

文章编号 1004-924X(2024)21-3184-16

基于拉绳位移传感器的飞机大部件对接 测量场构建与位姿求解

王洪喜^{1,2*}, 孙正阳^{1,2}, 刘冰^{1,2}, 王冠伟^{1,2}

(1. 西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 精密与超精密加工及测量国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710021)

摘要:针对激光、iGPS、视觉图像等位姿测量系统容易受到温度、湿度、空气扰动、转站以及视线遮挡等因素影响的问题, 运用拉绳位移传感器构建了一种用于检测飞机大部件相对位姿的测量场, 并采用BP神经网络-牛顿迭代法求解飞机大部件的相对位姿。通过6组拉绳位移传感器在飞机大部件对接面间的合理布局, 建立飞机大部件对接位姿计算理论模型, 并运用神经网络-牛顿迭代算法对位姿进行求解。数值仿真结果显示, 位置最大误差绝对值为 4.9×10^{-7} mm, 姿态角最大误差绝对值为 $1.97 \times 10^{-9}^\circ$, 通过误差仿真并与实验结果进行对比分析, 验证了采用拉绳位移传感器构建测量场并运用神经网络-牛顿算法求解大部件位姿是可行的。该方法不易受外界环境的影响, 能够准确检测大部件的相对位姿。

关键词:大尺寸测量; 拉绳位移传感器; 大部件; 位姿; BP神经网络算法; 牛顿迭代法

中图分类号: V19; TP312 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243221.3184

Docking measurement field construction and pose solving for aircraft large components based on draw-wire displacement sensors

WANG Hongxi^{1,2*}, SUN Zhengyang^{1,2}, LIU Bing^{1,2}, WANG Guanwei^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Precision and

Ultra-precision Machining and Measurement, Xi'an 710021, China)

* Corresponding author, E-mail: wanghongxi@xatu.edu.cn

Abstract: To address the challenges posed by environmental factors such as temperature, humidity, air turbulence, station transfer, and line-of-sight obstructions in pose measurement systems like laser-based, iGPS, and visual imagery methods, a novel measurement field employing draw-wire displacement sensors was developed for detecting the relative pose of large aircraft components. The relative positions and orientations of these components were calculated using a back propagation BP neural network-Newton iteration method. By strategically arranging six sets of draw-wire displacement sensors along the docking surfaces of the aircraft components, a theoretical model for pose determination was established. The pose was subsequently resolved through the neural network-Newton algorithm. Numerical simulations demonstrate that the maximum position error is 4.9×10^{-7} mm, and the maximum attitude angle error is $1.97 \times 10^{-9}^\circ$.

收稿日期: 2024-06-13; 修订日期: 2024-07-15.

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (No. 2023A02010-2); 国际科技合作计划资助项目 (No. 2019KW-048)

Comparative analyses between error simulations and experimental results confirmed the feasibility and precision of this approach. The findings indicate that the proposed method remains robust against external environmental disturbances and enables highly accurate detection of the relative pose of large components.

Key words: large dimension measurement; draw-wire displacement sensor; large components; pose; BP neural network algorithm; Newton iteration method

1 引言

飞机大部件数字化对接系统可极大地提高飞机装配的质量、缩短对接周期^[1-2],主要由数字化测量系统、机械传动装置以及集成控制系统组成。其中,数字化测量系统^[3-5]是飞机大部件位置和姿态(后文简称为位姿)准确解算的基础,常见的数字化测量辅助装配技术有激光雷达、激光跟踪仪、激光扫描仪、iGPS 以及工业相机等。

在飞机大部件位姿对接测量过程中,常用的光学、图像等测量方法,容易受到转站和光线遮挡等因素的影响,因此有必要寻求一种高效、健壮性更好的姿态测量场和姿态求解方法。有学者在拉绳位移传感器应用领域进行了探索。Ceccarelli M 等^[6]设计了基于拉绳位移传感器的 Cassino 跟踪系统,用于检测执行器末端的位移和旋转角度,建立了误差评估模型并根据实验进行了误差评估。Ottaviano E 等^[7]介绍了一种基于拉绳位移传感器的 6 自由度并联机器人作为人体行走实验识别的测量系统,提出了六自由度测量系统的理论模型并且进行了实验。Hulth J 等^[8]将拉绳位移传感器应用于测量冰川净消融引起的地表下降,实验表明,拉线传感器可用于连续测量冰川净消融速率,具有高精度、高精度和时间分辨率。Wang 等^[9]设计了一种基于拉线的深海管道姿态测量系统,通过利用一个拉线位移传感器并结合两个磁耦合角度传感器和一个正交角度传感器,完成了两条海底管道的相对距离和角度的测量。Zhang 等^[10]利用一条测量绳与多个双轴倾斜传感器等装置,并基于机器人理论和转移矩阵算法,建立了基于不同定位模式的测量模型,求解出管道之间的相对位置信息。

上述研究中,主要将拉绳位移传感器应用于机器人系统,或结合其他传感器进行对接时相对位姿

的测量,尚未有研究只通过拉绳位移传感器实现大型零部件对接面的空间位姿求解。

目前,针对飞机大部件的位姿解算方法主要包括四组元法^[11]、奇异值分解法^[12-13]、正交矩阵法^[14]、最小二乘法^[15]和线性子空间法^[16]等。张斌和金涨军等^[17-20]通过激光跟踪仪等光学测量设备测量关键点并采用奇异值分解法计算部件位姿。罗芳等^[21]利用激光跟踪仪获取测量点坐标,介绍了奇异值分解法、三点法、最小二乘法,以三点法的计算结果作为最小二乘法的初始值来计算位姿。林雪竹^[22]基于 iGPS 激光测量调姿基准点,采用三点法、奇异值分解法以及加权最小二乘牛顿迭代法计算位姿。汪亮等^[23]利用激光跟踪仪进行激光的跟踪控制,采用逐次逼近算法将激光点跟踪到目标点。王颖辉和朱永国等^[24-28]通过激光跟踪仪、激光雷达、激光轮廓传感器和 CCD 图像传感器测量若干个基准点,运用改进的最小二乘法计算位姿。金贺荣等^[29-30]通过激光跟踪仪和双目立体视觉测量特征点,提出了矢量位姿求解法。梅标等^[31]在飞机面板的钻孔和铆接中,基于方向的激光伺服策略,利用激光位移传感器测量的方向误差的反馈来对齐钻孔方向和相机拍摄方向。David P 等^[32]提出了一种新的鲁棒直线匹配算法来解决模型与图像的配准问题,且算法同时估计模型的位姿以及模型直线与图像直线的对应关系。朱绪胜等^[33]根据激光跟踪仪采集的参考点信息,通过粒子群优化算法以及改进的粒子群算法求解位姿。张劲锋等^[34]对航天器间相对位姿测量问题,采用光学相机对特征点的测量且提出了一种新的单目视觉测量算法。俞慈君等^[35]通过对关键点的测量把位姿参数求解问题转化为非线性模型的优化并且采用牛顿法求解。Choi 等^[36]提出了一种基于 RGB-D 摄像机系统的点云跟踪算法,开发基于深度学习的测量跟踪系统,该系统在基于 Arm 架构的机载机器学习计算机中运行。

上述飞机大部件位姿测量与对接过程中,常用的光学、图像等测量方法经常会受到光线遮挡等问题的影响,且激光跟踪仪等设备成本高,需要建立地面基准点(Earth Reference Spot, ERS)并转移到全局坐标系下。随着外界环境因素的变化,ERS会发生微小位移,偏离理论坐标值,测量精度会受到较大影响,因此,有必要寻求一种高效、低成本、稳定性更好的姿态测量场和姿态求解方法。

本文采用6个拉绳位移传感器构建测量场,建立了位姿和绳长值之间的理论模型,运用基于BP神经网络和牛顿迭代的混合算法求解飞机大部件位姿,避免了建立复杂的测量场和进行复杂的空间位姿解算,最后通过数值仿真与实验,证明了该方法的有效性和可行性。

2 基于拉绳位移传感器测量场构建

2.1 测量原理

根据测量系统模型,在飞机大部件的固定点上安设6个拉绳位移传感器及其末端接头,完成传感器固定布局 and 测量场的构建,通过拉绳位移传感器测量6组点之间的距离以及约束条件,并建立位姿和绳长值的理论模型。首先采用BP神经网络算法预测初值位姿,然后运用牛顿法提高大部件的位姿求解精度,对数据进行分析与处理,得到六自由度调姿平台的位姿变化量,驱动调姿平台调节大部件的位姿。测量原理如图1所示。

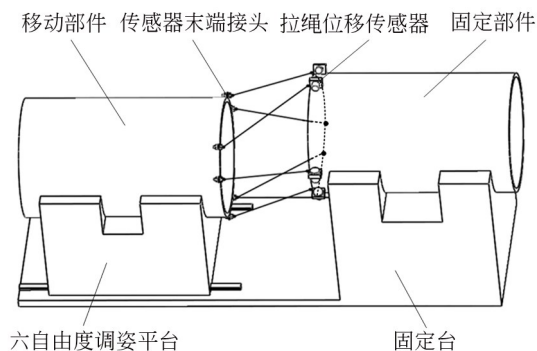


图1 飞机大部件对接测量原理

Fig.1 Schematic diagram of measurement principle for docking large aircraft components

在飞机大部件装配对接过程中,假定固定部件为装配对接基准部件,任意大部件的位姿均可用六维向量来唯一表示,即 $X = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 。

2.2 飞机大部件测量系统模型

在移动部件和固定部件的端面原点处分别建立局部坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 和全局坐标系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 。局部坐标系的原点 O_M 为移动部件端面的中心点, X_M 轴和 Y_M 轴均位于移动部件端面内,且 X_M 轴所在直线经过点 A_1 和 A_2 连线的中点, Z_M 轴与移动部件端面垂直;全局坐标系的原点 O_S 为固定部件端面的中心点, X_S 轴和 Y_S 轴均位于固定部件端面内,且 X_S 轴所在直线经过点 B_1 和 B_2 连线的中点, Z_S 轴与固定部件端面垂直, Y_S 轴满足空间坐标系右手定则。

拉绳位移传感器的位置依次用点 B_i 表示,传感器连接末端位置依次用点 A_i 表示, $A_i B_i$ 表示为第 i 个拉绳位移传感器的绳长 $l_i (i=1, 2 \dots 6)$, 飞机大部件对接位姿测量系统的简化示意图如图2所示。

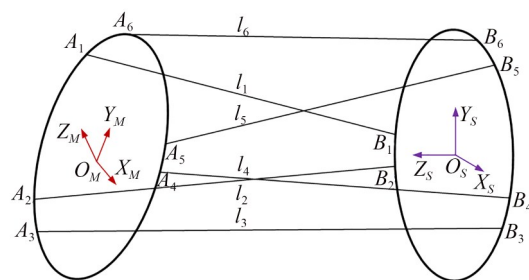


图2 飞机大部件对接位姿测量系统简化示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of docking pose measurement system for large aircraft components

在对接端面上建立移动部件和固定部件的局部坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$, $O_S-X_S Y_S Z_S$, 分别如图3(a)和3(b)所示。

假设固定部件和移动部件半径均为 R , $\angle A_i O_M A_{i+2} = 2\pi/3$, $\angle A_i O_M A_{i+1} = \pi/6$, $\angle B_i O_S B_{i+2} = 2\pi/3$, $\angle B_i O_S B_{i+1} = \pi/2$, 根据平面几何关系即可确定在局部坐标系中 A_i 和全局坐标系中 B_i 的坐标矢量, 如表1所示。

表 1 局部和全局坐标系中各点的坐标矢量

Tab. 1 Coordinate vectors of each point in local and global coordinate systems

A_i	坐标矢量	B_i	坐标矢量
A_1	$R [\cos \frac{\pi}{12}, -\sin \frac{\pi}{12}, 0]^T$	B_1	$R [\cos \frac{\pi}{4}, -\sin \frac{\pi}{4}, 0]^T$
A_2	$R [\cos \frac{\pi}{12}, \sin \frac{\pi}{12}, 0]^T$	B_2	$R [\sin \frac{\pi}{4}, \cos \frac{\pi}{4}, 0]^T$
A_3	$R [-\sin \frac{\pi}{12}, \cos \frac{\pi}{12}, 0]^T$	B_3	$R [\sin \frac{\pi}{12}, \cos \frac{\pi}{12}, 0]^T$
A_4	$R [-\sin \frac{\pi}{4}, \cos \frac{\pi}{4}, 0]^T$	B_4	$R [-\sin \frac{5\pi}{12}, \cos \frac{5\pi}{12}, 0]^T$
A_5	$R [-\sin \frac{\pi}{4}, -\cos \frac{\pi}{4}, 0]^T$	B_5	$R [-\sin \frac{5\pi}{12}, -\cos \frac{5\pi}{12}, 0]^T$
A_6	$R [-\sin \frac{\pi}{12}, -\cos \frac{\pi}{12}, 0]^T$	B_6	$R [\sin \frac{\pi}{12}, -\cos \frac{\pi}{12}, 0]^T$

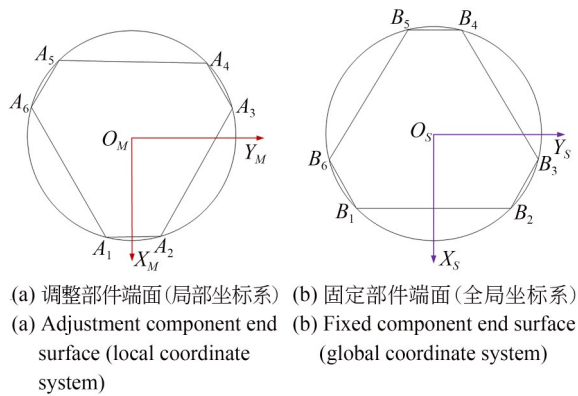


图 3 对接端面拉绳传感器布局

Fig. 3 Layout of draw-wire sensors on docking end surface

3 飞机大部件位姿解算理论模型构建

在飞机大部件对接中,移动部件的位置采用

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

将局部坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 中位置 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 和 A_6 的坐标通过变换公式转换成全局坐标系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 中的坐标矢量,即有:

$$A_{iS} = R_{xyz} A_i + P \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

根据飞机大部件对接位姿测量系统中的约束条件可得移动部件位姿与拉绳位移传感器绳长值之间的理论模型为:

局部坐标系原点 O_M 在全局坐标系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 中的位置坐标描述。设坐标矢量为 P , 则表达式如下:

$$P = [x \ y \ z]^T. \quad (1)$$

采用 RPX 方法表示移动部件的姿态角:局部坐标系和全局坐标系的坐标原点不重合,二者之间的姿态不相同。首先,将移动部件绕局部坐标系的 X 轴旋转 γ 角(俯仰角),再绕局部坐标系的 Y 轴旋转 β 角(偏航角),最后绕局部坐标系的 Z 轴旋转 α 角(横滚角), α, β 和 γ 分别为移动部件的姿态角。移动部件沿着全局坐标系的 X, Y 和 Z 轴进行平移,使得局部坐标系和全局坐标系的位置和姿态角重合。

局部坐标系的三次旋转按照从右至左的原则,得到的旋转矩阵如下:

$$R_{xyz} = R_z R_y R_x. \quad (2)$$

移动部件姿态角的旋转矩阵为:

$$l_i = A_{iS} - B_i = R_{xyz} A_i + P - B_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (5)$$

式(5)改写为:

$$l_i = \sqrt{(R_{xyz} A_i + P - B_i)^T (R_{xyz} A_i + P - B_i)} \quad (i = 1, 2, \dots, 6), \quad (6)$$

式中 l_i 为第 i 个拉伸位移传感器的理论绳长。

4 基于BP神经网络和牛顿迭代法求解位姿

BP神经网络法是利用由位姿到绳长的求解结果作为神经网络的样本数据,通过对大量样本的训练学习,不需要确定输入层和输出层之间的理论模型,具有优秀的多维函数映射能力,但是神经网络算法的位姿求解精度较低;牛顿迭代法是只要给出合适的初值,就能够求解出精确部件位姿,具有较快的运算速度,但对初值要求很苛刻,初值选取不当则无法保证其收敛性。

基于BP神经网络和牛顿迭代法对部件位姿进行求解,先利用神经网络算法预测拉绳位移传感器绳长所对应的大部件位姿,再以预测位姿为牛顿迭代法的初值求解位姿。该方法结合神经网络算法和牛顿迭代法的优点,互补抵消了它们的缺点,具体流程如图4所示。

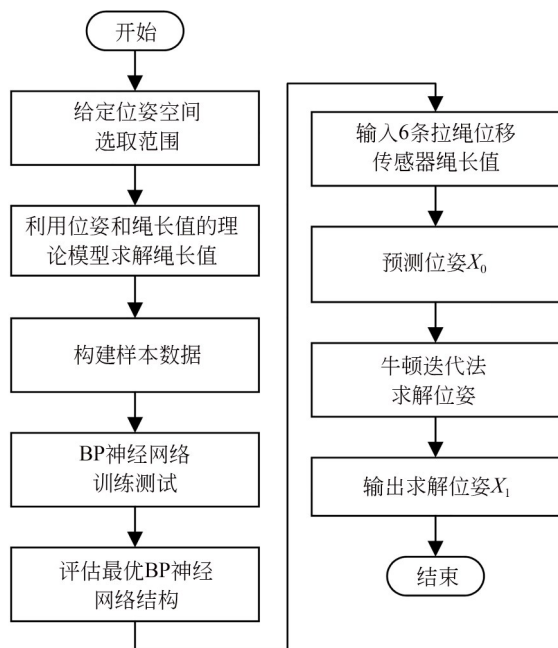


图4 基于混合算法的位姿求解流程

Fig. 4 Flowchart of pose solution based on hybrid algorithm

4.1 BP神经网络算法

部件位姿预测所用的神经网络基本结构如图5所示。设6条拉绳位移传感器的绳长值是神经网络输入,即 $l = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^T$,第1个隐

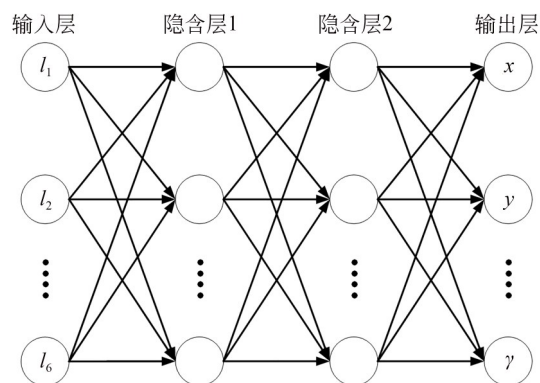


图5 BP神经网络的基本结构

Fig. 5 Basic structure of BP neural network

含层有 h_1 个节点数,则隐含层1输出为 ${}^1y = ({}^1y_1, {}^1y_2, \dots, {}^1y_{h1})^T$,第2个隐含层有 h_2 个节点数,则隐含层2输出为 ${}^2y = ({}^2y_1, {}^2y_2, \dots, {}^2y_{h2})^T$,网络位姿实际输出为 $X' = (x' \ y' \ z' \ \alpha' \ \beta' \ \gamma')^T$,位姿期望输出为 $X = (x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma)^T$,隐含层1到隐含层2的传递函数为 g_1 ,隐含层2到输出层的传递函数为 g_2 ,输出层的传递函数为 g_3 。

隐含层1神经元的输出为:

$${}^1y_j = g_1 \left(\sum_{i=1}^6 w_{ij} l_i - \theta \right) = g_1 \left(\sum_{i=1}^6 w_{ij} l_i \right), \quad (7)$$

式中: 1y_j 为隐含层1中第 j 个神经元的输出, w 为网络权值, θ 为阈值, $w_{0j} = \theta$, $l_0 = -1$ 。

隐含层2神经元的输出为:

$${}^2y_k = g_2 \left(\sum_{j=1}^{h_1} w_{jk} {}^1y_j \right), \quad (8)$$

式中: 2y_k 表示隐含层2中第 k 个神经元的输出。

输出层神经元的输出为:

$$X'_l = g_3 \left(\sum_{k=1}^{h_2} w_{kl} {}^2y_k \right), \quad (9)$$

式中: X'_l 表示输出层第 l 个神经元的实际输出。

因此,移动部件位姿的神经网络实际输出与期望输出之间的误差为:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^6 (X_l - X'_l)^2. \quad (10)$$

在BP神经网络的权值调整更新过程中,核心目标为减小神经网络的位姿实际输出与期望输出之间的误差。由于一个函数值沿着负梯度方向下降得最快,设置一个调整步长 η ,函数每次

根据负梯度方向调整 η 个单位,此时神经网络权值调整为:

$$\Delta w_{pq} = -\eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial w_{pq}}, \quad (11)$$

式中 η 在 BP 神经网络中称为学习速率。

因为 BP 神经网络为反向传播,所以权值调整顺序为:第一步调整隐含层 2 到输出层的权值;第二步调整隐含层 1 到隐含层 2 的权值;第三步调整输入层到隐含层 1 的权值。

由于篇幅限制,这里对于推导过程不进行详细说明。隐含层 2 到输出层的权值调整迭代公式为:

$$w_{kl}(t+1) = w_{kl}(t) + \eta \delta_l^2 y_k. \quad (12)$$

隐含层 1 到隐含层 2 的权值调整迭代公式为:

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \eta \delta_k^1 y_j. \quad (13)$$

输入层到隐含层 1 的权值调整迭代公式为:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta_j^1 l_i. \quad (14)$$

对于常见的单隐含层,隐含层节点数常见的确定公式如下:

$$N = \sqrt{ab}, \quad (15)$$

式中: N 为隐含层节点数, a 为输入层节点数, b 为输出层节点数。

神经网络常见的激活函数有:

(1) 线性函数

$$f(x) = x. \quad (16)$$

(2) 对数 S 形转移函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (0 < f(x) < 1). \quad (17)$$

(3) 双曲正切 S 形函数

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (-1 < f(x) < 1). \quad (18)$$

BP 神经网络的主要参数如下:输入层到隐含层 1 采用的激活函数是对数 S 形转移函数,该函数的字符串为 'logsig';隐含层 1 到隐含层 2 采用的激活函数为双曲正切 S 形函数,该函数的字符串为 'tansig';隐含层 2 到输出层采用的激活函数为线性函数,该函数的字符串为 'purelin';训练函数为 Levenberg-Marquardt 的 BP 算法训练函数训练目标的最小误差为 0.000 01;最大迭代次数为 1 000;学习速率为 0.01。

飞机大部件对接求解位姿的 BP 神经网络位姿预测流程如图 6 所示。

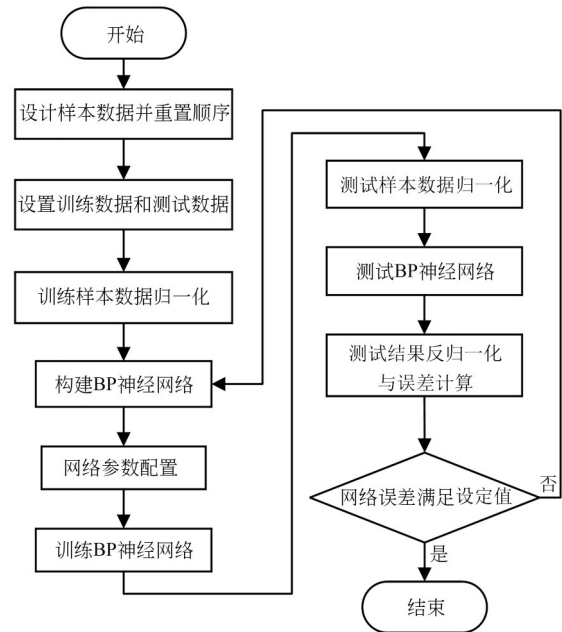


图 6 BP 神经网络位姿预测流程

Fig. 6 Flowchart of BP neural network position prediction

4.2 牛顿迭代法

将拉绳位移传感器绳长值与飞机部件位姿理论模型写函数表达式为:

$$l_i = \sqrt{l_i^T l_i} = f_i(X), \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (19)$$

式中: l_i 为第 i 个拉绳位移传感器的绳长值, $f_i(X)$ 为第 i 个拉绳传感器绳长求解的函数, X 为大部件位姿。

当给定 6 条拉绳位移传感器的绳长值 $l = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^T$ 时, 求解大部件位姿 $X = (x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma)^T$, 建立大部件位姿和拉绳位移传感器绳长值的理论模型为:

$$F_i(X) = F_i(x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma) = f_i(X)^2 - l_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (20)$$

则有:

$$F(X) = \begin{pmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \\ F_6(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(X)^2 - l_1^2 \\ f_2(X)^2 - l_2^2 \\ f_3(X)^2 - l_3^2 \\ f_4(X)^2 - l_4^2 \\ f_5(X)^2 - l_5^2 \\ f_6(X)^2 - l_6^2 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

令

$$F(X)=0. \quad (22)$$

以 BP 神经网络输出的移动部件位姿 X_0 为牛顿迭代法的初始值,即方程组的位姿初始迭代 $X_0=[x_0 \ y_0 \ z_0 \ \alpha_0 \ \beta_0 \ \gamma_0]^T$ 。将式(22)在 X_0 处以多元泰勒式展开为:

$$F(X)=F(X_0)+\frac{F'(X_0)}{1!}(X-X_0)+\frac{F''(X_0)}{2!}(X-X_0)^2+\dots+\frac{F^n(X_0)}{n!}(X-X_0)^n. \quad (23)$$

对式(23)省略二阶偏导及后的各项高阶偏导且使之趋于 0,得到:

$$F(X_0)+F'(X_0)(X-X_0)=0. \quad (24)$$

即:

$$X^{k+1}=X^k-\frac{F(X^k)}{F'(X^k)}, \quad (25)$$

式中 $F'(X^k)$ 的表达式等价于雅克比矩阵 J 。

$$J=F'(X^k)=\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(X)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(X)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial F_1(X)}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial F_2(X)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(X)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial F_2(X)}{\partial \gamma} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \frac{\partial F_6(X)}{\partial x} & \frac{\partial F_6(X)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial F_6(X)}{\partial \gamma} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

当位姿 X^k 接近于大部件的理论位姿时,方程组 $F(X)$ 趋近于 0。牛顿迭代法的具体步骤如下:

(1) 通过拉绳位移传感器绳长值和大部件位姿间的理论模型构建目标函数 $F(X)$;

(2) 利用 BP 神经网络获取大部件位姿的初始值 X_0 ;

(3) 设置精度阈值 ϵ 以及最大迭代步数 N ;

(4) 根据式(25),计算下一个位姿迭代值 X^{k+1} ;

(5) 若 $\|X^{k+1}-X^k\|\leq\epsilon$,则停止迭代,输出 X^{k+1} ;否则,返回步骤(2)。

5 数值仿真验证与误差分析

5.1 BP 神经网络预测位姿

通过拉绳位移传感器绳长与移动部件位姿之间的理论模型,在给定飞机大部件位姿的情况下,可以求解出拉绳位移传感器的绳长值,在 6 自由度内移动部件位姿的取值范围如表 2 所示。

移动部件和固定部件的半径 $R=340$ mm。为了让 BP 神经网络更好映射拉绳位移传感器绳长值与移动部件位姿间的内在规律,在位姿取值范围内随机均匀取值,这样可以得到足够多的训练样本,在 MATLAB 中导入位姿与绳长值之间的理论模型,生成 50 006 组 BP 神经网络的样本数据。样本数据由训练样本、测试样本和预测样本组成。其中,随机选取 40 000 组数据为训练样本,反映输入与输出之间的映射规律;随机选取 10 000 组数据为测试样本,评估 BP 神经网络结构的性能;剩余的 6 组数据为预测样本,作为数值仿真中的输入和理论输出。

在 BP 神经网络算法中将非线性映射关系逆转为通过绳长值求解移动部件位姿,以 6 条拉绳位移传感器的绳长值为输入,位姿为输出,因此在网络结构中输入层节点数为 6,输出层节点数为 6。

由表 2 可知,输出层中 3 个位置自由度和 3 个姿态自由度的取值范围不同,表明这 2 类自由度对网络的非线性映射上存在差异,因此,选择需要增加隐含层和隐含层节点数量来实现这 2 类自由度的非线性映射。观察图 5 可知,该神经网络结构为双隐含层,增强了非线性拟合的效果。

表 2 位姿取值范围

Tab. 2 Range of pose values

位姿	数值
x/mm	± 100
y/mm	± 100
z/mm	400~600
$\alpha/(^{\circ})$	$-5\sim+5$
$\beta/(^{\circ})$	$-5\sim+5$
$\gamma/(^{\circ})$	$-5\sim+5$

本文设计了16组神经网络结构,利用样本数据训练测试所有神经网络,根据测试结果分析每个网络结构的校正决定系数以便于评估最优的神经网络结构。

由表3可以发现,当采取双隐含层的神经网络结构时,随着隐含层节点数的增加,神经网络的拟合相关系数不断增大,即可认为在输入为绳长、输出为位姿时,二者之间的非线性映射关系越来越明确。因此,选择6-64-64-6的神经网络结构,即隐含层1的节点数为64,隐含层2的节点数也为64。

根据校正决定系数选出最优的BP神经网络结构为6-64-64-6,基于6组预测样本数据中6条拉绳位移传感器绳长值作为神经网络预测的输入值,如表4所示。

在MATLAB中编写位姿预测代码,主要包括下载保存最优神经网络结构、载入预测样本中的输入值、输入样本归一化、神经网络预测、输出结果反归一化,6组位姿预测值如表5所示。

表3 神经网络具体结构和校正决定系数
Tab.3 Specific structure of neural network and correction coefficient of determination

序号	神经网络结构	校正决定系数
1	6-6-6-6	0.264 5
2	6-8-8-6	0.346 6
3	6-16-8-6	0.416 1
4	6-16-16-6	0.516 3
5	6-24-12-6	0.580 3
6	6-32-16-6	0.704 9
7	6-24-24-6	0.715 1
8	6-40-20-6	0.758 6
9	6-32-32-6	0.806 1
10	6-48-24-6	0.827 4
11	6-56-28-6	0.843 2
12	6-40-40-6	0.846 9
13	6-64-32-6	0.861 4
14	6-48-48-6	0.887 1
15	6-56-56-6	0.900 7
16	6-64-64-6	0.969 0

表4 六组拉绳位移传感器绳长值
Tab.4 Six sets of rope length value of pull rope displacement sensor

序号	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_4/mm	l_5/mm	l_6/mm
1	570.086 6	546.797 0	526.926 5	540.599 9	557.053 0	556.726 2
2	528.266 7	549.702 8	536.421 8	537.448 7	597.292 8	565.252 4
3	477.954 1	410.523 5	402.520 6	498.613 5	456.346 8	464.969 8
4	452.210 8	481.717 3	499.632 2	458.792 8	500.601 8	475.392 0
5	533.815 5	576.225 2	527.201 3	561.470 3	640.095 2	558.285 3
6	499.768 4	478.998 9	551.790 8	522.003 9	511.005 8	526.767 7

表5 六组位姿预测值
Tab.5 Six sets of pose predictions

序号	x/mm	y/mm	z/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{^\circ})$
1	9.442 7	17.451 4	510.814 3	-2.903 8	-1.051 6	1.053 1
2	20.568 1	-67.479 2	511.366 5	-2.914 1	3.072 5	1.157 5
3	59.213 4	108.408 6	392.506 0	-5.318 75	3.501 7	-3.293 3
4	-27.678 8	-50.267 7	447.143 7	1.500 8	0.766 5	3.002 8
5	94.886 7	-87.608 7	503.225 8	-2.952 0	5.271 4	1.121 1
6	-54.986 9	27.785 92	475.254 2	1.445 4	2.974 7	3.272 4

5.2 牛顿迭代法求解位姿

由于利用BP神经网络求解的位姿精度不高,采用6组预测位姿作为牛顿迭代法的

初始值,使用牛顿迭代法进行位姿求解。设置精度阈值为 1×10^{-5} ,最大迭代步数为50,以第1组预测位姿 ${}^1\mathbf{X}_0=[9.442\ 737,\ 17.451\ 4,$

$510.814\ 3, -2.903\ 8, -1.051\ 55, 1.053\ 107]^T$ 为例,基于牛顿迭代法求解飞机大部件位姿,位姿求解过程的数据变化如表 6 所示。

同理,基于 BP 神经网络 6 组位姿预测数据进行牛顿迭代法求解,结果如表 7 所示。不同预

测位姿作为牛顿迭代求解位姿的初始值、需要迭代的步数以及最终的迭代位姿。

根据表 7 将基于 BP 神经网络和牛顿迭代法的算法求解移动部件位姿和预测样本中 6 组理论位姿之间的误差绝对值如图 7 所示。

表 6 第 1 组求解过程位姿变化数据

Tab. 6 Data of pose variation in solving process for the first set

步数	牛顿迭代法求解位姿						迭代时间/s
	x_1/mm	y_1/mm	z_1/mm	$\alpha_1/(^{\circ})$	$\beta_1/(^{\circ})$	$\gamma_1/(^{\circ})$	
1	13.432 75	10.802 65	521.833 5	-2.988 66	-0.987 75	1.017 21	0.400 738
2	19.425 84	19.136 43	520.429 5	-2.996 69	-0.998 11	1.000 46	
3	19.982 53	19.976 81	520.009 5	-2.999 92	-0.999 95	1.000 01	
4	19.999 99	19.999 98	520.000 0	-3.000 00	-1.000 00	1.000 00	
5	20.000 00	20.000 00	520.000 0	-3.000 00	-1.000 00	1.000 00	

表 7 六组牛顿迭代位姿、步数与时间

Tab. 7 Six sets of Newtonian iterative postures, steps and time

序号	牛顿迭代最终迭代位姿						迭代步数	迭代时间/s
	x_1/mm	y_1/mm	z_1/mm	$\alpha_1/(^{\circ})$	$\beta_1/(^{\circ})$	$\gamma_1/(^{\circ})$		
1	20	20	520	-3	-1	1	5	0.400 738
2	20	-60	520	-3	3	1	5	0.459 687
3	60	100	400	-5	3	-3	6	0.451 958
4	-20	-60	440	1	1	3	6	0.413 882
5	100	-100	520	-3	5	1	6	0.424 382
6	-60	20	480	1	3	3	6	0.427 882

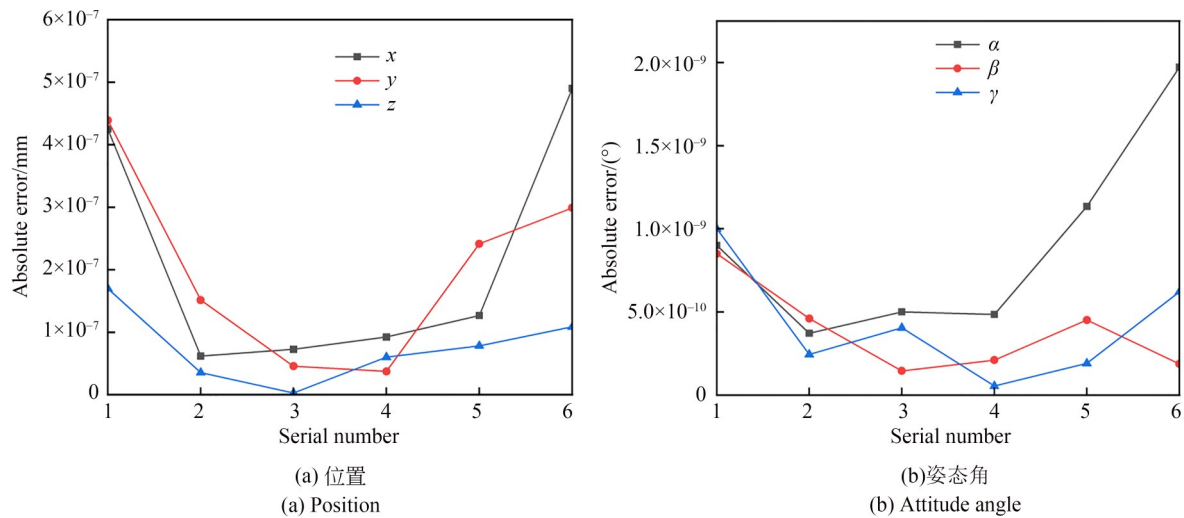


图 7 数值仿真位姿与理论位姿误差绝对值

Fig. 7 Absolute error between numerical simulation poses and theoretical poses

由图 7 可知,利用混合算法求解位姿,其位置自由度和理论位姿的最大误差绝对值为 4.9×10^{-7} mm,姿态角自由度和理论位姿的最大误差绝对值为 $1.97 \times 10^{-9}^\circ$ 。相对于位置数据,姿态角数据受到的影响较小。

5.3 误差仿真分析

测量系统的测量精度会受到拉绳位移传感器的测量和安装位置的误差影响。这些误差会影响实际拉绳的测量长度。假设测量的拉绳长度与实际长度之间的误差在 ± 0.5 mm 内,在此条件下对测量系统进行误差分析。

给定相对位姿后,可通过逆解求得实际拉绳长度。在误差范围内随机选取误差,可以得到带误差的测量拉绳长度。将这些测得的拉绳长度代入本文的正向位姿求解中,就可以将正向求解得到的位姿与最初给定的位姿进行比较,最终得到该测量系统的精度。

对上述数值模拟逆解中设置的位姿参数进行组合,选取 1 000 种不同的位姿组合。对这些位姿进行误差分析,沿 z 轴的平移方向始终为正。最终,得到所有 1 000 组位姿的误差绝对值,如图 8 和图 9 所示。对这些误差的绝对值进行分析和计算,得出所有位姿的最大误差、最小误差和均方误差值,如表 8 所示。

系统的测量精度受到拉绳位移传感器的测量和安装位置的误差影响。当测量拉绳长度与实际拉绳长度之间的误差在 ± 0.5 mm 内时,对 1 000 组位姿的误差分析表明,位置自由度的最大误差为 0.502 6 mm,姿态角自由度的最大误差

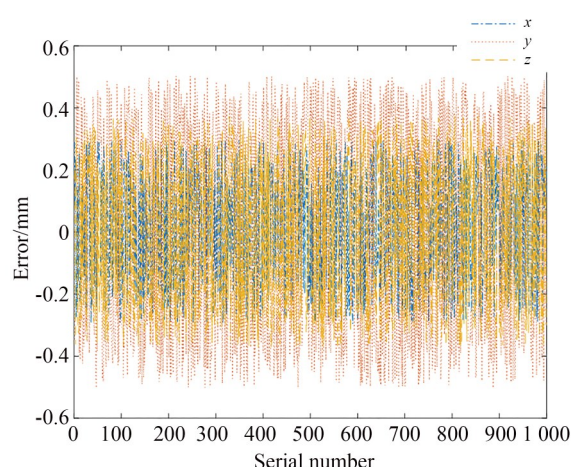


图 8 平移方向误差

Fig. 8 Translational direction errors

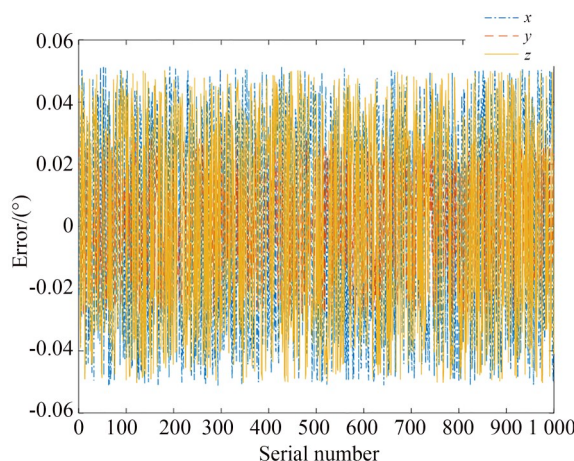


图 9 旋转方向误差

Fig. 9 Rotational direction errors

为 0.0514° ,相对于位置数据,姿态角数据受到的影响较小。

表 8 误差绝对值的分析与计算结果

Tab. 8 Analysis and calculation results of error absolute values

误 差	x/mm	y/mm	z/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$
最小误差	0.052 6	0.246 2	0.114 0	0.018 9	0.002 3	0.016 8
最大误差	0.298 0	0.502 6	0.374 0	0.051 4	0.029 1	0.050 3
均方误差	0.035 3	0.144 6	0.064 5	0.001 3	0.000 3	0.001 2

在实际测量中,还必须全面分析影响测量结果的各种因素,并考虑测量过程中的所有误差来源。

6 实 验

图 10 为基于拉绳位移传感器的位姿测量实

验装置。位姿测量实验平台主要由型材底座、Z 方向滚珠丝杠直线模组、型材支架、Y 方向滚珠丝杠直线模组、X 方向滚珠丝杠直线模组、移动部件标定板、高精度球铰、拉绳位移传感器末端连接结构、移动部件、拉绳位移传感器和固定部件等零件组成。

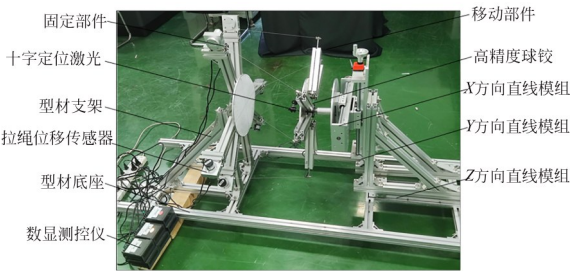


图 10 位姿测量实验平台

Fig. 10 Experimental platform for pose measurement

本文使用 MILONT 的 MPS-S-2500-P3.6 拉绳位移传感器,其主要性能参数如表 9 所示。在进行大部件对接位姿测量实验前,将整个位姿测量实验平台调节至初始状态,如图 11 所示。大部

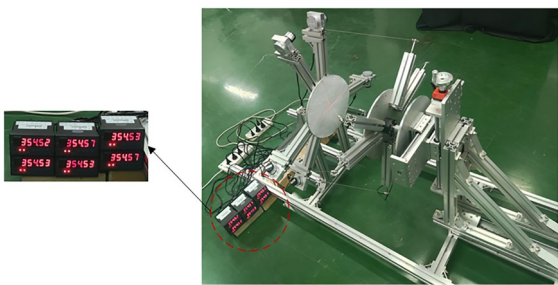


图 11 位姿测量实验平台初始状态

Fig. 11 Initial state of pose measurement experimental platform

件姿态角 α, β 和 γ 的测量需要借助十字激光定位器,由十字激光的几何关系可以更加直观地反映移动部件的姿态角变化。

表 9 MILONT 拉绳位移传感器的性能参数

Tab. 9 Performance parameters of MILONT draw-wire displacement sensors

型 号	输出信号	线性精度/%	量程/mm	分辨率/mm	拉绳直径/mm	最大工作速度/(m·s ⁻¹)
MPS-S-2500-P3.6	增量脉冲输出	±0.05	2 500	0.01	0.8	1

大部件位姿测量系统处于初始状态时,十字激光与全局坐标系坐标轴重合,如图 12(a)所示,十字激光定位器位于移动部件端面中心;随着移动部件运动,在全局坐标系中十字激光的位置发生改变,图 12(b)为测量状态下十字激光的位置。

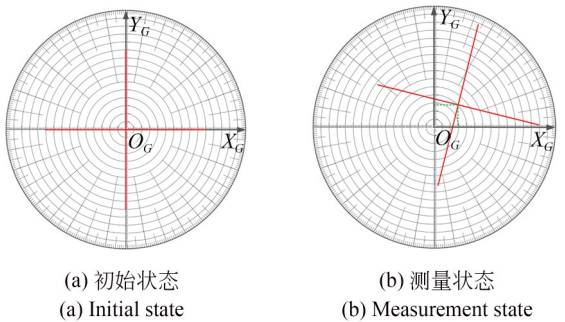


图 12 姿态角定位

Fig. 12 Attitude angular positioning

由图 12 可知,姿态角 α 为绕 Z 轴旋转的横滚角,根据十字激光初始状态和当前状态之间的夹角确定横滚角的数值,通过十字激光的旋转方向判断横滚角的方向;姿态角 β 为绕 Y 轴旋转的偏航角,根据十字激光当前状态原点在全局坐标系

沿 X 坐标轴分量和十字激光光源与固定部件中心点之间的距离的三角函数关系可以计算出偏航角;同理,姿态角 γ 为绕 X 轴旋转的俯仰角,根据激光当前状态原点在全局坐标系沿 Y 坐标轴分量和光源与固定部件中心点间的距离可以计算出俯仰角。

在位姿测量实验中,先进行姿态角自由度旋转再沿着位置自由度平移,确定移动部件测量位姿以及与之对应的 6 条拉绳位移传感器绳长值,记录位姿测量实验数据。基于位姿测量实验中的 6 条拉绳位移传感器绳长值,运用 BP 神经网络和牛顿迭代法的混合算法进行数值仿真求解,6 组实验测量的拉绳位移传感器绳长值如表 10 所示,实验参考位姿、实验输出位姿和偏差绝对值如表 11 所示。

由表 11 可知,在 6 组位姿测量实验中参考位姿和输出位姿存在一定偏差,位置 x 的最小和最大误差分别为 0.089 7,0.524 5 mm,位置 y 的最小和最大误差分别为 0.001,0.572 4 mm,位置 z 的最小和最大误差分别为 0.251 3,0.603 1 mm;姿态角 α 的最小和最大误差分别为 0.003 7°,0.053 6°,姿态角 β 的最小和最大误差分别为

表 10 拉绳位移传感器绳长实验值
Tab. 10 Experiment values of rope length of pull rope displacement sensor

序号	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_4/mm	l_5/mm	l_6/mm
1	590.38	578.57	590.65	602.14	588.35	576.04
2	544.42	546.99	559.53	577.74	538.04	531.20
3	493.61	491.76	524.25	505.59	535.33	522.22
4	462.42	476.95	488.72	486.85	483.15	450.53
5	582.82	571.76	575.02	577.03	624.17	596.62
6	534.90	528.94	536.46	557.74	558.04	583.77

表 11 实验测量数据
Tab. 11 Experimental measurement data

序号	实验数据	x/mm	y/mm	z/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$
1	参考位姿	20.00	20.00	560.00	1.000 0	1.193 0	1.193 0
	输出位姿	20.089 7	20.572 4	559.748 7	0.966 7	1.214 9	1.150 5
	偏差绝对值	0.089 7	0.572 4	0.251 3	0.033 3	0.021 9	0.042 5
2	参考位姿	20.00	20.00	520.00	3.000 0	1.301 4	-1.301 4
	输出位姿	19.557 6	19.973 5	519.593 0	2.946 4	1.318 5	-1.215 8
	偏差绝对值	0.442 4	0.026 5	0.407 0	0.053 6	0.017 1	0.085 6
3	参考位姿	-20.00	-20.00	480.00	-1.000 0	2.861 2	2.861 2
	输出位姿	-20.524 5	-20.001 0	479.744 9	-1.008 9	2.895 6	2.889 3
	偏差绝对值	0.524 50	0.001 0	0.255 1	0.008 9	0.034 4	0.028 1
4	参考位姿	20.00	-20.00	440.00	3.000 0	1.590 4	1.590 4
	输出位姿	19.851 6	-19.954 1	439.396 9	2.983 3	1.607 0	1.674 5
	偏差绝对值	0.148 4	0.045 9	0.603 1	0.016 7	0.016 6	0.084 1
5	参考位姿	20.00	-20.00	560.00	-3.000 0	2.385 1	3.575 1
	输出位姿	20.162 7	-20.169 8	559.589 8	-2.955 5	2.454 6	3.632 2
	偏差绝对值	0.162 7	0.169 8	0.410 2	0.044 5	0.069 5	0.057 1
6	参考位姿	-20.00	20.00	520.00	-3.000 0	2.601 6	-3.899 0
	输出位姿	-19.724 6	19.497 6	519.600 5	-3.003 7	2.664 2	-3.810 8
	偏差绝对值	0.275 4	0.502 4	0.399 5	0.003 7	0.062 6	0.088 2

0.016 6°,0.069 5°,姿态角 γ 的最小和最大误差分别为 0.028 1°,0.088 2°。参考位姿和输出位姿之间的误差如图 13 所示。

由图 13 可知,6 组移动部件位姿测量实验

中,位置自由度的最大误差为 0.603 1 mm,姿态角自由度的最大误差为 0.088 2°。相对于位置数据,姿态角数据受到的影响较小,其结果与误差仿真分析结果一致。

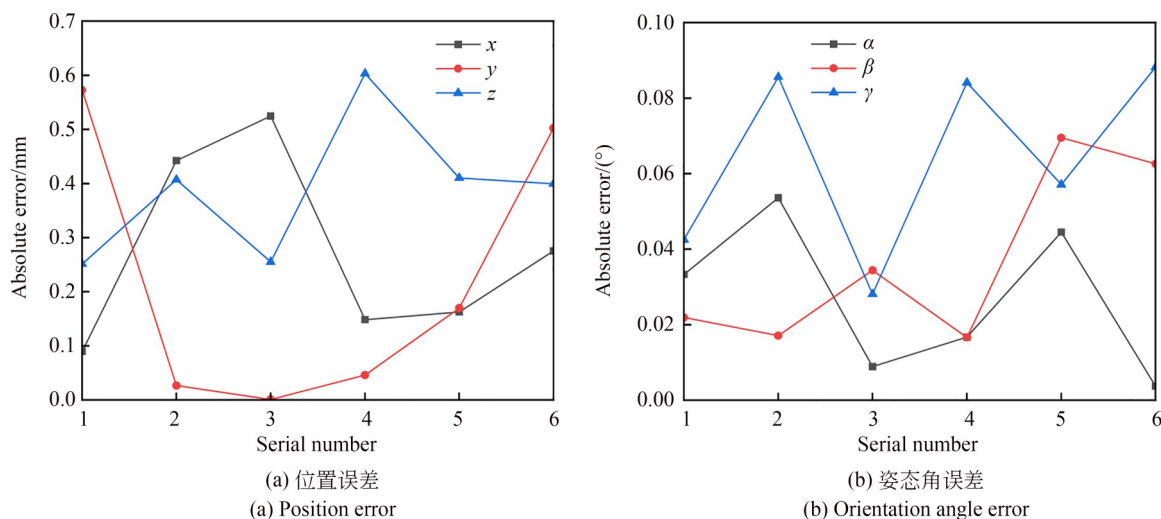


图 13 实验参考位姿和实验输出位姿的误差绝对值

Fig. 13 Absolute error between experimental measurements and numerical simulation poses

7 结 论

本文提出了一种基于拉绳位移传感器的飞机大部件对接位姿测量方法,利用 6 个拉绳位移传感器在移动部件和固定部件上布局构成测量场,建立了位姿和绳长值间的理论模型。采用 BP 神经网络和牛顿迭代法求解飞机大部件对接位姿,仿真结果表明,位置自由度的最大误差绝对值为 4.9×10^{-7} mm,姿态角自由度的

最大误差绝对值为 $1.97 \times 10^{-9}^\circ$ 。误差仿真结果表明,相对于位置数据,姿态角数据受到的影响较小。最后,设计并搭建了位姿测量实验平台,实验结果表明,位置最大误差为 0.603 1 mm,姿态角最大误差为 $0.088 2^\circ$ 。相对于位置数据,姿态角数据受到的影响较小,其结果与误差仿真结果一致。实验验证了基于拉绳位移传感器的飞机大部件对接位姿测量方法的可行性。

参考文献:

- [1] MEI Z Y, MAROPOULOS P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228 (10): 1185-1197.
- [2] 常正平, 夏松, 杨根军, 等. 飞机部件数字化对接装配实验平台及教学项目设计[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(12): 52-56.
CHANG ZH P, XIA S, YANG G J, *et al.* Design of digital docking assembly experimental platform and teaching project for aircraft components[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37 (12): 52-56. (in Chinese)
- [3] MAUTZ R. Overview of current indoor positioning systems[J]. *Geodesy and Cartography*, 2009, 35 (1): 18-22.
- [4] ZOU J H. Indoor global positioning measurement system application for the aircraft flexible joint assembly [C]. *SAE Technical Paper Series*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2010.
- [5] LIN X Z, CAO G H, LI L J, *et al.* Aircraft digital measuring technology of multi-sensor fusion [C]. *2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. August 16-19, 2013. Harbin, China. IEEE, 2013: 46-50.
- [6] CECCARELLI M, AVILA CARRASCO C, OTTAVIANO E. Error analysis and experimental tests of CATRASYS (Cassino Tracking System) [C]. *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000*. 2000 IEEE International Conference on Industrial Elec-

- tronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies and Industrial Opportunities (Cat. No. 00CH37141). Nagoya, Japan. IEEE, 2000, 4: 2371-2376.
- [7] OTTAVIANO E, CECCARELLI M, PALMUCI F. An application of CaTraSys, a cable-based parallel measuring system for an experimental characterization of human walking[J]. *Robotica*, 2010, 28(1): 119-133.
- [8] HULTH J. Using a draw-wire sensor to continuously monitor glacier melt[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(199): 922-924.
- [9] WANG G, WANG W M, WANG C D. The method and error analysis of deep-sea pose measurement system[J]. *Measurement*, 2017, 98: 276-282.
- [10] ZHANG B, LIU H R, WANG T, et al. Research and experiment of rope measurement method for subsea pipeline based on uncertainty analysis[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111698.
- [11] HORN B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 629.
- [12] ZHU W S, MU J Z, SHAO C B, et al. System design for pose determination of spacecraft using time-of-flight sensors[J]. *Space: Science & Technology*, 2022
- [13] ABDELAAL M, FARAG R M A, SAAD M S, et al. Uncalibrated stereo vision with deep learning for 6-DOF pose estimation for a robot arm system[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 145: 103847.
- [14] ZHANG S J, LIU F H, CAO X B, et al. Monocular vision-based two-stage iterative algorithm for relative position and attitude estimation of docking spacecraft[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(2): 204-210.
- [15] WALKER M W, SHAO L J, VOLZ R A. Estimating 3-D location parameters using dual number quaternions[J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1991, 54(3): 358-367.
- [16] WANG Z Y, JEPSON. A new closed-form solution for absolute orientation[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*. June 15-17, 1993. Seattle, WA, USA. IEEE Comput. Soc. Press, 1994: 129-134.
- [17] 张斌,姚宝国,柯映林. 基于鞍点规划理论的机翼水平位姿评估方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(10): 1761-1765.
- ZHANG B, YAO B G, KE Y L. Saddle point programming based level-posture evaluation method for aircraft wings[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(10): 1761-1765. (in Chinese)
- [18] 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估计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(4): 655-661.
- JIN ZH J, LI J X, YU C J, et al. Registration error analysis and evaluation in large-volume metrology system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(4): 655-661. (in Chinese)
- [19] 李树军,罗浩,庞放心,等. 柔性薄壁大部件数字化装配调姿算法研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(8): 38-43.
- LI SH J, LUO H, PANG F X, et al. Research on digital assembly attitude adjustment algorithm for flexible thin-walled large parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(8): 38-43. (in Chinese)
- [20] 秦宇,黄翔,邓正平,等. 基于激光测距的大部件对接方法及误差分析[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(3): 728-738.
- QIN Y, HUANG X, DENG ZH P, et al. Novel posture alignment method and error analysis for large component assembly based on laser range sensing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(3): 728-738. (in Chinese)
- [21] 罗芳,邹方,周万勇. 飞机大部件对接中的位姿计算方法[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(3): 91-94.
- LUO F, ZOU F, ZHOU W Y. Posture calculating algorithm in large aircraft component butt[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(3): 91-94. (in Chinese)
- [22] 林雪竹,李丽娟,曹国华,等. 大部件对接中iGPS高精度位姿测量优化设计[J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1299-1311.
- LIN X ZH, LI L J, CAO G H, et al. Optimal de-

- sign based on iGPS high-precision posture measurement for large size component joining [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1299-1311. (in Chinese)
- [23] 汪亮, 邢宏文, 李浣果, 等. 飞机调姿测量点的激光跟踪仪可视化定位[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 32-36.
- WANG L, XING H W, LI L G, *et al.* Visual positioning of aircraft attitude adjustment measurement points by laser tracker[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(S1): 32-36. (in Chinese)
- [24] 王颖辉, 韩先国. 基于加权最小二乘法的大部件对接位姿评估算法研究[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(5): 48-51.
- WANG Y H, HAN X G. Research on posture evaluation algorithm based on weighted least square for large part merging[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(5): 48-51. (in Chinese)
- [25] 朱永国, 黄翔, 方伟, 等. 机身自动调姿方法及误差分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(2): 229-234.
- ZHU Y G, HUANG X, FANG W, *et al.* Fuselage automatic position and pose adjustment method and its error analysis[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(2): 229-234. (in Chinese)
- [26] CHOI A J, YANG H H, HAN J H. Study on robust aerial docking mechanism with deep learning based drogue detection and docking[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 154: 107579.
- [27] 何晓煦, 石章虎, 曾德标, 等. 基于LM算法的飞机大部件对接位姿计算方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 44-48.
- HE X X, SHI ZH H, ZENG D B, *et al.* Posture calculating algorithm based on LM algorithm for large part docking [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(8): 44-48. (in Chinese)
- [28] 陈冠宇, 成群林, 张解语, 等. 基于多传感器测量的航天器舱段自动对接位姿调整方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(6): 1232-1239.
- CHEN G Y, CHENG Q L, ZHANG J Y, *et al.* Multi-sensor measurement based position and pose adjustment method for automatic docking of spacecraft cabins [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(6): 1232-1239. (in Chinese)
- [29] 金贺荣, 刘达, 于斌, 等. 舱段自动装配位姿求解方法研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(1): 88-92.
- JIN H R, LIU D, YU B, *et al.* Study on posture solution method of automatic assembly of cabins [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(1): 88-92. (in Chinese)
- [30] 金贺荣, 刘达. 面向筒类舱段自动装配的两点定位调姿方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1467-1474.
- JIN H R, LIU D. Two-point positioning and pose adjustment method for automatic assembly of barrel-type cabin[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(12): 1467-1474. (in Chinese)
- [31] MEI B, ZHU W D. Accurate positioning of a drilling and riveting cell for aircraft assembly[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 69: 102112.
- [32] DAVID P, DEMENTHON D, DURAISWAMI R, *et al.* Simultaneous pose and correspondence determination using line features[C]. 2003 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003. *Proceedings*. Madison, WI, USA. IEEE Comput. Soc, 2003, 2: II-II.
- [33] 朱绪胜, 郑联语. 基于关键装配特性的大型零部件最佳装配位姿多目标优化算法[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1726-1736.
- ZHU X SH, ZHENG L Y. Multiple-objective optimization algorithm based on key assembly characteristics to posture best fit for large component assembly[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(9): 1726-1736. (in Chinese)
- [34] 张劲锋, 孙承启, 蔡伟. 基于单目视觉的航天器间相对位姿测量算法[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 187-192.
- ZHANG J F, SUN CH Q, CAI W. Monocular vision-based relative position and attitude measurement algorithm between spacecrafts [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(2): 187-192. (in Chinese)
- [35] 俞慈君, 李江雄, 余锋杰, 等. 带工程约束的点匹

配算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 183-190.

YU C J, LI J X, YU F J, *et al.* 3D points registration algorithm with engineering constraints [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(5):

183-190. (in Chinese)

[36] CHOI A J, PARK J, HAN J H. Automated aerial docking system using onboard vision-based deep learning[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2022, 19(6): 421-436.

作者简介:



王洪喜(1969—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为精密、超精密测量理论与仪器设计、智能传感器、柔顺机构设计理论与应用。E-mail:wanghongxi@xatu.edu.cn



孙正阳(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为精密测量理论、机器视觉、位姿测量和并联机器人等。E-mail:1023690057@qq.com