精度通常在1 cm到数厘米的范围内,而在一些特定工业应用如飞机装配、汽车制造和医疗手术中,通常在毫米级别或更低^[4],目前在飞机管路线缆装配场景中,由于飞机零部件尺寸较大(长1~20 m)且结构复杂,存在注册精度较低的问题。传统的虚实注册方法可分为基于视觉、基于传感器和混合式的方法^[2,5]。

基于视觉的虚实注册方法分为基于标志与基于无标志的注册方法。基于标志的注册方法需要事先在场景中粘贴人工标志,利用相机识别标志,进行标志解析、角点识别与位姿计算,常见的人工标志有ARToolkit、ARToolKitPlus、ARTag、AprilTag、QR码等^[5]。基于标志的虚实注册方法注册稳定且可以将虚拟信息注册到相对靶标非常精确的位置,但飞机管路线缆装配场景中零部件布局错综复杂,难以准确固定标志物且固定后容易被遮挡,导致虚实注册精度难以保证^[2]。

基于无标志的注册方法分为基于模型识别^[6]、基于图像自然特征^[7]、基于机器学习^[8]等方法^[1]。基于模型识别的注册方法主要分为基于边缘特征与点云配准等方法,通过识别场景中的真实物体上的轮廓、纹理、显著特征点等信息,与先验的三维模型进行匹配,然后实时进行跟踪注册,该方法无须粘贴标志且可以实现动态跟踪,但在复杂场景下容易受到遮挡、弱纹理和结构相似性等的影响,容易带来误匹配和注册不稳定等问题。基于图像自然特征的方法通过识别场景中的点、线、纹理等自然特征,并对其进行跟踪来计算相机参数,比较有代表性的方法是视觉即时定位与地图构建(SLAM),它可以实时估计出相机在场景中的位姿并构建场景的三维地图,避免了对实际场地先验知识库的依赖,进一步提高了跟踪的适应性^[9]。基于机器

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-11-01; 录用日期: 2023-11-30; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707501)、中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2022CX006)、航空科学基金(2022Z072052002)

通信作者: *cuihh@nuaa.edu.cn

学习的跟踪注册方法需要训练不同位姿下的样本数据,具有较高的精度和鲁棒性,但是存在需要先验数据学习以及模型训练周期长的问题,对移动终端的算力有较高的要求。

基于传感器的跟踪注册方法包括基于惯性传感器、基于磁传感器、基于电磁传感器和基于超声波传感器的跟踪方法,该方法鲁棒性高、实时性好,但是精度低、易受干扰^[2]。混合式跟踪注册方法融合了视觉和传感器的优点,更适合装配现场的应用。

基于增强现实移动终端,还有一种常用的交互式虚实注册方法——通过手势、语音或按钮交互等方式来移动虚拟模型在虚实映射空间中的位置,依赖人眼判断虚拟模型与真实物体对齐的程度。这种方法存在着不同视角下模型位置偏差较大的问题^[10],且与用户的操作经验密切相关,因此在工业现场应用中注册效率较低且虚实配准精度难以保证。

以上的虚实注册方法在飞机装配场景应用中还存在一些挑战,因此,本文提出一种基于多点的虚实注册方法,可以有效解决大尺寸零件虚实配准精度低的问题。国内外在多点注册方面的研究工作如下:在工业领域,苏 57 生产线使用增强现实技术辅助飞机装配,它涉及的虚实配准方案类似于多点注册的方法,通过选择三维模型上的点和真实零件上的多组对应点,实现了大范围的虚实配准。在医学领域,相关人员也进行了一些探索,如:van Doormaal 等^[11]提出了全息点匹配的虚实注册方法,并将其用在医学神经导航系统中;于德旺等^[12]将三点注册法与基于识别图注册、手动注册方法进行比较,证明了三点注册法的注册误差更低。

本文方法需要测量真实零件表面上点的坐标,涉及探针的设计与标定,目前有很多成熟的产品,例如医学中应用的探针^[13-14]、光学测量方面的光笔^[15]。基于单目的光笔标定可以简化标定系统,适用于增强现实等便携式设备。黄风山^[16]搭建了光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统,在 1 m 测量范围内,被测点 x 、 y 、 z 方向的测量稳定性精度分别达到 0.072、0.05、0.365 mm。郑兴纯等^[17]提出一种平面靶标测头中心

现场两步标定的方法,测头中心坐标在 x 、 y 、 z 方向的重复性精度分别达到 0.077、0.035、0.140 mm。Shan 等^[18]提出一种新的光笔测头中心自标定方法,利用球面拟合、最小二乘法的广义逆法以及位置不变原理等组合方法得到光笔测头的实际位置。本文将参考以上内容设计一款适合增强现实眼镜识别并制作简易的靶标探针。

综上所述,国内在飞机装配领域应用多点虚实注册方法的案例较少,故本文提出一种面向飞机管线缆装配场景的多点虚实注册方法。首先,设计了一种便捷的靶标探针,分析了探针标定的原理,建立了基于奇异值分解的多点注册位姿变换模型;然后,通过实验分析了探针标定方法的合理性,并分析了注册点数量与布局对虚实注册精度的影响。实验结果表明,所提出的多点虚实注册方法为实现大尺寸飞机零部件精准虚实注册提供了可行的方案。

2 系统工作架构

所设计系统的架构如图 1 所示,主要包括探针标定模块与多点注册模块。探针标定模块包括靶标探针、标定基座、CCD 工业相机、计算机等,多点注册模块包括增强现实眼镜、靶标探针、待虚实配准的真实零件与三维模型。

本文方法的流程大致如下:通过增强现实设备对整个场景进行扫描重建,生成一个虚实映射的空间,且虚实注册的过程在这个空间进行。首先,在虚实注册之前将模型随意放在一个位置,通过交互的方式选取模型上的几个点并获取这几个点的三维坐标;然后,借助靶标探针获取真实零件上对应点的三维坐标,这些点的坐标均在虚实映射空间的绝对坐标系中;最后,利用奇异值分解(SVD)法求解出两组点之间的空间变换,并根据此变换实现虚实配准。注册过程中为了准确选取零件表面上点的坐标,对测头尖端相对靶标坐标系($O_Q-X_QY_QZ_Q$)的位置进行标定。本文将从靶标探针设计与标定、多点注册两部分进行进一步分析。

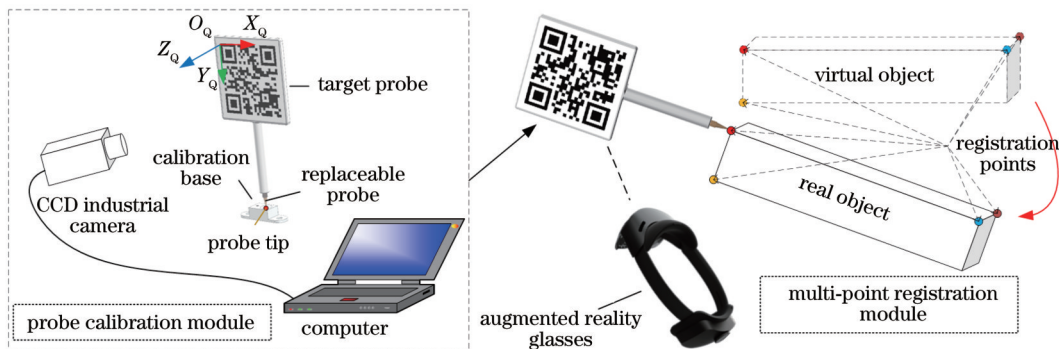


图 1 多点虚实注册技术系统架构

Fig. 1 Architecture of multi-point virtual-real registration technology system

2.1 探针设计与标定

为准确测量真实零件表面上的点的坐标,设计了一种手持式 QR 码(即二维码)靶标探针,根据飞机零部件特征设计了不同的探针测头,并理论分析了探针标定的原理。

2.1.1 靶标探针设计

靶标探针主要由 3 个部分组成:靶标、靶标探针支架以及可替换测头(图 2)。靶标采用 QR 码,大小设计成 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$;探针支架采用 3D 打印结构,支架上端内置 1 mm 深的正方形凹槽,QR 码贴于凹槽底部,支架下端为圆柱形测杆,测杆长度和形状可根据被测对象的几何形状进行定制,测杆末端内置铜螺母,与测头用螺纹连接;飞机管路线缆装配场景中一些典型的零件特征(图 3)为可替换测头(图 4)结构的设计提供了思路,根据飞机零部件上普遍存在的尖点特征,设计一种针状测头[图 4(a)],测量时要保证测头尖点准确接触零件上的待测点;根据管夹支架上的通孔结构,所设计的测头结构如图 4(b)所示,测量通孔端面的圆心坐标,该测头下端圆柱体的直径和零件通孔直径相同,测头底部锥孔的深度和下端圆柱体的轴向长度相等,测量时,测头上端圆柱体的底部端面 and 零件通孔表面接触,测头下端圆柱体和通孔形成间隙配合,测头尖点(测头底部锥孔的顶点)代表通孔端面的圆心;根据装配体上的直角和倒斜角特征,所设计的测头结构如图 4(c)所示,测量时,零件倒角处的尖点和测头尖点相接触。图 4 绿色线条标注的部分表示测头和真实零件主要接触的部分,黄色圆圈标注的是测头尖

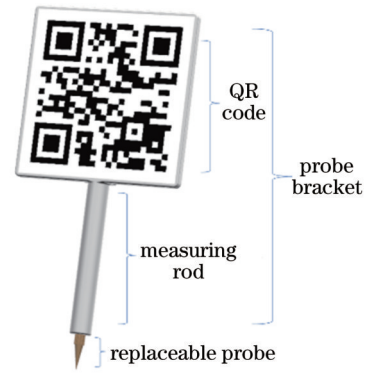


图 2 QR 码靶标探针结构

Fig. 2 Structure of QR code target probe

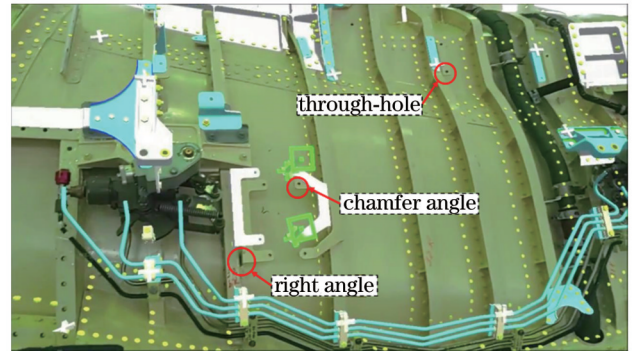


图 3 苏 57 飞机液压管路装配场景典型特征

Fig. 3 Typical characteristics of hydraulic pipeline assembly scenarios for Su-57 aircraft

点位置。

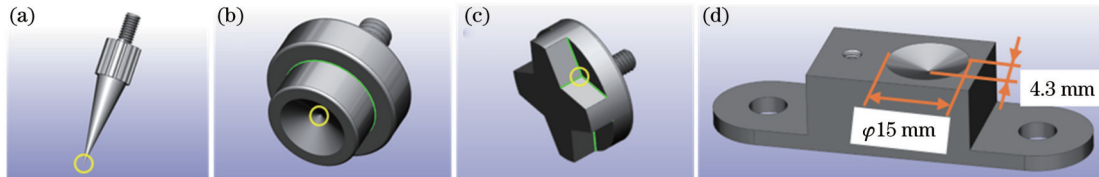


图 4 不同类型的测头与探针标定基座。(a)通用针状型测头;(b)通孔型测头;(c)倒角型测头;(d)探针标定基座

Fig. 4 Different types of probe and a probe calibration base. (a) Universal needle probe; (b) through-hole probe; (c) chamfered probe; (d) probe calibration base

2.1.2 靶标探针标定

由于 QR 码、靶标探针支架、测头制造时存在制造误差,以及组装时会产生装配误差,无法直接获得测头尖点在靶标坐标系下的坐标,因此需要对探针进行标定。靶标探针标定系统如图 1 的探针标定模块所示,采用探针围绕尖点旋转的方式进行标定:探针标定过程中靶标须始终处在工业相机的视野中,探针围绕测头尖点进行旋转,采集多组不同姿态的 QR 码图像。不同测头[图 4(a)~(c)]对应的探针标定原理相同,即探针旋转过程中,测头尖点在相机坐标系下的坐标始终不变,具体的标定形式有所不同:针状测头[图 4(a)]的探针标定时,针尖接触标定基座[图 4(c)]锥形孔的顶点,探针围绕顶点进行旋转标定,探针可在距锥

孔轴线 60° 的范围内旋转[图 5(a)];倒角型测头的探针标定前需在标定基座的螺纹孔内固定一个针状测头,标定时倒角型测头尖点接触针状测头的尖点,探针轴线旋转范围根据测头尖点周围的形状而定[图 5(b)]。通孔型测头对应的探针标定过程也同图 5(b)。下面将从 QR 码位姿计算、尖点标定两部分详细介绍探针标定的原理。

2.1.2.1 QR 码位姿计算

对工业相机进行标定,求解出相机的内参矩阵和畸变系数。QR 码识别过程涉及两个坐标系之间的转换(图 6),一个是工业相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$,其原点 O_c 位于相机的光心,另一个是 QR 码坐标系 $O_q-X_qY_qZ_q$,原点 O_q 在 QR 码左上角的角点处。通过

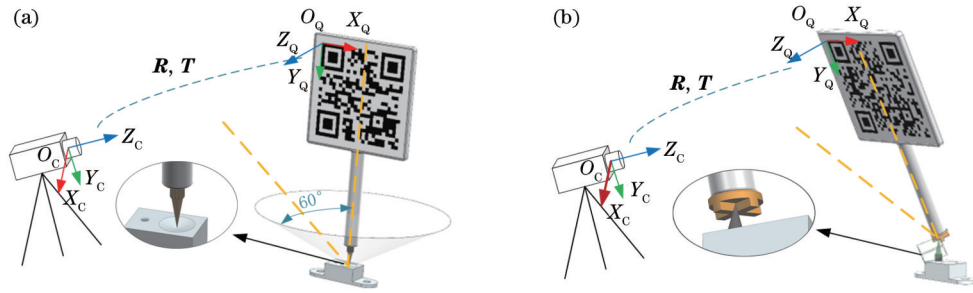


图5 探针标定原理。(a)针状测头的探针标定原理；(b)倒角型测头的探针标定原理

Fig. 5 Probe calibration principle. (a) Probe calibration principle for needle probe; (b) probe calibration principle for chamfered probe

相机识别 QR 码,确定 QR 码上 4 个角点(角点位置如图 6 所示)的像素坐标,由于 4 个角点间真实的物理距离已知,可构建对应角点之间的 2D-3D 关系,利用 PnP^[19]算法求解出 QR 码坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T 。

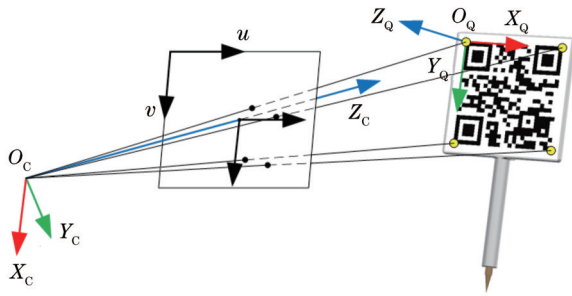


图6 QR码位姿计算原理图

Fig. 6 Schematic of QR code pose calculation

2.1.2.2 探针尖点标定

参考文献[13]提出的手术器械尖点标定算法原理,探针测头尖点与固定的标定基座形成点接触,标定过程中,探针围绕测头尖点进行旋转,并保证 QR 码始终在相机的视野内。设 $X = (x, y, z)^T$ 为待求的测头尖点在 QR 码坐标系下的坐标, $X_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ 为测头尖点在相机坐标系下的坐标,测头尖点在 QR 码坐标系下的坐标可利用 2.1.2.1 节求出的 R 、 T 转到相机坐标系下,转换公式为

$$X_c = RX + T. \quad (1)$$

根据探针旋转过程中,测头尖点在相机坐标系下坐标不变的原理,得到

$$R_1 X + T_1 = R_2 X + T_2 = \dots = R_n X + T_n, \quad (2)$$

式中: R_1, R_2, \dots, R_n 为不同靶标姿态对应的 QR 码坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵; T_1, T_2, \dots, T_n 为对应的平移向量。

为了精确拟合出靶标探针测头尖点在 QR 码坐标系下的坐标,将式(2)中相机坐标系下的 n 个尖点坐标两两相减,再将差值相加,赋值到一个 3×1 的矩阵 V :

$$V = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [(R_j X + T_j) - (R_i X + T_i)] = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [(R_j - R_i) X - (T_i - T_j)]. \quad (3)$$

最终需要使得 V 最小,令 V 为零矩阵,通过非线性方程组最小二乘法的广义逆法求解方程

$$X = (R_j - R_i)^+ (T_i - T_j) = \begin{bmatrix} R_2 - R_1 \\ R_3 - R_2 \\ \vdots \\ R_j - R_i \end{bmatrix}_{3(n-1) \times 3}^+ \begin{bmatrix} T_1 - T_2 \\ T_2 - T_3 \\ \vdots \\ T_i - T_j \end{bmatrix}_{3(n-1) \times 1}, \quad (4)$$

最终即可标定出尖点在靶标坐标系下的坐标 X 。

2.2 基于 SVD 的位姿变换模型

2.2.1 虚实映射空间位姿变换

本文方法需要基于一个稳定的虚实映射空间,因此选用目前空间定位能力较强、工业领域应用较多的微软 HoloLens2 头戴式增强现实眼镜^[20],它包括 1 个深度摄像头、1 个 RGB 摄像机、4 个可见光环境跟踪摄像机和 1 个惯性测量单元(IMU)等。HoloLens2 能够扫描和重建周围场景,从而精确定 AR 眼镜在场景中的位置^[21]。采用世界锁定工具(WLT),在传统 SLAM 空间基础上创建了一个更加稳定的虚实映射空间,即世界锁定空间,本实验将在这个空间下实现虚实配准的过程。该过程主要涉及 3 个坐标系,分别是:世界锁定空间坐标系($O_F-X_F Y_F Z_F$)——虚实映射空间的世界坐标系,多点注册的位姿变换都是在这个坐标系下进行的;虚拟模型坐标系($O_V-X_V Y_V Z_V$)——三维模型父节点的坐标系;真实物体坐标系($O_R-X_R Y_R Z_R$)——待配准真实零件的坐标系。本文方法将在世界锁定空间坐标系下实现虚拟物体坐标系到真实物体坐标系的坐标变换,坐标转换关系如图 7 所示。

2.2.2 注册点选择原理

多点注册过程涉及两类注册点的选择:一类为虚拟场景中三维模型上的点,本文称为虚拟注册点;另一类是真实零件上的点,本文称为真实注册点。首先在 unity 开发中预设多个点,通过顶点吸附的方式分别在那些点绑定一个 GameObject,方便后续精确定虚拟注册点的位置。在进行虚实注册时,通过按钮或手势

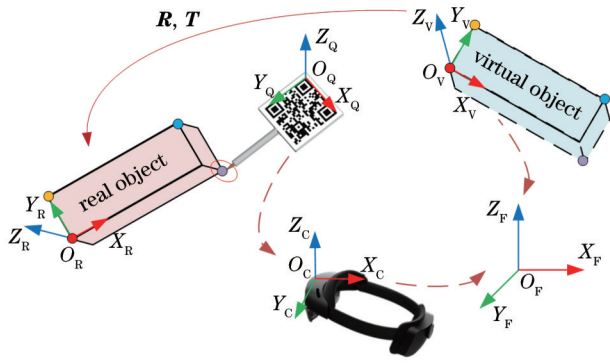


图 7 虚实映射空间下坐标系转换关系

Fig. 7 Coordinate system transformation relations in the space of virtual-real mappings

等交互方式在预设的点中挑选几个作为虚拟注册点,通过 GameObject.transform.position 的方式读取对应虚拟注册点在世界锁定空间坐标系下的坐标。真实注册点选择的原理是利用 AR 眼镜的相机识别探针上的 QR 码,计算出相机坐标系与 QR 码坐标系之间(此时 QR 码坐标系和探针标定时的设置一致)的位姿变换,然后利用眼镜开发的函数接口实现相机坐标系到世界锁定空间坐标系的变换,最后根据式(4)的探针标定结果,即可确定测头尖点在世界锁定空间坐标系下的坐标,将探针测头尖点接触真实零件上对应的注册点,可以求出真实注册点在世界锁定空间坐标系下的坐标。

2.2.3 SVD 位姿变换求解原理

参考文献[22]利用 SVD 求解位姿变换的原理,选取真实零件和三维模型上至少 3 对注册点,利用奇异值矩阵分解方法,求解出三维模型到真实零件的坐标变换。详细求解步骤如下:

$$B = RA + T, \quad (5)$$

式中: R 、 T 为最终需要求出的两组点间的旋转矩阵和平移向量; B 为虚拟注册点组成的矩阵; A 为真实注册点组成的矩阵。

注册点用式(6)表示:

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

计算 A 、 B 对应点集的中心点,即

$$\bar{P}_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_A^i, \quad (7)$$

$$\bar{P}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_B^i, \quad (8)$$

式中: P_A^i 为 A 对应点集的第 i 个点; P_B^i 为 B 对应点集的第 i 个点; \bar{P}_A 为 A 对应点集的中心点; \bar{P}_B 为 B 对应点集的中心点。

构建一个协方差矩阵 H ,

$$H = \sum_{i=1}^n (P_A^i - \bar{P}_A)(P_B^i - \bar{P}_B)^T. \quad (9)$$

利用奇异值分解法对该矩阵进行转化,得到

$$H = UAV^T, \quad (10)$$

$$[U, S, V] = \text{SVD}(H), \quad (11)$$

式中: A 为对角矩阵。对矩阵 H 进行 SVD 分解,得到左奇异向量矩阵 U 、右奇异向量矩阵 V 和奇异值矩阵 S 。

求解旋转矩阵 R 和平移向量 T :

$$R = VU^T, \quad (12)$$

$$T = -R\bar{P}_A + \bar{P}_B. \quad (13)$$

按照式(14),移动虚拟模型坐标系到指定位置,实现虚实配准。

$$Y = RX + T. \quad (14)$$

式中: X 为虚拟模型坐标系原点坐标; Y 为位姿变换后的虚拟模型坐标系原点坐标。

3 实验

3.1 多点注册技术实现流程

本系统的实现流程如图 8 所示,具体如下:

1) 本文的验证对象为实验室内一个 $3 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 尺寸范围内的机翼,为获得与实际零件更相符的三维模型,首先通过 MetraScan 三维扫描设备(扫描精度优于 0.1 mm)对机翼进行扫描,生成点云数据,然后利用 Geomagic Studio 软件对点云进行预处理,包括多余部分删除、去噪、滤波、采样等操作,最后将点云数据转成 obj 三角形网格数据。

2) 利用 Pixyz Studio 软件对模型进行减面、隐藏剔除等轻量化操作,然后转换成 unity 可以使用的 fbx 格式。

3) 根据飞机待配准零部件的关键点特征,选择合适的测头。由于本文选用的验证对象比较老旧,通孔、倒斜角等特征已经变形、磨损,因此选择针状测头,将测头安装到探针支架上,并确保螺纹旋紧,后续将基于针状测头的靶标探针完成整个虚实注册实验与注册精度分析。需要注意的是,本文方法实现时可以使用一种探针,也可以组合使用多种探针,如果零件上离散分布有同类型的特征(通孔、倒角等),则推荐使用一种测头完成注册,注册效率较高。若零件上离散分布不同类型的特征,可以使用针状测头或者组合使用不同类型的探针,组合使用前须标定好每个探针,并将每个探针的标定结果导入到多点注册程序中,在测量真实注册点时进行不同的坐标转换。

4) 用单目标定系统对探针进行标定,详细的标定流程见 3.2 节的探针标定实验。

5) 多点注册程序基于 unity 2021.3.29f1c1 平台与混合现实工具包 MRTK 开发,具体涉及 AR 眼镜端的 QR 码识别、注册点分布、位姿变换求解、WLT 虚实空间对齐、人机交互等内容的开发。

6) unity 中设置预设点。预设点的位置尽量选择零件的倒角处,且容易被靶标探针测量,预设点的数量要多于注册点的数量且尽量离散地分布在整个模型

上,方便后续挑选注册点。软件开发完成后将程序部署到 AR 眼镜中。

7) 打开 AR 眼镜中多点注册程序,从预设的点中至少挑选 3 个虚拟注册点,具体的数量由实际零件的

结构来确定,注册点尽量不要分布在同一个平面,利用标定好的探针依次测量零件上对应的真实注册点,并通过 SVD 求解出的位姿变换将模型配准到真实的零件上。

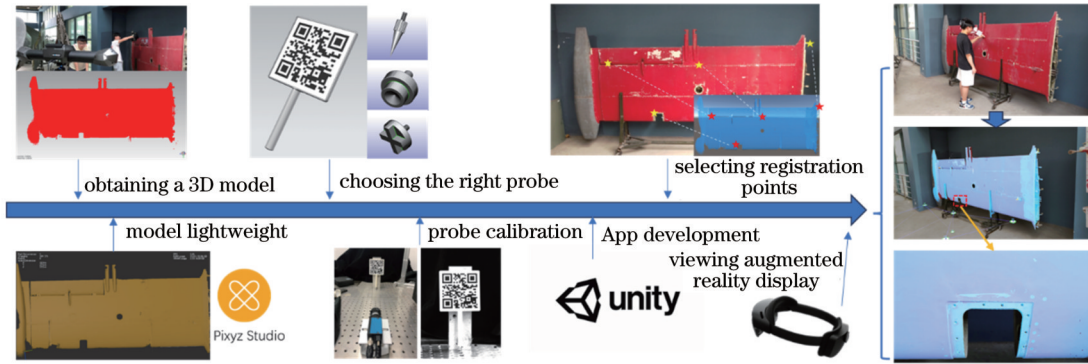


图 8 基于多点的虚实注册流程图

Fig. 8 Flowchart for multi-point based virtual to real registration

3.2 探针标定实验

3.2.1 探针标定

如图 9 所示,探针标定采用一个工业相机,分辨率为 1280 pixel×960 pixel,镜头焦距为 8 mm。参考文献[17]的标定过程,将工业相机和标定基座固定在光学平台上,采用针状测头进行实验,探针测头针尖接触标定基座的锥形孔的顶点,探针围绕顶点进行旋转,改变姿态时须保证靶标探针上的 QR 码始终在相机的视野中,且相机光轴尽量垂直于 QR 码所在的平面,旋转姿态在视野范围内的变化尽可能大,可以用双面胶将探针支架固定在工件上,使相机能够拍摄到更稳定的图像(图 10)。拍摄 10 个不同姿态的 QR 码图像作为一组,然后以相同的方法拍摄 10 组数据。根据采集的图像,计算出相机坐标系与 QR 码坐标系之间的 R 、 T 数据,按式(4)标定出测头尖点在 QR 码坐标系下的坐标。



图 10 相机拍摄到的画面

Fig. 10 Image captured by the camera

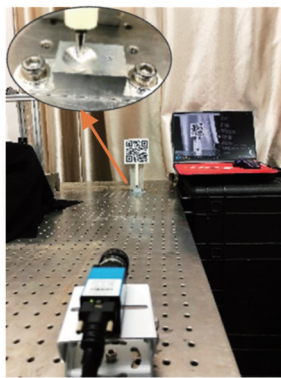


图 9 探针标定实验环境

Fig. 9 Probe calibration experiment

标定结果如表 1 所示,根据式(15)计算该组数据的样本标准偏差,结果表明,在靶标坐标系下, x 、 y 、 z 三个方向的标准偏差分别为 0.614、0.568、0.649 mm。

标定结果具有较高的稳定性,取平均值作为最终的测头尖点在靶标坐标系下的坐标。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (15)$$

式中: s 为样本标准偏差; n 表示尖点坐标的个数; x_i 表示第 i 个尖点坐标某个坐标轴分量的大小; \bar{x} 为对应坐标轴分量的平均值。

用同样的评价方法对其他类型的测头进行标定,标定结果如表 2 所示。通孔型测头在 x 、 y 、 z 3 个方向的标准偏差分别为 0.356、0.672、0.492 mm;倒角型测头在 x 、 y 、 z 3 个方向的标准偏差分别为 0.811、0.936、0.929 mm。由此可以看出,倒角型测头的标准差相对较大,原因主要是探针标定旋转的范围相对较小。总之,不同测头的轴向标准偏差均能稳定在 1 mm 内,验证了所提探针标定方法的合理性。

3.2.2 单点重复性实验

为验证靶标探针标定结果的稳定性,进行基于 HoloLens2 的单点重复性实验(图 11、图 12),将探针

表 1 针状测头的靶标探针标定数据

Table 1 Target probe calibration data for needle probes

Serial number	x /mm	y /mm	z /mm
1	44.438	208.647	-8.385
2	44.886	210.309	-8.355
3	46.096	209.885	-7.638
4	45.210	209.903	-7.617
5	45.380	209.874	-7.030
6	45.244	209.491	-7.878
7	44.438	209.048	-9.276
8	46.311	209.019	-7.267
9	44.945	209.807	-7.520
10	45.193	208.760	-7.902
Average value	45.214	209.474	-7.887
Standard deviation	0.614	0.568	0.649

表 2 其他测头的靶标探针标定数据

Table 2 Target probe calibration data for other probes

Probe type	\bar{x} /mm	\bar{y} /mm	\bar{z} /mm	s_x /mm	s_y /mm	s_z /mm
Through-hole	44.438	208.647	-8.385	0.356	0.673	0.492
Chamfer	46.096	209.885	-7.638	0.811	0.936	0.929

测头针尖放在标定基座锥形孔顶点处,探针围绕锥形孔的顶点旋转,旋转过程中保证 HoloLens2 以较好的姿态识别 QR 码,测量 10 组尖点的坐标,并按式(15)计算标准偏差。

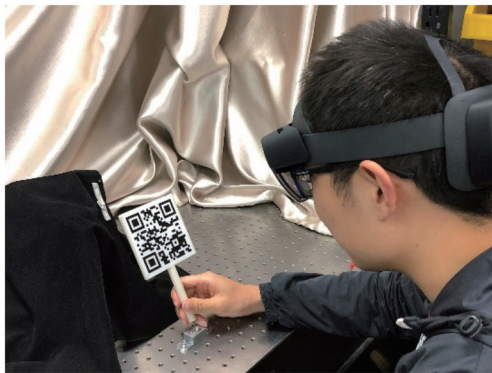


图 11 基于 HoloLens2 的单品重复性实验

Fig. 11 HoloLens2-based single-point repeatability experiments

从表 3 可以看出, x 、 y 、 z 3 个轴向的标准偏差均不超过 1.8 mm,该误差在大尺寸部件的虚实注册过程中属于微小误差,验证了所设计的靶标探针满足多点注册方法的使用需求。

3.3 虚实注册精度验证实验

参考文献[23]的虚实注册精度评价方法,可以使用虚拟注册点与真实注册点之间的线性误差来量化虚实配准精度。为更好地评价模型不同区域的注册精

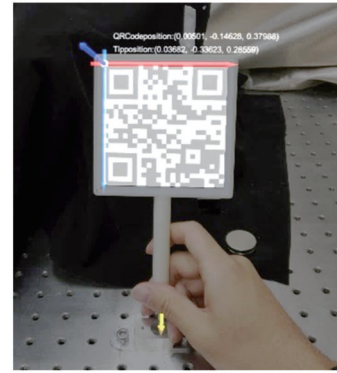


图 12 HoloLens2 中看到的画面

Fig. 12 An image seen in HoloLens2

表 3 靶标探针单点重复性实验数据

Table 3 Single point repeatability experiment data of target probe

Serial number	x /mm	y /mm	z /mm
1	-32.1244	726.150	474.6423
2	-31.1201	-725.541	474.0104
4	-33.6461	-726.053	474.5787
5	-32.1339	-726.920	475.9925
6	-30.4558	-724.253	478.0665
7	-35.4618	-726.092	475.9372
9	-33.2491	-725.900	477.5845
10	-31.6545	-725.449	472.8879
Standard deviation	1.783	0.817	1.548

度,设置 14 对测试点,包含 14 个虚拟测试点(模型上的点,其坐标视为真值;图 13)与 14 个真实测试点(真实零件上的点;图 14),把它们尽量离散地布置在整个模型上。虚拟、真实测试点均在世界锁定空间坐标系下,通过计算虚拟测试点和对应真实测试点之间的欧氏距离来评价每个点的虚实注册误差。首先,对每个真实测试点测量 6 次,计算这 6 次真实测试点的均值与虚拟测试点的欧氏距离,该距离作为这个点的注册误差;然后,取 14 个测试点注册误差的平均值来代表整个三维模型的虚实注册误差,并计算 14 个测试点的均方根误差(RMSE),评价虚拟测试点与真实测试点之间的偏离程度。

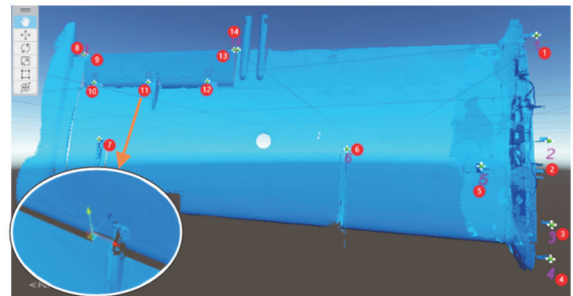


图 13 设置虚拟测试点

Fig. 13 Setting up virtual test points

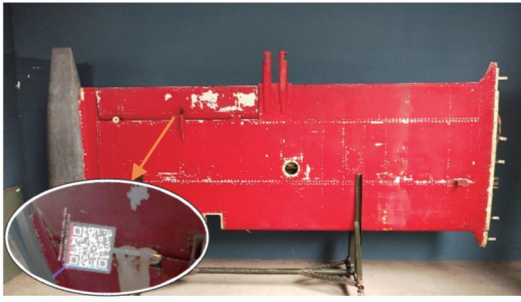


图 14 选择真实测试点

Fig. 14 Selecting real test points

选择 6 个注册点进行虚实配准,注册点尽量不设置在一个平面内,且均匀分布,注册点设置如图 15 所示,虚实配准效果如图 16 所示。

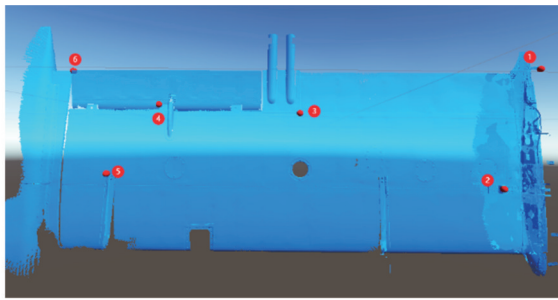


图 15 unity 中设置的注册点

Fig. 15 Registration points set in unity

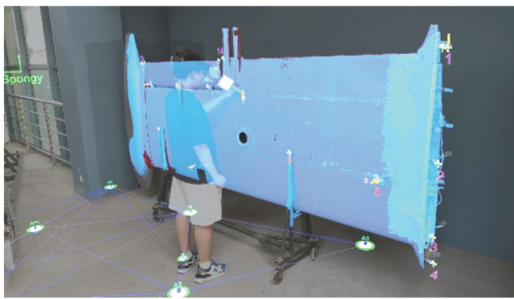


图 16 真实点选取以及虚实配准效果

Fig. 16 Real points selection and effectiveness of virtual-real registration

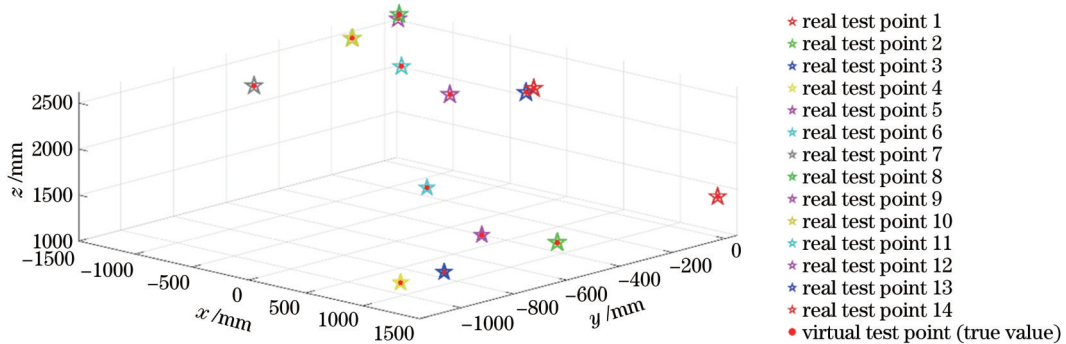


图 17 虚拟、真实测试点空间分布

Fig. 17 Spatial distribution of virtual and real test points

虚拟测试点、真实测试点的空间分布如图 17 所示,其中实心圆代表虚拟测试点的空间位置,五角星的中心坐标代表真实测试点的空间位置。可以看出,相对于整个机翼,14 对测试点的注册误差较小。每个测试点的平均虚实注册误差以及三维模型整体的虚实注册误差如表 4 所示。统计得出 14 对点的平均虚实注册误差为 2.892 mm, RMSE 为 3.213 mm, 这表明所设计系统针对大尺寸零件具有较高的整体虚实配准精度。

表 4 6 个注册点对应的虚实注册误差

Table 4 Virtual-real registration errors corresponding to six registration points

Test point	Mean error /mm
1	2.412
2	2.893
3	5.363
4	6.551
5	1.774
6	3.539
7	1.721
8	2.732
9	2.379
10	1.865
11	1.646
12	1.573
13	3.016
14	3.021
Average value	2.892

3.4 注册点数量与布局实验

参考文献[24]的理论分析,得出注册点的数量与布局对注册精度以及注册效率有较大的影响,本文通过实验对这两个影响因素进行分析。

3.4.1 注册点数量验证实验

由于注册点至少为 3 对,下面依次采用 3、4、5、6、7、8、9 对注册点进行实验分析。实验过程中仅保证注册点数量变化,其他条件尽量保持不变(例如:用相同的探针、HoloLens2 相机识别靶标的姿态基本一致

等), 尽量将注册点设置在零件易于精准选取的位置, 且注册点在空间中尽量均匀分布, 按照 3.3 节计算虚实注册精度与 RMSE, 重复实验 3 次, 统计结果如图 18、图 19 所示。

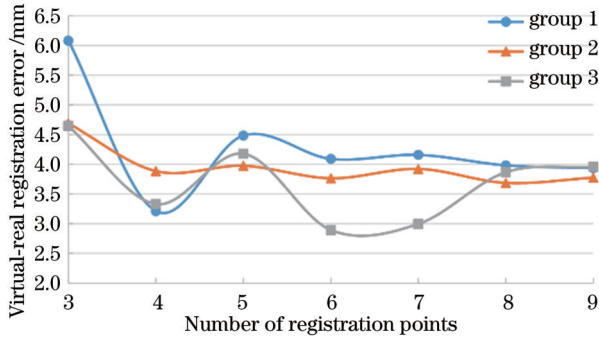


图 18 不同注册点数对应的虚实注册误差

Fig. 18 Virtual-real registration errors corresponding to different number of registration points

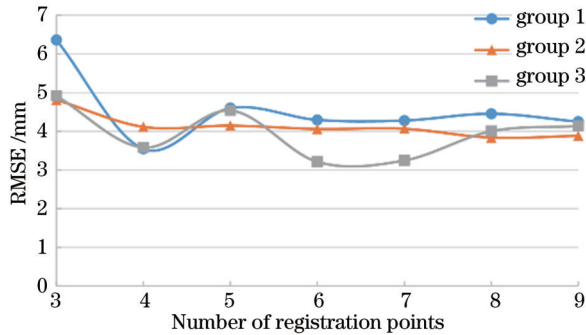


图 19 不同注册点数对应的 RMSE

Fig. 19 RMSE corresponding to different number of registration points

从图 18 可以看出, 3 对注册点时注册误差较大, 且随着注册点数量的增加, 注册误差逐渐减小并趋于稳定。从图 19 可以看出, 3 对注册点时 RMSE 较大, 随着注册点数量的增加, RMSE 下降不明显并保持稳定。因此, 针对本文的验证对象, 注册点至少选择 4 对。

3.4.2 注册点分布验证实验

注册点分布的范围对注册结果也会产生重要影响。本实验选择 5 对注册点, 用覆盖率来量化注册点覆盖三维模型的程度。覆盖率是指所有注册点在零件水平方向覆盖的最大距离占整个零件水平方向尺寸的比例(图 20)。依次测试覆盖率为 10%、15%、20%、25%、50%、80%、90% 时的虚实注册情况, 统计结果如图 21、图 22 所示。

从图 21 可以看出, 当注册点覆盖率小于 30% 时, 注册误差和 RMSE 均较大, 出现注册不稳定的情况, 随着注册点覆盖率的增大, 注册误差与 RMSE 均呈现逐渐降低的趋势。可见, 注册点的分布尽量覆盖整个模型。

综上所述, 在实际基于多点的虚实注册过程中, 至

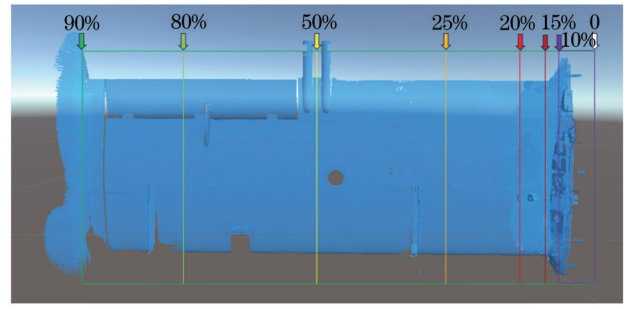


图 20 注册点分布覆盖率示意图

Fig. 20 Schematic of coverage rate of the distribution of registration points

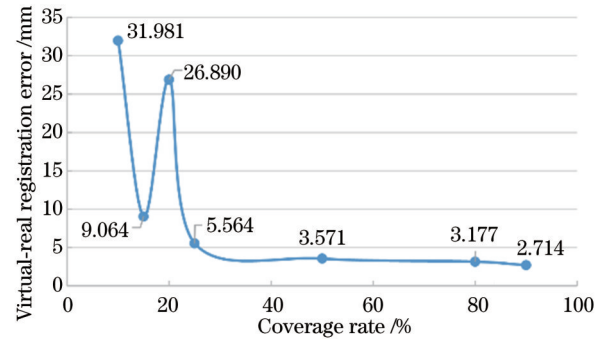


图 21 不同覆盖率对应的虚实注册误差

Fig. 21 Virtual-real registration errors corresponding to different coverage rates

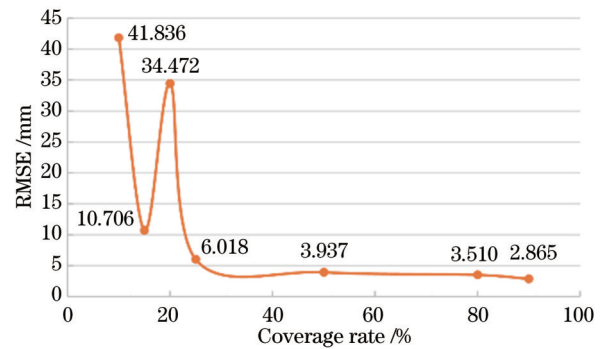


图 22 不同覆盖率对应的 RMSE

Fig. 22 RMSE corresponding to different coverage rates

少选择 4 对注册点, 具体的数量可根据零件的大小进行调整, 同时需要考虑注册点对过多带来注册效率低的问题, 注册点分布尽量覆盖整个模型且不在同一个平面内。

4 结 论

所提出的多点注册方法可以有效提升大尺寸零部件的虚实配准精度, 且该方法具有计算量较小、对待虚实配准物体的结构没有特殊要求的优点。需要注意的是, 本文方法部分依赖于 HoloLens2 较稳定的空间定位技术, 后续将继续研究提高增强现实设备空间定位精度与稳定性的方法, 进一步提高虚实注册的稳定性。

此外,探针标定的精度对后续的注册和精度验证非常关键,可以设计更高精度的探针或改进其标定算法,以进一步提高虚实注册的精度。

参 考 文 献

- [1] 刘远, 孟少华, 陈畅宇, 等. 增强现实技术最新研究进展及航空航天领域应用[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(1): 125-132.
Liu Y, Meng S H, Chen C Y, et al. Research on the latest progress augmented reality technology and its application in aerospace[J]. Computer & Digital Engineering, 2023, 51(1): 125-132.
- [2] 魏祺, 郭宇, 汤鹏洲, 等. 增强现实在复杂产品装配领域的关键技术研究与应用综述[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3): 649-662.
Wei Z, Guo Y, Tang P Z, et al. Research and application of augmented reality in complex product assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(3): 649-662.
- [3] Chouchene A, Ventura Carvalho A, Charrua-Santos F, et al. Augmented reality-based framework supporting visual inspection for automotive industry[J]. Applied System Innovation, 2022, 5(3): 48.
- [4] 方维, 许澍虹, 韩磊, 等. AR增强装配中的跟踪注册方法研究与应用进展[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1438-1454.
Fang W, Xu S H, Han L, et al. Research and application progress of tracking registration methods in AR assembly[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1438-1454.
- [5] Fang W, Chen L X, Zhang T N, et al. Head-mounted display augmented reality in manufacturing: a systematic review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 83: 102567.
- [6] Hoque S, Arafat M Y, Xu S X, et al. A comprehensive review on 3D object detection and 6D pose estimation with deep learning [J]. IEEE Access, 2021, 9: 143746-143770.
- [7] Cao P X, Li W X, Ma W P. Tracking registration algorithm for augmented reality based on template tracking[J]. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(2): 257-266.
- [8] Marvasti-Zadeh S M, Cheng L, Ghanei-Yakhdan H, et al. Deep learning for visual tracking: a comprehensive survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(5): 3943-3968.
- [9] 郭中远, 徐锋, 王贵洋, 等. 基于虚拟现实的移动机器人真实环境三维建模系统[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(2): 0233001.
Guo Z Y, Xu F, Wang G Y, et al. 3D modeling system of mobile robot based on virtual reality in real environment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(2): 0233001.
- [10] Andrews C M, Henry A B, Soriano I M, et al. Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices[J]. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 2020, 9: 4900214.
- [11] van Doormaal T P C, van Doormaal J A M, Mensink T. Clinical accuracy of holographic navigation using point-based registration on augmented-reality glasses[J]. Operative Neurosurgery, 2019, 17(6): 588.
- [12] 于德旺, 王殊轶, 姜陶然, 等. 基于HoloLens的增强现实手术导航系统研究[J]. 北京生物医学工程, 2020, 39(3): 244-250.
Yu D W, Wang S Y, Jiang T R, et al. Research on augmented reality surgery navigation system based on HoloLens[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2020, 39(3): 244-250.
- [13] 徐律. 基于增强现实的计算机辅助手术规划与导航系统关键技术及实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Xu L. Key technologies and experimental research of computer aided surgery planning and navigation system based on augmented reality[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [14] Costa J N, Gomes-Fonseca J, Valente S, et al. Ultrasound training simulator using augmented reality glasses: an accuracy and precision assessment study[C]//2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), July 11-15, 2022, Glasgow, Scotland, United Kingdom. New York: IEEE Press, 2022: 4461-4464.
- [15] 于之靖, 郑建文, 陶永奎, 等. 基于光场成像的三点式光笔测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032001.
Yu Z J, Zheng J W, Tao Y K, et al. Three-point light pen measurement method based on light field imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032001.
- [16] 黄风山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Huang F S. Research on key technologies of light pen single camera three-dimensional coordinate vision measurement system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [17] 郑兴纯, 赵敏, 冯少华. 平面靶标测头中心的两步法标定[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011201.
Zheng X C, Zhao M, Feng S H. Two-step calibration of probe tip center of planar target[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011201.
- [18] Shan D R, Zhang C L, Zhang P, et al. Self-calibration method and pose domain determination of a light-pen in a 3D vision coordinate measurement system[J]. Sensors, 2022, 22(3): 1029.
- [19] 陈津平, 吴晓亮. 参考点共面条件下的稳健相机位姿估计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 0411004.
Chen J P, Wu X L. Robust camera pose estimation method under coplanar reference point conditions[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(4): 0411004.
- [20] Park S, Bokijonov S, Choi Y. Review of microsoft HoloLens applications over the past five years[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7259.
- [21] Hübner P, Clintworth K, Liu Q Y, et al. Evaluation of HoloLens tracking and depth sensing for indoor mapping applications[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1021.
- [22] 胡春梅, 费华杰, 夏国芳, 等. 激光扫描与摄影测量异源点云高精度配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(24): 2415007.
Hu C M, Fei H J, Xia G F, et al. High-precision registration of non-homologous point clouds in laser scanning and photogrammetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(24): 2415007.
- [23] Jiang T R, Yu D W, Wang Y Q, et al. HoloLens-based vascular localization system: precision evaluation study with a three-dimensional printed model[J]. Journal of Medical Internet Research, 2020, 22(4): e16852.
- [24] 张皓琳, 林嘉睿, 郝继贵. 三维坐标转换精度及其影响因素的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(10): 26-31.
Zhang H L, Lin J R, Zhu J G. Three-dimensional coordinate transformation accuracy and its influencing factors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(10): 26-31.

Multi-Point Precision Virtual-Real Registration Method for Aircraft Piping and Cable Assembly

Cheng Changzhi¹, Cui Haihua^{1*}, Liu Yongqiang¹, Wang Jiarui¹, Luo Yuanqi², Li Mingyuan²,
Li Pengcheng¹

¹College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing
210016, Jiangsu, China;

²AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, Shaanxi, China

Abstract

Objective Augmented reality technology can superimpose virtual information onto the real environment, which has a broad application prospect in the field of aircraft assembly. At present, aircraft piping and cables still mainly rely on manual assembly, usually using 2D drawings or 3D models for guidance. However, 2D drawings are usually difficult to accurately display complex assembly details, which can easily lead to misunderstandings or omissions. Furthermore, computers are usually placed in designated areas outside the cabin, so that workers need to interrupt the assembly work to view the 3D model, resulting in low assembly efficiency. With the help of augmented reality technology, the 3D model, process information, and other virtual content can be directly projected into the actual assembly scene, which provides workers with 3D visualization guidance and reduces the difficulty of their understanding. Subsequently, the augmented reality technology can be applied to the assembly quality inspection process, thus significantly improving production efficiency. Virtual-real registration is a key technology in augmented reality application, which determines the accuracy of virtual-real object alignment, and commonly used virtual-real registration methods such as sign-based, model recognition-based, and human-computer interactive. However, these methods make it difficult to realize the accurate registration of large-size and structurally complex aircraft parts, which results in the great limitation of augmented reality-based assembly guidance technology in the application of the industrial field. Therefore, we propose a multi-point augmented reality registration method for aircraft pipeline cable assembly, which combines target probe design and calibration, SVD-based positional transform solution and World Locking Tools (WLT) augmented reality space precision locking to effectively improve the accuracy of the augmented reality alignment of large-size parts.

Methods First, we design a handheld target probe and calibrate it to determine the coordinates of the tip point of the probe under the target coordinate system, achieving a more accurate measurement of the point on the surface of the part. Second, we conduct the multi-point virtual-real registration based on SVD. The target mark on the probe uses a QR code, and the size is designed to be 10 cm×10 cm. Different probe tips are designed according to the typical features of aircraft parts, including universal needle probes, through-hole probes, and chamfered probes. The probe calibration system uses an industrial camera and rotary calibration is conducted around the tip of the probe. The probe calibration process target needs to always be in the field of view of the camera. The probe calibration principle is the same for different probes, namely that in the probe rotating process, the probe tip coordinates in the camera coordinate system are always unchanged. Unity is adopted to develop the multi-point registration program, specifically relating to QR code recognition, registration point distribution, singular value decomposition for attitude transformation, WLT virtual-real space alignment method development, human-computer interaction, virtual scene content layout, and other content development. After deploying the developed program into HoloLens2 glasses and running the developed App, firstly, we select the suitable registration points on the virtual model. Then we use the target probe to select the corresponding points on the real parts and utilize the singular value matrix decomposition method to solve the positional transformation between these two groups of points in the virtual-real mapping space of the augmented reality device. Finally, the 3D model can be aligned to the real parts according to this transformation.

Results and Discussions We experimentally verify the effectiveness of the target probe calibration (Tables 1 and 2). Under the target coordinate system, the standard deviation of the tip coordinates in the three axes of x , y , and z are all less than 1 mm, and the calibration results have a high degree of stability. From HoloLens2 single-point repeatability experiments (Table 3), we can see that the standard deviation of the three axial directions is not more than 1.8 mm and the error in the process of large-size parts of the virtual-real registration process is tiny, verifying that the designed target probe meets the needs of the use of multi-point registration method. To quantify the virtual registration accuracy of large-size parts, we apply the target probe to test the virtual-real alignment accuracy of the wing within the range of 3 m×1.4 m×

0.5 m. The experimental results show that the absolute accuracy of the virtual-real registration can be better than 3 mm, which meets the needs of actual aircraft pipelines and cables for augmented-reality assembly guidance applications. We also analyze the impact of the number of registration points and layout on the accuracy of virtual-real registration based on experiments. We carry out experiments in turn with 3, 4, 5, 6, 7, 8, and 9 pairs of registration points (Fig. 18, Fig. 19), and the experimental results show that the registration error and the RMSE are larger when 3 pairs of registration points are used. With the increase in the number of registration points, the registration error gradually decreases and tends to be stable, and the RMSE declines insignificantly and remains stable. Therefore, it is more appropriate to choose at least 4 pairs of registration points for the validation object of this paper. The distribution of registration points is also analyzed experimentally (Fig. 21), and the results show that when the coverage of registration points is less than 30%, the registration error and RMSE are larger, and there is unstable registration. With the increase in the coverage of registration points, the registration error and RMSE show a gradual trend of decreasing. Thus the distribution of the registration points tries to cover the whole model as much as possible. In conclusion, our method can realize the accurate virtual registration of large-size 3D models, and the number of registration points can be adjusted according to the size of the parts. At the same time, we need to consider the problem of low registration efficiency caused by too many pairs of registration points, and the distribution of registration points covers the whole model and is not in the same plane as much as possible.

Conclusions Our multi-point registration method can effectively improve the accuracy of virtual-real alignment of large-size parts, and the method also has the advantages of lower algorithmic computation and no special requirements for the structure of the object to be virtual-real aligned. It should be noted that this method partially relies on the more stable spatial localization technology of HoloLens2, and subsequent research will continue to improve the spatial localization accuracy and stability of augmented reality devices to further improve the stability of the virtual-real registration. In addition, the accuracy of the probe calibration is very critical to the subsequent registration and accuracy verification, and higher precision probes can be designed or their calibration algorithms can be improved to further improve the accuracy of the virtual-real registration.

Key words measurements; aircraft assembly; augmented reality; virtual-real registration; probe calibration; multi-point registration