

# 叉耳式大部件对接的高精度测量与路径规划

黄小童<sup>1,2</sup>, 李丽娟<sup>1,2\*</sup>, 林雪竹<sup>1,2</sup>, 郭丽丽<sup>1,2</sup>, 熊伟华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对新型飞行器对装配精度需求的不断提高,常用的数字化测量辅助装配系统已无法满足的问题,基于 iGPS 激光测量系统提出一种新型多装置混合对接测量方法,并基于该测量方法建立位姿测量模型、位姿解算模型和对接路径解算模型。iGPS 激光测量系统引导全局对接后,触发局部多数据融合测量系统对局部位姿进行传感,通过局部位姿解算模型即可求解接合耳片之间的角度误差和位置误差,补偿误差后可优化对接路径,从而提高对接精度。实验结果表明,补偿误差后的位置精度达到  $5.8 \times 10^{-2}$  mm,角度精度达到  $9^\circ \times 10^{-3}$ ,说明所提方法满足实际对接精度的需求。

**关键词** 测量; 大部件对接; iGPS 激光测量; 多数据融合; 误差补偿; 路径优化

中图分类号 V465

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1204008

## High-Precision Measurement and Path Planning for Butt Joint of Large Parts

Huang Xiaotong<sup>1,2</sup>, Li Lijuan<sup>1,2\*</sup>, Lin Xuezhuzhu<sup>1,2</sup>, Guo Lili<sup>1,2</sup>, Xiong Weihua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** There is growing demand for ensuring accuracy with respect to the assembly of new aircraft. The commonly used digital-measurement auxiliary assembly system cannot meet this demand. In this study, a new multidevice hybrid docking measurement method is proposed based on the iGPS laser measurement system. Further, a position measurement model, position solution model, and docking path solution model are established based on the aforementioned method. After guiding the global docking, the iGPS laser measurement system triggers the local multidata fusion measurement system to detect the local position. The local position solution model can be used to obtain the angle error and position error between the joint ear pieces. The docking path can be optimized after considering the compensation error, improving the docking accuracy. The experimental results indicate that the position accuracy after considering the compensation error is  $5.8 \times 10^{-2}$  mm and that the angle accuracy is  $9^\circ \times 10^{-3}$ , indicating that the proposed method meets the actual docking accuracy requirements.

**Key words** measurement; large parts docking; iGPS laser measurement; multi-data fusion; error compensation; path planning

**OCIS codes** 120.2830; 120.4640; 120.6085

## 1 引 言

随着全三维数字化设计、制造与仿真以及自

动定位技术在大部件装配中的应用,大型部件的自动对接技术已被广泛研究<sup>[1]</sup>。测量辅助装配技术是大部件数字化装配技术的重要组成部分之

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-07-26; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家战略高技术重点专项(2018ZZXX0110)、吉林省科技资源开放共享服务平台与科研条件保障项目(20191004022TC)

\*E-mail: custjuan@126.com

一,该技术随着三维数字化测量设备辅助装配工作的进行,将原有的人工定位转换为数字化的三维测量定位<sup>[2]</sup>。目前,常用的测量辅助装配系统有激光跟踪仪测量系统和 iGPS 测量系统。激光跟踪仪测量系统可实现大范围和高精度的动态测量,并且操作较为简单。以 Leica AT901 激光跟踪仪为例<sup>[3]</sup>,系统的测量精度为  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ ,但测量精度容易受到外界因素的影响,在  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  范围内的实际测量精度为  $0.1 \text{ mm}$ 。iGPS 测量系统<sup>[4]</sup>测量范围广,可同时测量多点并且扩展性强,无测量光路遮挡的问题,测量数据较为稳定,在  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  范围内的测量精度为  $0.12 \text{ mm}$ ,在  $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$  范围内的测量精度为  $0.20 \text{ mm}$ 。范斌等<sup>[5]</sup>通过对比研究得到了 iGPS 测量系统具有多点实时监测和无需转站等优点,相较于激光跟踪仪测量系统,该系统可以提高大部件数字化装配过程中的数字化检测效率,并保证数字化测量过程中测量数据的稳定性。

为了实现更高精度的测量,iGPS 测量系统与其他测量设备融合传感的数字化测量系统被广泛使用<sup>[6-7]</sup>。大部件的对接精度由多项误差按权重分配得到的综合误差来评定,而位姿测量结果直接影响对接精度。iGPS 测量系统可高精度测量部件的全局位姿,但零部件之间的遮挡问题会导致其无法精确测量局部接合耳片的位姿,为了减少累计误差,局

部高精度测量设备被投入使用<sup>[8-9]</sup>。传感器和单目视觉测量设备具有结构简单、抗干扰能力强、成本低和测量精度高的优点,已在航空制造业中投入使用。秦宇<sup>[10]</sup>使用了多个激光位移传感器测量两个部件关键特征之间的距离,但传感器测量系统难以同时修正旋转与位移的偏差。张辉等<sup>[11]</sup>根据翼身对接叉耳孔建立了对叉耳孔空间位姿的视觉测量模型,使用单目视觉测量系统拍摄移动部件存在倾斜角度,这会影响圆心的定位精度,对接精度也会随之降低。

基于上述原因,为了灵活应对各种测量需求,本文针对叉耳式大部件的对接提出多装置混合自动对接测量方法。iGPS 与接触式位移传感器和单目相机混合使用,综合各测量设备的优势来提高整体测量精度,实现全局对接后对局部误差的补偿,优化对接路径,提高整体对接精度。

## 2 大部件对接原理

针对叉耳式大部件对接装配工艺的特点和装配质量的需求,构建的高精度测量与移动路径规划的测量系统,如图 1 所示,其中 AGV 为自动导引运输车,DOF 为自由度。该系统由 6 台 iGPS 激光发射器组成的全局空间位姿测量网络、12 个笔式位移传感器以及 6 台单目相机组成的局部位姿传感测量网络和集成控制系统组成。

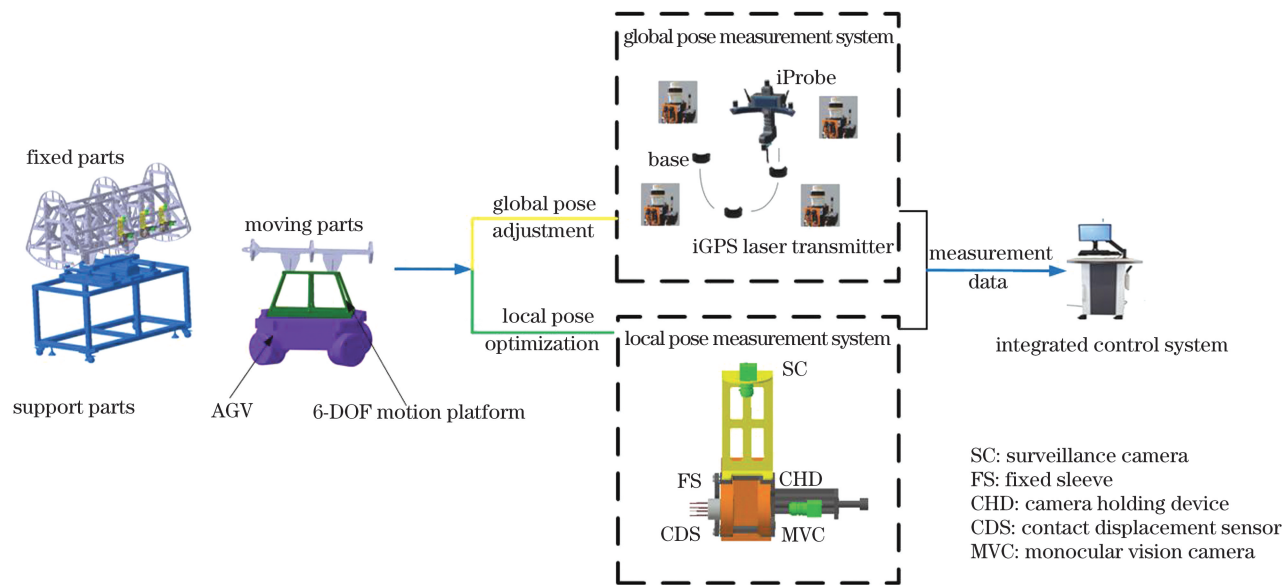


图 1 数字化自动对接测量系统

Fig. 1 Digital automatic docking measurement system

为了便于系统自动调姿和位姿修正以及避免发生干涉,将叉耳式大部件的对接过程分为自动对接测

量系统搭建、全局位姿测量与路径规划和耳片接合后局部位姿传感与路径优化三个部分,流程如图 2 所示。

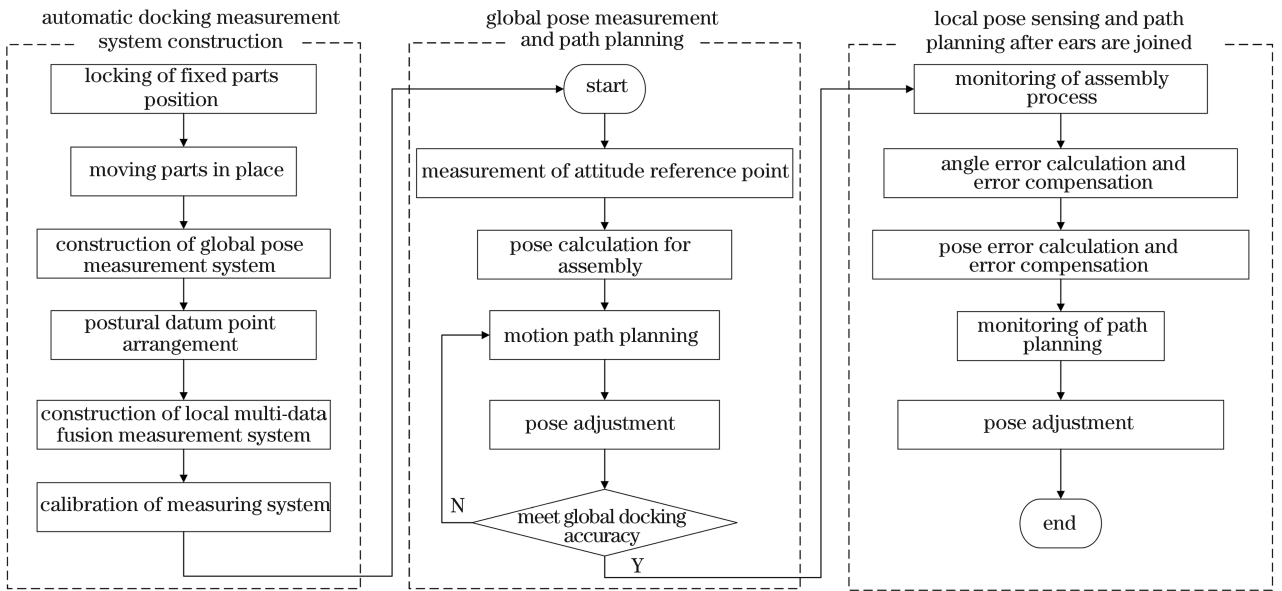


图 2 大部件对接的高精度测量与路径规划的流程

Fig. 2 Flowchart of high-precision measurement and path planning for docking of large components

### 3 位姿解算与对接路径规划

iGPS 测量系统因其具有测量范围广、实时全局性监测以及无需转站的优点,可以实现全局空间位姿的测量。局部位姿传感前,由 iGPS 激光测量系统来完成全局空间位姿的测量与路径规划。测量前,先在移动部件上布设测量特征点,即调姿基准点  $P_{Ai}$  ( $i=1,2,\dots,6$ )、对接评价特征点  $P_{Ej}$  ( $j=1,2,\dots,8$ )和耳片交点  $P_{Rk}$  ( $k=1,2,3$ ),如图 3 所示,其中  $O_G-X_G Y_G Z_G$  为全局空间定位系统的坐标

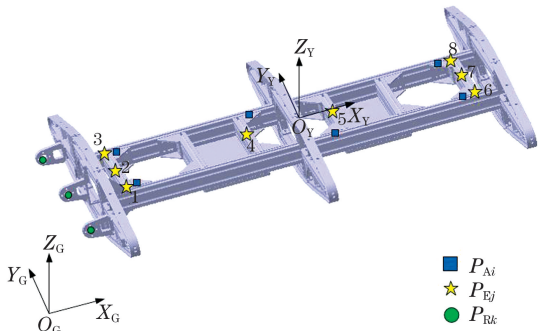


图 3 测量特征点

Fig. 3 Measurement feature points

系,  $O_Y-X_Y Y_Y Z_Y$  为移动部件的坐标系。

#### 3.1 全局位姿感知与对接路径规划

##### 3.1.1 全局空间位姿测量模型

全局空间定位系统的核心是 iGPS 激光发射器,每个发射器发出两束扇形光束,而水平角和俯仰角的激光测量范围即可构成发射器的测量空间。实际的测量过程中,使用发射器对布设在部件上的调姿基准点进行测量,再根据异面交汇原理来求解被测点的空间位置,将目标点与所有测量轴线间的距离平方和作为最小二乘法的目标函数,并用来求解目标点的最优空间位置<sup>[12]</sup>。

设在  $O_G-X_G Y_G Z_G$  坐标系下,发射器的位置为  $M(x_i, y_i, z_i)$ , 被测点  $P'_{Ai}(x'_{Ai}, y'_{Ai}, z'_{Ai})$  的测量轴线为  $l_i$ , 相应的方向角和俯仰角分别为  $A_i$  和  $E_i$ ,  $P'_{Ai}$  到  $l_i$  的垂足为  $N_i$ , 将目标点到各个测量轴线的距离  $d_i$  的平方和定义为最小二乘函数  $f$ , 表达式为

$$f = \sum_{i=1}^6 |d_i|^2 = \sum_{i=1}^6 |P'_{Ai}N_i|^2 = \sum_{i=1}^6 (u_i^2 + v_i^2 + t_i^2), \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} u_i = (x - x_i)(\cos^2 E_i \cos^2 A_i + 1) + (y - y_i)(\cos E_i \sin E_i \sin^2 A_i) + (x - x_i)(\cos E_i \sin A_i \cos A_i) \\ v_i = (x - x_i)(\cos E_i \sin E_i \sin^2 A_i) + (y - y_i)(\sin^2 E_i \sin^2 A_i + 1) + (x - x_i)(\sin E_i \sin A_i \cos A_i) \\ t_i = (x - x_i)(\cos E_i \sin A_i \cos A_i) + (y - y_i)(\sin E_i \sin A_i \cos A_i) + (x - x_i)(\cos^2 A_i + 1) \end{cases} \quad (2)$$

求解  $f$  可得被测目标点  $P_{Ai}(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$ , 根据目标点的空间测量数据可以解算对接位姿。

### 3.1.2 全局空间位姿解算模型

在对接网络中建立坐标系, 即  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系和  $O_Y - X_Y Y_Y Z_Y$  坐标系。移动部件在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系中的位置已知, iGPS 测量系统测量调姿基准点的点集在全局坐标系下为  ${}^G P_{Ai}$ , 在移动部件坐标系下为  ${}^Y P_{Ai}$ , 采用奇异值分解法来求解旋转矩阵  ${}^Y R$  和平移矩阵  ${}^Y T$ , 从而可以将  ${}^Y P_{Ai}$  转换为  ${}^G P_{Ai}$ , 配准两坐标系可以得到

$${}^G_Y P = \begin{bmatrix} {}^G_Y R & {}^G_Y T \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  ${}^G_Y R \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  为从移动部件坐标系转换到全局坐标系的旋转矩阵;  ${}^G_Y T \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为从移动部件坐标系转换到全局坐标系的平移矩阵。姿态可定义为

$${}^G_Y P = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T, \quad (4)$$

式中:  $[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$  为位置分量;  $[\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T$  为姿态分量;  $\epsilon_x, \epsilon_y$  和  $\epsilon_z$  分别为移动坐标系各轴线相对于全局坐标系的夹角。展开后可以得到

$${}^G_Y P = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_y \cos \epsilon_z & \cos \epsilon_x \sin \epsilon_z & -\sin \epsilon_y \\ \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z - \cos \epsilon_x \sin \epsilon_z & \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z + \cos \epsilon_x \cos \epsilon_z & \sin \epsilon_x \cos \epsilon_y \\ \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z + \sin \epsilon_x \sin \epsilon_z & \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z - \sin \epsilon_x \cos \epsilon_z & \cos \epsilon_x \cos \epsilon_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

点集配准后, 即可知在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系下移动部件的当前位姿  $P_{v1}(x_{v1}, y_{v1}, z_{v1}, \epsilon_{x_{v1}}, \epsilon_{y_{v1}}, \epsilon_{z_{v1}})$  和目标位姿  $P_{v2}(x_{v2}, y_{v2}, z_{v2}, \epsilon_{x_{v2}}, \epsilon_{y_{v2}}, \epsilon_{z_{v2}})$ 。

### 3.1.3 对接调姿路径解算模型

基于位姿参数可得部件全局对接的移动位移矩阵  $\delta_1 = [x_{v2} - x_{v1} \quad y_{v2} - y_{v1} \quad z_{v2} - z_{v1}]^T$  和旋转角度矩阵  $\delta_2 = [\epsilon_{x_{v2}} - \epsilon_{x_{v1}} \quad \epsilon_{y_{v2}} - \epsilon_{y_{v1}} \quad \epsilon_{z_{v2}} - \epsilon_{z_{v1}}]^T$ 。六自由度调姿平台与移动部件相连的平台为动平台, 标定可得动平台的中心点在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系下的位置矢量为  ${}^G P_{O1}$ , 对接后的位置矢量为  ${}^G P_{O2}$ , 即  ${}^G P_{O1} = [P_{o_{x1}} \quad P_{o_{y1}} \quad P_{o_{z1}}]^T$ ,  ${}^G P_{O2} = [P_{o_{x2}} \quad P_{o_{y2}} \quad P_{o_{z2}}]^T$ , 由(3)式可得

$${}^G P_{O2} = {}^G_Y R {}^G P_{O1} + {}^G_Y T. \quad (6)$$

部件全局对接装配动平台的移动路径为

$$\Delta {}^G P_O = {}^G P_{O2} - {}^G P_{O1}. \quad (7)$$

当知道定位器的调姿矩阵、球铰点的起点与终点坐标时, 即可求解六自由度调姿平台的杆长伸缩量与伸缩速度。当知道每个自由度在对应时刻的位置、速度和加速度三个运动参数时, 即可对路径进行规划。为了保证运动过程的稳定性, 由 5 次多项式来拟合规划调姿轨迹, 即

$$\begin{cases} l(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 \\ v(t) = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 + 4c_4 t^3 + 5c_5 t^4, \\ a(t) = 2c_2 + 6c_3 t + 12c_4 t^2 + 20c_5 t^3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $0 \leq t \leq t_f, t_f$  为调姿时间;  $c_0, c_1, \dots, c_5$  为 6 个

未知数;  $l$  为调姿平台的运动轨迹长度;  $v$  为运动速度;  $a$  为运动加速度。根据初始位姿和目标位姿已知、初始速度与终止速度为 0、初始加速度与终止加速度为 0 的 6 个约束条件, 可以求解(8)式的 6 个未知数  $c_0, c_1, \dots, c_5$  并确定  $l, v$  和  $a$ <sup>[13]</sup>。利用调姿轨迹来计算驱动器中各轴电机的误差补偿值, 修正由标定得到的调姿平台结构误差对移动部件对接结果造成的偏差, 当调姿驱动器全局对接装配时, 先保持位置不变再调整姿态, 然后保持姿态不变再调整位置, 在  $0 \sim t_f$  的时间内, 驱动调姿驱动器中各轴电机来协调移动部件的运动轨迹, 从而完成全局对接。

iGPS 测量系统全局对接后的位置精度约为 0.16 mm, 角度精度约为  $0.02^\circ$ , 此时接合耳片仍存在偏差, 如图 4 所示, 其中  $f_1$  表示移动部件的中心轴线,  $f_2$  表示固定部件的中心轴线,  $\theta$  表示耳片倾斜的角度,  $d'$  表示同轴距离误差。为了实现更高的对接精度, 实验引入局部多数据融合测量系统来完成更高精度的测量。

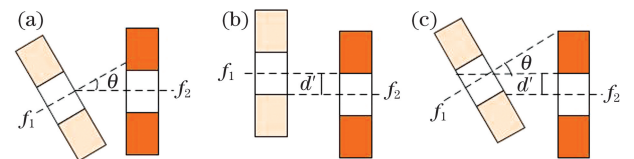


图 4 偏差示意图。(a) 同轴不平行; (b) 平行不同轴; (c) 既不平行也不同轴  
Fig. 4 Schematic of deviation. (a) Non-parallel axes; (b) parallel and not coaxial (c) neither parallel nor coaxial

### 3.2 局部位姿传感与调姿路径的优化

#### 3.2.1 局部位姿测量模型

接触式位移传感器和单目相机具有测量精度高、抗干扰能力强、成本低和结构简单的优点,实验将两者结合使用并综合考虑各自的优势,可以提高系统的可靠性。全局空间定位系统完成对接后,测量耳片接头的位置误差和角度误差,通过补偿误差可以优化调姿路径,从而提高对接精度。

使用固定套筒将传感器固定在固定的耳片上,

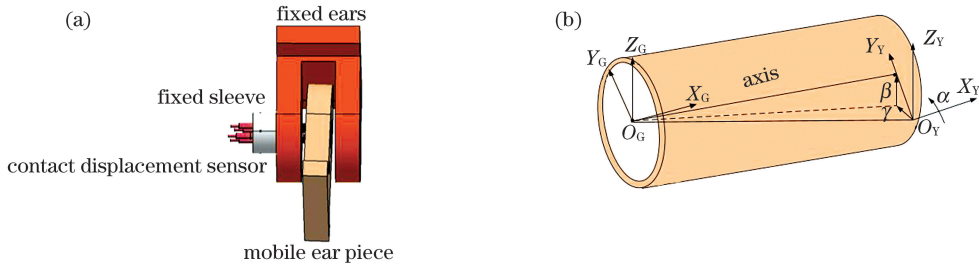


图 5 接合耳片的角度误差测量。(a)角度误差测量装置;(b)角度误差示意图

Fig. 5 Angle error measurement of joint ears. (a) Angle error measuring device; (b) schematic of angle error

补偿角度误差后,令移动部件的耳片与固定部件的耳片平行,补偿接合耳片的圆心位置即可补偿俯仰角  $\beta$ 。相机的光心与固定耳片圆孔的距离约为 80~200 mm 处,使用滚珠丝杠来手动调节相机与

套筒与传感器探头的位置相对固定,标定套筒的位置即可得到传感器探头的空间位置,使用传感器来测量移动耳片的径向位移量,因此测量点只有一个数轴的坐标发生改变,另外两个数轴的坐标与初始相同,如图 5(a) 所示。 $O_Y$  为移动坐标系  $O_Y - X_Y Y_Y Z_Y$  实际测量的原点,将其整体移动到装配全局坐标系  $O_G - X_G Y_G Z_G$  的原点  $O_G$ ,可得轴线相对于  $X_G$ 、 $Y_G$  和  $Z_G$  轴的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,使用传感器可求解翻转角  $\alpha$  和横滚角  $\gamma$ ,如图 5(b) 所示。

耳片的距离,当调到像素最清晰时使用螺钉锁住,如图 6(a) 所示。相机与传感器处于相对面,沿径向测量可解算耳片的实际圆心  $P'_{Rk}$  与理论圆心  $P_{Rk}$  之间的位置误差量,如图 6(b) 所示。

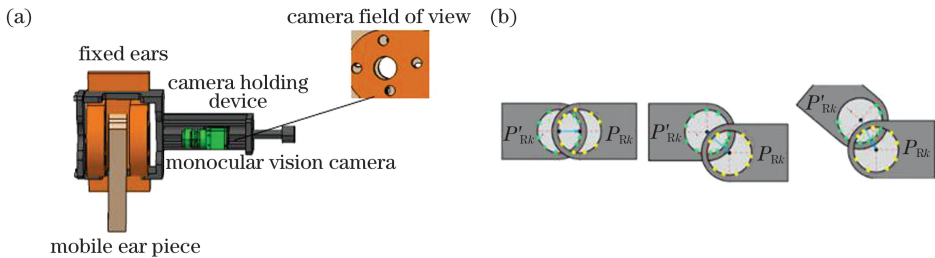


图 6 接合耳片的位置误差测量。(a)测量装置;(b)位置误差示意图

Fig. 6 Position error measurement of joint ears. (a) Measuring device; (b) schematic of position error

为了防止耳片碰撞,使用监控相机来监控耳片对接的过程,监控相机保持装置如图 7 所示。

#### 3.2.2 角度误差求解模型

实验以一组耳片为例,自由状态下的 4 个传感器位于同一平面上,且坐标分别为  $(x_{P_{Lg}}, y_{P_{Lg}}, z_{P_{Lg}})$  ( $g = 1, 2, 3, 4$ ),当传感器测量时,即可得到 4 个传感器所测点的坐标  $P'_{Lg}(x'_{P_{Lg}}, y'_{P_{Lg}}, z'_{P_{Lg}})$ 。最小二乘拟合初始状态下的平面记作  $S_1$ ,移动耳片的平面记作  $S_2$ ,将初始状态的 4 个点  $P_{L1}$ 、 $P_{L2}$ 、 $P_{L3}$  和  $P_{L4}$  转换到  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系中的  $X_G O_G Z_G$  平面上,令点  $P_{L4}$  与  $O_G$  重合。

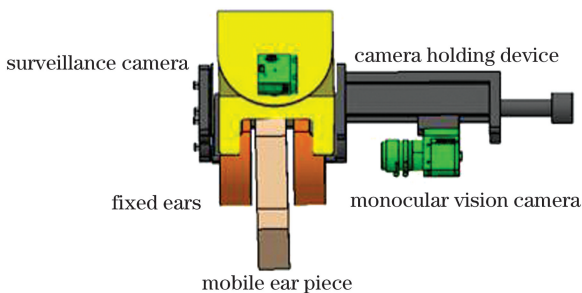


图 7 监控相机的结构

Fig. 7 Monitoring camera holding device

若只有  $\alpha$  或  $\gamma$  的角度误差,则转换后的点  $P'_{L1}$  和  $P'_{L2}$  分别与点  $P_{L1}$  和  $P_{L2}$  重合,所以只需求解两

个平面上法向量之间的夹角即可求得角度误差,如图 8(a)所示。将  $S_1$  的法向量记作  $\mathbf{n}_1$ ,  $S_2$  的法向量记作  $\mathbf{n}_2$ ,  $\alpha$  的表达式为

$$\alpha = \omega_1 \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|}\right) + \omega_2 \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|}\right) + \omega_3 \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|}\right), \quad (9)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  为三组传感测量装置的标定精度,同时满足  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。同理,  $\gamma$  值的也可以使用(9)式求得。若同时存在  $\alpha$  和  $\gamma$  误差,转换后

只有点  $P_{L1}$  和  $P'_{L1}$  重合,如 8(b)所示。将直线  $l_2$  投影至  $l_3$  即可求解  $\gamma$ ,表达式为

$$\gamma = \omega_1 \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_2 l_3}\right) + \omega_2 \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_2 l_3}\right) + \omega_3 \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_2 l_3}\right)。 \quad (10)$$

投影后得到平面  $S_3$ ,同理使用(9)式可以求解  $S_3$  与  $S_1$  之间的夹角  $\alpha$ ,综上所述可以得到三组耳片翻转角  $\alpha$  和横滚角  $\gamma$  的误差量。

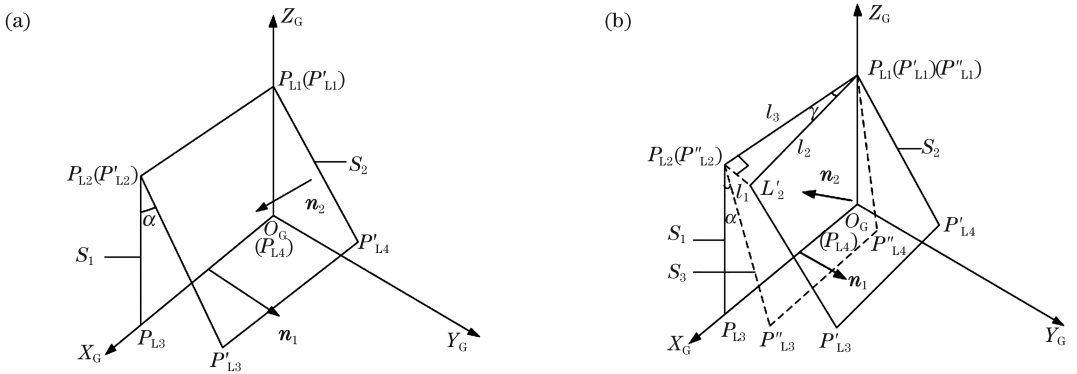


图 8 角度误差的求解模型。(a)一个角度误差;(b)两个角度误差

Fig. 8 Angle error solution model. (a) One angle error; (b) two angle errors

### 3.2.3 位置误差求解模型

使用相机来拍摄又耳孔图像,图像拟合后计算移动耳片接合圆心的空间位姿,采用基于半径约束的随机一致性采样最小二乘拟合圆算法对移动耳片接合圆进行拟合,提取轮廓后将检测到的弧断按照  $C_1, C_2, \dots, C_n$  的顺序进行编号,对所有得到的弧断  $C_n$  进行预拟合,根据拟合结果将所有弧段分为有用弧段和无用弧段,采用 RANSAC 算法<sup>[14]</sup>在对有用弧段拟合前对所有点再次进行筛选,该方法较经典的最小二乘法<sup>[15-16]</sup>具有明显优势,可以有效提高圆心的定位精度。当将圆半径作为约束参与拟合时<sup>[17]</sup>,根据拉格朗日乘数法,则最小二乘优化法的目标函数可写为

$$\delta = \sum_{m'=1}^{M'} [\sqrt{(x_{m'} - x_{am'})^2 + (y_{m'} - y_{am'})^2} - r]^2 + (r - r_k), \quad (11)$$

式中:  $M'$  为参与拟合计算的特征点个数;  $(x_{m'}, y_{m'})$

为第  $m'$  个圆弧特征点的坐标;  $(x_{am'}, y_{am'})$  为第  $m'$  个圆心的坐标;  $r$  为拟合半径;  $r_k$  为约束半径。

拟合得到像平面特征点为  $(x_{am'}, y_{am'}, f)$ , 其中  $f$  为焦距,采用目标点特征的单目视觉位姿测量算法<sup>[18-19]</sup>得到其在相机坐标系  $O_C - X_C Y_C Z_C$  的三维坐标为  $(k_{m'} x_{am'}, k_{m'} y_{am'}, k_{m'} f)$ , 其中  $k_{m'}$  为二维到三维的转换系数。求解  $O_C - X_C Y_C Z_C$  坐标系与  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系的姿态转换关系,即可得到  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系下圆心点的位置矢量  ${}^G \mathbf{P}_{Rm'}$ , 表达式为

$${}^G \mathbf{P}_{Rm'} = {}^G \mathbf{R} \times {}^C \mathbf{P}_{Rm'} + {}^G \mathbf{T}, \quad (12)$$

式中:  ${}^C \mathbf{P}_{Rm'}$  为  $O_C - X_C Y_C Z_C$  坐标系下拟合圆心点的位置矢量;  ${}^G \mathbf{R}$  和  ${}^G \mathbf{T}$  分别为坐标系转换和平移矩阵。使用(12)式可以计算得到又耳孔圆心在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系中理论位置  $P_{Rm'}$  与实际位置  $P_{Rm'}$  的位置误差,表达式为

$$\begin{cases} \Delta a = \omega_4 (x_{R1} - x_{R1'}) + \omega_5 (x_{R2} - x_{R2'}) + \omega_6 (x_{R3} - x_{R3'}) \\ \Delta b = \omega_4 (y_{R1} - y_{R1'}) + \omega_5 (y_{R2} - y_{R2'}) + \omega_6 (y_{R3} - y_{R3'}) \\ \Delta c = \omega_4 (z_{R1} - z_{R1'}) + \omega_5 (z_{R2} - z_{R2'}) + \omega_6 (z_{R3} - z_{R3'}) \end{cases}, \quad (13)$$

式中： $w_4$ 、 $w_5$  和  $w_6$  为三组耳片上的三个测量相机的标定精度，同时满足  $w_4 + w_5 + w_6 = 1$ ； $\Delta a$ 、 $\Delta b$  和  $\Delta c$  为三个坐标的位置误差。

### 3.2.4 误差补偿与优化调姿路径解算模型

使用(3)式对点集进行配准，并将局部多数据融合测量系统测量的点集统一到  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系下，再对 3.2.2 节和 3.2.3 节计算得到的角度误差和位置误差进行补偿，即在移动部件全局对接后通过对局部误差进行补偿以优化对接位姿，提高整体装配精度。首先补偿角度误差，即基于当前位姿分别绕 X 轴和 Z 轴旋转  $\alpha$  和  $\gamma$ ，旋转角度整理成矩

阵形式为

$${}^G \mathbf{R}_{\delta R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma & 0 \\ -\cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

角度误差补偿后，设动平台中心点的理论位置矢量  ${}^G \mathbf{P}_{O3} = [P_{o_{x3}} \ P_{o_{y3}} \ P_{o_{z3}}]^T$ 。不考虑调姿平台的调姿误差，则  ${}^G \mathbf{P}_{O3}$  为

$${}^G \mathbf{P}_{O3} = {}^G \mathbf{R}_{\delta R} \times {}^G \mathbf{P}_{O2} \quad (15)$$

角度误差补偿的调姿路径为  $\Delta^G \mathbf{P}'_{Om'}$ ，表达式为

$$\Delta^G \mathbf{P}'_{Om'} = {}^G \mathbf{P}_{O3} - {}^G \mathbf{P}_{O2} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cdot P_{o_{x2}} + \cos \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{y2}} - P_{o_{x2}} \\ -\cos \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{x2}} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot P_{o_{y2}} + \sin \alpha \cdot P_{o_{z2}} - P_{o_{y2}} \\ \sin \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{x2}} - \sin \alpha \cos \gamma \cdot P_{o_{y2}} + \cos \alpha \cdot P_{o_{z2}} - P_{o_{z2}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

按照上述步骤调姿路径，逆解可得误差补偿优化后的六自由度各连杆长度  $L'_1, L'_2, \dots, L'_6$  和全局调姿后的六自由度各连杆长度  $L_1, L_2, \dots, L_6$ ，计算可以得到各连杆伸缩量  $K_1, K_2, \dots, K_6$ ，则表达式为

$$K = L' - L \quad (17)$$

若调整量较小，可以避免叉耳式大部件发生碰撞。将每个伸缩量分成  $B$  步，可以通过电动机来控制驱动速度以完成角度误差补偿后的对接路径优化。位置误差补偿是在补偿角度误差后位姿的基础上调整计算得到的位置误差，设补偿位置误差后的动平台的中心位置矢量为  ${}^G \mathbf{P}_{O4}$ ，表达式为

$${}^G \mathbf{P}_{O4} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cdot P_{o_{x2}} + \cos \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{y2}} - P_{o_{x2}} + \Delta a \\ -\cos \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{x2}} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot P_{o_{y2}} + \sin \alpha \cdot P_{o_{z2}} - P_{o_{y2}} + \Delta b \\ \sin \alpha \sin \gamma \cdot P_{o_{x2}} - \sin \alpha \cos \gamma \cdot P_{o_{y2}} + \cos \alpha \cdot P_{o_{z2}} - P_{o_{z2}} + \Delta c \end{bmatrix} \quad (18)$$

位置补偿调姿路径为

$$\Delta^G \mathbf{P}''_O = {}^G \mathbf{P}_{O4} - {}^G \mathbf{P}_{O3} \quad (19)$$

当补偿位置误差时，调姿平台的调姿方式与角度误差补偿方式相同，综上即可得到局部误差补偿调姿后，移动部件优化的位姿  $P_{v3} = (x_{v3}, y_{v3}, z_{v3}, \varepsilon_{x_{v3}}, \varepsilon_{y_{v3}}, \varepsilon_{z_{v3}})$ 。

### 3.3 对接质量的评价

对接误差是由误差按权重分配合成的综合误差，即移动部件的实际位姿与理论位姿的偏差，设移动部件实际和理论位置矢量分别为  ${}^N \mathbf{P}_i$  和  ${}^M \mathbf{P}_i$ 。

$P_{Ai}$ 、 $P_{Ej}$  和  $P_{Rk}$  在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系中的位置误差分别为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}_{Ai}(v_3) = {}^N \mathbf{P}_{Ai} - {}^M \mathbf{P}_{Ai} = {}^N \mathbf{P}_{Ai} - ({}^G \mathbf{R} \times {}^M \mathbf{P}_{Ai} + {}^G \mathbf{T}) \\ \Delta \mathbf{P}_{Ej}(v_3) = {}^N \mathbf{P}_{Ej} - {}^M \mathbf{P}_{Ej} = {}^N \mathbf{P}_{Ej} - ({}^G \mathbf{R} \times {}^M \mathbf{P}_{Ej} + {}^G \mathbf{T}) \\ \Delta \mathbf{P}_{Rk}(v_3) = {}^N \mathbf{P}_{Rk} - {}^M \mathbf{P}_{Rk} = {}^N \mathbf{P}_{Rk} - ({}^G \mathbf{R} \times {}^M \mathbf{P}_{Rk} + {}^G \mathbf{T}) \end{cases} \quad (20)$$

使用  $P_{E1}$  和  $P_{E3}$  来求解移动部件在  $O_G - X_G Y_G Z_G$  坐标系中的安装角误差  $\lambda$ ，使用  $P_{E2}$ 、 $P_{E4}$ 、

$P_{E5}$  和  $P_{E7}$  来求解上反角误差  $\eta$ ，使用  $P_{E6}$  和  $P_{E8}$  来求解后掠角误差  $\chi$ ，表达式为

$$\begin{cases} \lambda = \arctan\left(\left|\frac{z_1^E - z_3^E}{y_1^E - y_3^E}\right|\right) \\ \eta = \arctan\left(\left|\frac{z_7^E - z_4^E + z_5^E - z_2^E}{x_7^E - x_4^E + x_5^E - x_2^E}\right|\right) \\ \chi = \arctan\left(\left|\frac{x_8^E - x_6^E}{y_8^E - y_6^E}\right|\right) \end{cases} \quad (21)$$

几项误差按权重  $w_j$  分配合成综合误差,即可 得部件对接位置误差  $\Delta P$  和角度误差  $\Delta\theta$ ,表达式为

$$\begin{cases} \Delta P = \sqrt{(w_1 \Delta P_{Ai})^2 + (w_2 \Delta P_{Ej})^2 + (w_3 \Delta P_{Rk})^2} \\ \Delta\theta = \sqrt{(w_4 \Delta\alpha)^2 + (w_5 \Delta\gamma)^2 + (w_6 \Delta\lambda)^2 + (w_7 \Delta\eta)^2 + (w_8 \Delta\chi)^2} \end{cases} \quad (22)$$

### 4 实验与结果分析

对接实验测量场地的尺寸为 12 m×10 m,对接大部件的尺寸为 4 m×2 m×1.5 m,6 台 iGPS 发射器布局如图 9 所示。接触式位移传感器为基恩士 GT2-S5 笔式传感器,测量范围为 20 mm,测量精度可达  $10^{-3}$  mm;单目视觉相机为 AVT 公司的 F503B,分别率为 2588 pixel×1940 pixel,靶面尺寸为 5.76 mm×4.29 mm,像元尺寸为 2.2  $\mu$ m,并配有 M0814-MP2 百万像素的摄像头,测量精度为  $1.5 \times 10^{-2}$  mm。六自由度调姿平台通过建立正、逆误差模型的方法<sup>[20]</sup>来标定调姿平台在 X、Y 和 Z 轴的位置精度,精度分别为  $4.5 \times 10^{-3}$ ,  $3.3 \times 10^{-3}$ ,  $4.7 \times 10^{-3}$  mm,在 X、Y 和 Z 轴的角度精度分别为  $4.0^\circ \times 10^{-3}$ ,  $3.0^\circ \times 10^{-3}$  和  $4.6^\circ \times 10^{-3}$ ,因此该配置完全满足部件高精度的测量需求。实验前,按照图 3 在移动

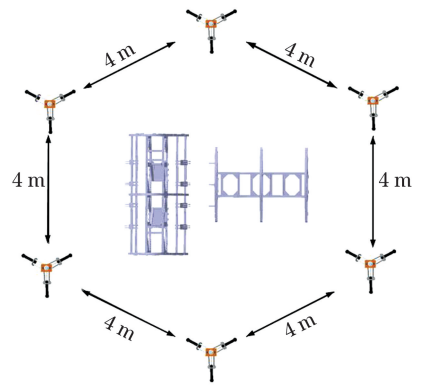


图 9 iGPS 发射器布局

Fig. 9 iGPS transmitter layout

部件布设 6 个调姿基准点与 8 个对接评价特征点。

当使用全局空间定位系统测量基准点的位置时,iGPS 测量系统的激光光束覆盖整个部件即可完成全局测量,调姿基准点的测量结果如表 1 所示。

表 1 调姿基准点的坐标信息

Table 1 Coordinate information of reference point of attitude adjustment

| Point | Assembly coordinate system/mm |         |          | Moving parts coordinate system/mm |          |          |
|-------|-------------------------------|---------|----------|-----------------------------------|----------|----------|
|       | x                             | y       | z        | x                                 | y        | z        |
| $P_1$ | 2574.619                      | 845.850 | 162.656  | -139.258                          | 782.754  | -150.531 |
| $P_2$ | 2272.205                      | 827.698 | 32.148   | -337.265                          | 554.236  | -195.716 |
| $P_3$ | 2390.252                      | 454.690 | 62.055   | 11.407                            | 377.364  | -100.384 |
| $P_4$ | 2106.246                      | 15.124  | -31.793  | 148.475                           | -154.245 | -194.172 |
| $P_5$ | 2521.592                      | 161.841 | -306.642 | 313.827                           | 266.476  | -468.073 |
| $P_6$ | 2627.613                      | 649.994 | -303.400 | 39.408                            | 683.888  | -465.489 |

从表 1 可以看到,将调姿基准点的坐标信息代入对接位姿解算模型即可求得全局对接移动的位姿信息,对调姿基准点与对接质量评价点等参数再次测量,将测量结果代入对接误差解算模型即可求得

全局调姿后的位置误差为 0.16 mm,角度误差为  $0.02^\circ$ 。通过触发接触式位移传感器来测量三组耳片,将测量信息代入角度误差解算模型即可求得角度误差,代入位姿优化解算模型来补偿角度误差以



优化调姿路径,即可得到三组耳片角度误差补偿前后的角度测量数据,如表 2 所示。

表 2 补偿前后的角度测量数据

Table 2 Angle measurements before and after compensation

| Three sets of ear pieces | Before and after | $\alpha/(\circ)$ | $\gamma/(\circ)$ |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1                        | Before           | 0.0162           | 0.0234           |
|                          | After            | 0.0046           | 0.0034           |
| 2                        | Before           | 0.0112           | 0.0066           |
|                          | After            | 0.0034           | 0.0032           |
| 3                        | Before           | 0.0158           | 0.0186           |
|                          | After            | 0.0039           | 0.0042           |

从表 2 可以看到,所提方法在角度误差补偿后已满足高精度的对接要求,但仍存在倾斜角度误差,但对圆心定位的影响很小。将测量信息代入位置误差解算

模型即可求得位置误差,将其代入位姿优化解算模型来补偿位置误差以优化调姿路径,可得三组耳片位置误差补偿前后的圆心位置误差,结果如表 3 所示。

表 3 补偿前后的位置误差

Table 3 Position error before and after compensation

| Center point | Before and after | $\Delta a/\text{mm}$ | $\Delta b/\text{mm}$ | $\Delta c/\text{mm}$ |
|--------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1            | Before           | 0.095                | 0.089                | 0.087                |
|              | After            | 0.026                | 0.028                | 0.029                |
| 2            | Before           | 0.091                | 0.087                | 0.086                |
|              | After            | 0.024                | 0.027                | 0.031                |
| 3            | Before           | 0.098                | 0.092                | 0.085                |
|              | After            | 0.028                | 0.029                | 0.028                |

使用公共点将移动部件的理论数模与实际数模直接拟合对齐,然后对其进行三维偏差分析,图 10

分别为全局对接后、局部误差补偿后的对接偏差分析结果。

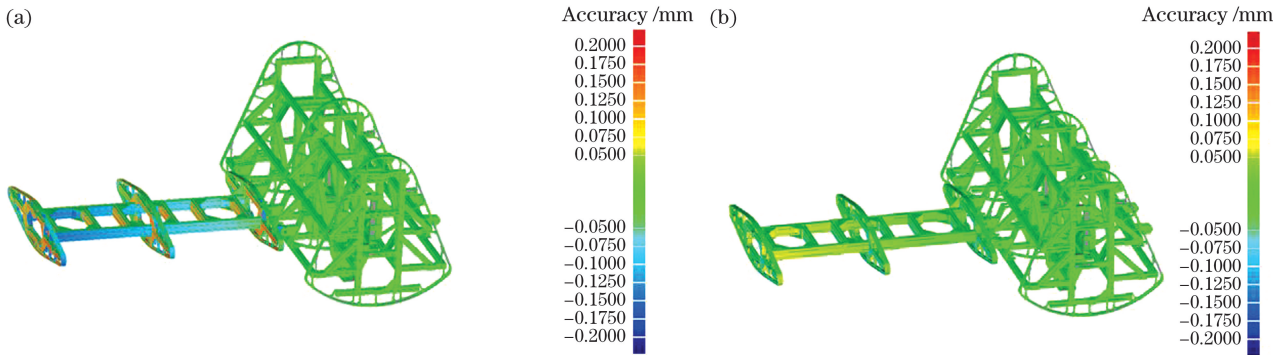


图 10 不同情况下的对接偏差分析。(a)全局对接;(b)局部误差补偿后

Fig. 10 Analysis of docking deviation in different situations. (a) Global docking; (b) after partial error compensation

从图 10 可以看到,全局对接后的对接偏差范围为 $\pm 0.175\text{ mm}$ ,局部误差补偿优化后的对接偏差范围为 $\pm 0.075\text{ mm}$ ,说明所提方法可以有效提高对接精度,对接后的位置精度达到 $5.8 \times 10^{-2}\text{ mm}$ ,角度精度达到 $9^\circ \times 10^{-3}$ 。

## 5 结 论

本课题组提出多装置混合测量方法,该方法综合各测量设备的优点提高系统的可靠性,实现更高的测量精度。基于该测量方法对叉耳式大部件进行

对接,融合使用 iGPS、接触式位移传感器和单目视觉相机,对局部接合耳片位姿进行更高精度的测量,并通过建立的误差解算模型来求解全局对接后接合耳片的角度误差和位置误差,误差补偿结果反馈至六自由度调姿平台,可以优化调姿路径。实验结果表明,所提方法可以有效提高大部件的对接精度,不仅适用于叉耳式大部件,还可适用于其他大部件的对接装配。

### 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] Chen L. Research on coordinated technology of aircraft wing body docking assembly assisted by digital measurement [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.  
陈磊. 数字化测量辅助的飞机翼身对接装配协调技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [3] Fan B X. Research and implementation of high-precision coordinate measurement technology of laser tracker [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2013.  
范百兴. 激光跟踪仪高精度坐标测量技术研究与实践[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
- [4] Jin Z J. Establishment and optimization of large-volume measuring field in aircraft assembly [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.  
金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [5] Fan B, Ji Q S, Li M F, et al. iGPS and laser tracker applications comparison in digital assembly of large aircraft parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 57-62.  
范斌, 季青松, 李明飞, 等. iGPS 测量系统与激光跟踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 57-62.
- [6] Wang J W, Yang L H, Shi S D, et al. Indoor integrated navigation algorithm based on workshop measurement positioning system and lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101201.  
王金旺, 杨凌辉, 史慎东, 等. 基于工作空间测量定位系统和激光雷达的室内组合导航算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101201.
- [7] Liu L, Ma G Q, Gao Y, et al. Flexible measurement technology of complex curved surface three-dimensional shape robot based on iGPS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304006.  
刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304006.
- [8] 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.  
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.
- [9] Zhu Y G, Zhang W B, Deng Z P, et al. Dynamic synthesis correction of deviation for aircraft wing-fuselage docking assembly based on laser tracker and machine vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 187-196.  
朱永国, 张文博, 邓正平, 等. 基于激光跟踪仪和机器视觉的飞机翼身对接装配偏差动态综合修正[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 187-196.
- [10] Qin Y. Research on docking technology of aircraft large parts based on laser ranging and machine vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.  
秦宇. 基于激光测距和机器视觉的飞机大部件对接技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [11] Zhang H, Li S G, Xu Y, et al. A vision measuring method for fork type wing-fuselage docking [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 56-61.  
张辉, 李泷杲, 徐岩, 等. 一种面向叉耳式翼身对接的视觉测量方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 56-61.
- [12] Lin X Z. Assembly and joint measurement method and experimental study of large aircraft components based on full 3-D model[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.  
林雪竹. 基于全三维模型的飞机大部件装配对接测量方法及实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [13] Ji H X. Research and system development of automatic measurement technology in docking of large aircraft components [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.  
季红侠. 飞机大部件对接中的自动测量技术与系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [14] Thu T T, Hamamura J, Soejima R, et al. Comparative evaluation of FPGA implementation alternatives for real-time robust ellipse estimation based on RANSAC algorithm [J]. IEICE

- Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2017, E100.A(7): 1409-1417.
- [15] Gander W, Golub G H, Strelbel R. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. BIT, 1994, 34(4): 558-578.
- [16] Chernov N, Lesort C. Least-squares fitting of circles [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005, 23(3): 239-252.
- [17] Liu K, Zhou F Q, Zhang G J. Radius constraint least-square circle fitting method and error analysis [J]. Journal of Optoelectronics • laser, 2006, 17(5): 604-607.  
刘珂, 周富强, 张广军. 半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析[J]. 光电子 • 激光, 2006, 17(5): 604-607.
- [18] Rosten E, Loveland R. Camera distortion self-calibration using the plumb-line constraint and minimal Hough entropy [J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22(1): 77-85.
- [19] Pan W, Zhu F, Hao Y M, et al. Pose measurement method of three-dimensional object based on multi-sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (2): 0212007.  
潘旺, 朱枫, 郝颖明, 等. 基于多传感器的三维目标位姿测量方法[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212007.
- [20] Wu Y H. Six-degree-of-freedom posture adjustment mechanism and its application in space-expandable thin-film cameras [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.  
吴英辉. 六自由度位姿调节机构及在空间可展薄膜相机的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.