

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.005

## 基于多传感融合的自动钻铆孔位在线测量方法

潘国威, 陈文亮

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:** 为了获得飞机壁板自动钻铆中孔位的实际位置和法向信息, 提出了一种基于视觉和激光测距多传感器融合的孔位在线测量方法, 该方法可以实时获得钻铆任务的孔位偏差修正量, 从而保证壁板钻铆质量。首先, 通过建立视觉和激光测距传感器与钻铆机参考坐标系间的映射关系, 获得了钻铆孔位在线测量的多传感器融合模型, 给出了孔位位置和法向的在线测量原理。然后, 为了简化标定过程和提高标定精度, 设计了一种同时适用于视觉和激光测距传感器的标定板, 给出了位置和法向测量的标定方法。最后, 测量试验表明, 多传感融合的在线测量方法孔位测量位置误差 $\leq 0.2$  mm, 法向误差 $\leq 0.3^\circ$ , 能够满足飞机钻铆孔位测量精度要求。

**关键词:** 自动钻铆; 多传感融合; 在线测量; 标定

中图分类号: V262.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)03-0388-06

## Online Measurement Method for Automatic Drilling and Riveting Based on Multi-sensor Fusion

PAN Guowei, CHEN Wenliang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In order to obtain the actual position and normal vector information in the process of automatic drilling and riveting for aircraft components assembly, an on-line measurement method based on multi-sensor fusion included with vision and laser distance sensors is proposed. The method can obtain the correction of hole position deviation in real time and guarantee the quality of riveting and drilling. Firstly, by establishing the mapping relationship between the sensors and the reference coordinate system of the machine, the multi-sensor fusion model for on-line measurement of drilling and riveting holes is obtained. Besides, the on-line measurement principle of the hole position and orientation vector is given. Then, in order to simplify the calibration process and improve the accuracy of the calibration, a calibration target suitable for both vision and laser distance sensors is designed. Moreover, the calibration method about the position and orientation vector measurement is given. Finally, through the test, the position error of the hole position on-line measurement is no more than 0.2 mm, and the orientation error is within  $0.3^\circ$ , which can meet the accuracy requirements of hole measurement during aircraft drilling and riveting.

**Key words:** automatic drilling and riveting; multi-sensor fusion; on-line measurement; calibration

飞机装配中待钻铆零件多为尺寸较大且整体刚性较弱的薄壁类, 由于装配过程中引入的累积偏差, 往往使得待钻铆零件的实际外形与理论数模之

间存在偏差<sup>[1]</sup>。待钻铆零件中存在大量的钻铆孔位, 装配质量要求钻铆孔的位置精度为 $\pm 0.5$  mm, 孔的法向精度为 $\pm 0.5^\circ$ <sup>[2]</sup>, 若按照待钻铆连接孔位的

收稿日期: 2019-03-30; 修订日期: 2019-05-23

通信作者: 陈文亮, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cwlme@nuaa.edu.cn。

引用格式: 潘国威, 陈文亮. 基于多传感融合的自动钻铆孔位在线测量方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 388-393. PAN Guowei, CHEN Wenliang. Online measurement method for automatic drilling and riveting based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 388-393.

理论信息进行制孔,必然会导致制孔的精度误差,从而进一步影响铆接质量<sup>[3]</sup>。因此,在飞机装配自动钻铆过程中,如何准确地获取待钻铆孔位的实际位置和法向并计算自动钻铆机的调整补偿量,是完成高质量钻铆连接和保障飞机装配质量的关键<sup>[4-5]</sup>。

为了保证铆接质量,当前的研究中,主要采用视觉测量待钻铆孔位的初始位置信息。毕运波等<sup>[6]</sup>通过视觉测量飞机环形制孔的基准孔位偏差,结合法向信息,构建孔位误差补偿模型,提高了制孔精度。Zhu等<sup>[7]</sup>利用单目相机测量飞机部件上的基准孔位,获得了孔位理论和实际圆心的偏差量,给出了飞机部件理论和实际数模的误差修正量。蒋滔等<sup>[8]</sup>通过分析视觉测量系统中铆钉图像特征,构建了基于视觉的飞机蒙皮铆接质量测量系统。姜春英等<sup>[9]</sup>研究了机器人自动钻铆视觉辅助定位方法,该方法结合图像采集的位置信息,运用插值法完成铆接孔的位置理论计算。除了位置精度,壁板自动钻铆中孔位的垂直度也是影响制孔质量的重要因素。资料显示,当壁板铆接孔位垂直度误差倾斜角度超过 $5^\circ$ ,疲劳寿命降低约95%<sup>[10]</sup>。通过测量钻铆孔位的法向来获得铆接孔位的初始垂直度误差,其中以激光测距传感器为主的非接触式法向测量方法应用较为广泛<sup>[11]</sup>。通常将激光测距传感器汇聚在较小的测量区域,基于测量面的平面假设,以测量面法向等效为孔位的法向。Yuan等<sup>[12]</sup>采用4个激光传感器测量曲面法向信息,并通过一种双偏心机构实行法向姿态的调整。Tian等<sup>[13]</sup>为了提高基于机器人的飞机装配制孔系统定位精度,提出了一种四激光测距传感器的法向测量方法。公茂震等<sup>[14]</sup>将3个激光测距传感器测量导的法向信息用于机器人制孔垂直度调整,提高了机器人法向定位精度。

由上可知,现有钻铆孔位测量方法,主要通过将视觉测量孔位置信息和激光测距传感器测量的法向信息用于钻铆零件的初始位姿误差修正,很少涉及钻铆孔位的在线测量修正。本文针对自动钻铆孔位的在线测量,通过融合视觉和激光测距传感器信息来获得实时孔位信息。设计可用于视觉和法向测量的统一标定板,一次装夹即可实现多传感器的标定。通过飞机钻铆孔位测量试验,验证了本文所提测量方法的有效性。

## 1 多传感融合测量系统设计

### 1.1 自动钻铆机末端执行器

本文以南京航空航天大学自主研制的自动钻铆机为研究对象,该钻铆机主要由龙门架带动的

上、下末端执行器和用于工件安装定位与调姿的并联调姿托架等组成<sup>[15]</sup>,如图1所示。

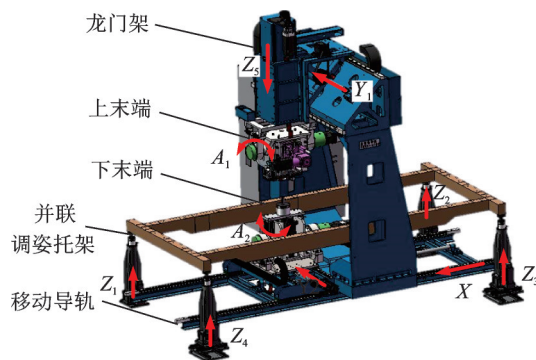


图1 自动钻铆机

Fig.1 Automatic drilling and riveting machine

在钻铆过程中,将壁板零件安装固定在并联调姿托架上,上末端执行器实现待钻铆孔位的位置和法向在线测量、制孔、镗窝和插钉等过程,并通过和下末端执行器的配合,实现铆接任务。上末端执行器通过Y方向上的直线运动执行器实现在线测量孔位位置、孔位法向、制孔和铆接等位置切换,如图2所示。

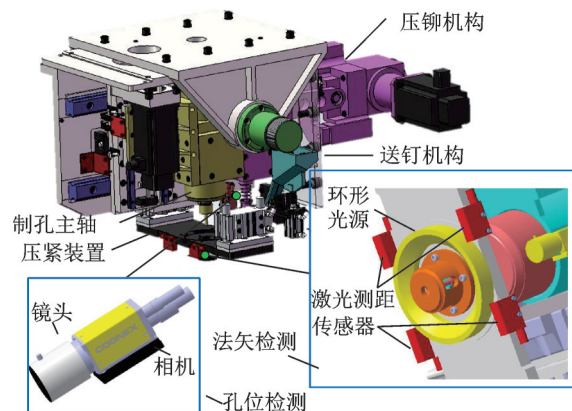


图2 上末端执行器及测量传感器

Fig.2 Upper tool and the measurement sensors

### 1.2 多传感融合测量系统组成

#### 1.2.1 相机

待钻铆孔位位置测量采用COGNEX公司的Insight Micro 1050-01工业相机,配备M0814镜头和ROL-78-W型LED光源,配合自带的In-Sight图像处理软件进行孔位特征的提取与位置量的计算。相机被安装在轴线与制孔主轴平行的侧面,可以在末端执行器多功能切换运动轴的驱动下,沿Y方向移动,以满足在制孔过程中实现对待测量孔位的对准。通过进给轴的上下运动,实现相机焦距的调节,以获得清晰的孔位图像。

#### 1.2.2 激光测距传感器

通过融合多个激光测距传感器测量的距离信息,实现待测量孔位的法向计算。根据测量范围选

用Leuze公司的ODSL 8/V66-200-S12的激光测距传感器,量程为20~200 mm,分辨率为0.1~0.2 mm。结构上将4个激光测距仪均匀四角分布在制孔主轴周边,固定安装于压紧装置的两旁。

## 2 多传感融合钻铆孔位测量方法

### 2.1 多传感融合的坐标映射方法

自动钻铆过程中,通过融合视觉和激光测距传感器测量到的钻铆孔位实时位姿信息,建立自动钻铆机末端执行器和制孔孔位之间的实际坐标变换关系,从而保证钻铆质量。定义如图3所示的自动钻铆全局坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ ,记为 $\{O_b\}$ ;待钻铆零件坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ ,记为 $\{O_w\}$ ;钻铆机上末端执行器坐标系 $O_e-X_eY_eZ_e$ ,记为 $\{O_e\}$ ;相机测量坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ,记为 $\{O_c\}$ ;激光测距传感器距离测量系统坐标系 $O_d-X_dY_dZ_d$ ,记为 $\{O_d\}$ 。

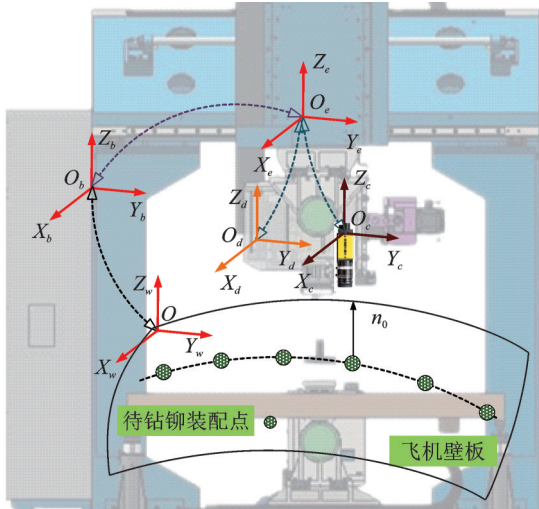


图3 多传感器融合位姿映射关系

Fig.3 Mapping relation of the multi-sensor fusion

通过融合相机获得的特征孔位置信息和基于激光测距传感器获得的特征孔周近似法向信息,可以获得

$$(\mathbf{p}_e \ 1 \ \mathbf{n}_e \ 0)^T = \begin{pmatrix} T_{ec} & 0 \\ 0 & T_{ed} \end{pmatrix} (\mathbf{p}_c \ 1 \ \mathbf{n}_d \ 0)^T \quad (1)$$

式中, $\mathbf{p}_e$ 和 $\mathbf{n}_e$ 为 $\{O_e\}$ 下目标孔位的位置和法向; $\mathbf{p}_c$ 为 $\{O_c\}$ 下的孔位位置坐标; $\mathbf{n}_d$ 为 $\{O_d\}$ 下的孔位法向坐标; $T_{ec}$ 为 $\{O_c\}$ 和 $\{O_e\}$ 间的坐标变换矩阵; $T_{ed}$ 为 $\{O_c\}$ 和 $\{O_d\}$ 间的坐标变换矩阵。

定义 $T_{be}$ 为 $\{O_e\}$ 和 $\{O_b\}$ 间的转换矩阵,根据自动钻铆机运动学反解关系 $f_{inv}$ ,自动钻铆机各驱动轴的驱动量 $d_i$ 为

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T = f_{inv} \left[ \begin{pmatrix} T_{be} & 0 \\ 0 & T_{be} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{ec} & 0 \\ 0 & T_{ed} \end{pmatrix} (\mathbf{p}_c \ 1 \ \mathbf{n}_d \ 0)^T \right] \quad (2)$$

由此,通过多传感数据融合,获得自动钻铆孔位实际信息,通过和离线编程中理论位姿比对计算当前钻铆孔位实时误差,根据运动学反解计算补偿量,以提高铆接质量。

### 2.2 孔位位置测量

飞机壁板钻铆过程通过采用预装配孔或特征标记点作为钻铆孔位测量的识别特征,测量原理如图4所示。定义相机像素坐标系 $O_v-uv$ ,记为 $\{O_v\}$ ;相机成像平面坐标系 $O_p-xy$ ,记为 $\{O_p\}$ 。

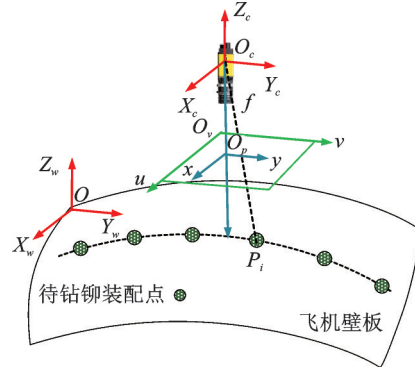


图4 位置测量原理

Fig.4 Principle of position measurement

飞机壁板零件上的孔位经相机拍摄在 $\{O_v\}$ 下的坐标为 $\mathbf{p}_v(u, v, 1)$ ,则其在 $\{O_c\}$ 下的坐标为 $\mathbf{p}_c(x_c, y_c, z_c)$ ,有

$$\mathbf{p}_v^T = \begin{bmatrix} \alpha_x f & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T_{cv} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $T_{cv}$ 为 $\{O_v\}$ 与 $\{O_c\}$ 间的相机内参数矩阵; $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 分别为成像平面到像素平面在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的放大系数; $f$ 为相机焦距; $(u_0, v_0)$ 为光轴在成像平面的交点在 $\{O_v\}$ 下的坐标。

飞机壁板待钻铆孔位在 $\{O_w\}$ 下的坐标为 $\mathbf{p}_w(x_w, y_w, z_w)$ ,则有

$$(\mathbf{p}_c \ 1)^T = T_{cw} (\mathbf{p}_w \ 1)^T \quad (4)$$

式中 $T_{cw}$ 为相机外参数矩阵。

通过式(3,4)可以获得 $\{O_v\}$ 和 $\{O_w\}$ 间的转换矩阵,进一步地,根据式(2)建立 $\{O_w\}$ 和 $\{O_e\}$ 间的转换关系,从而获得实际孔位相对于上末端执行器的位置。

### 2.3 孔位法向测量

飞机钻铆过程中需要调整上末端执行器主轴对准待制孔的法向。通过4个激光测距传感器中的3个测量值拟合出待制孔位区域邻域的近似平面,然后求得该近似平面的法向作为待测量孔位的实际法向。通过4组法向信息实现测量数据的冗余,以提高计算精度和可靠性。如图5所示,激光测距传感器 $L_1 \sim L_4$ 的测距方向和制孔主轴 $T$ 平行,由激光测距传感器的

初始位置和激光发射方向以及测量的距离值可以获得激光与飞机壁板表面的交点 $Q_1 \sim Q_4$ 的坐标。

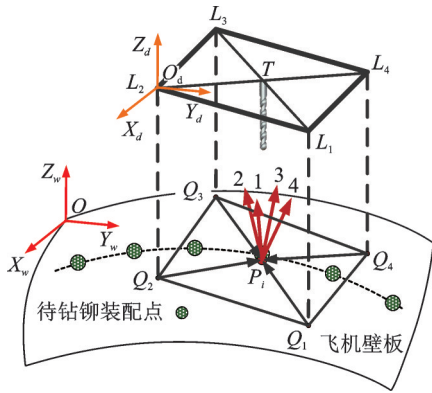


图 5 法向测量原理

Fig.5 Principle of orientation measurement

由向量叉乘可知待制孔区域邻域内的近似平面上点 $p_i$ 处的法向为

$$\begin{aligned} n_1 &= -p_i Q_1 \times p_i Q_2, n_2 = -p_i Q_2 \times p_i Q_3 \\ n_3 &= -p_i Q_3 \times p_i Q_4, n_4 = -p_i Q_4 \times p_i Q_1 \end{aligned} \quad (5)$$

则 $p_i$ 处的法向量为 $n_{p_i}$ 为

$$n_{p_i} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 n_j = (l_{p_i} \quad m_{p_i} \quad n_{p_i})^T \quad (6)$$

在自动钻铆过程中,通过式(6)计算待制孔位的法向量。

### 3 实验验证

为了验证多传感融合的自动钻铆在线测量系统测量精度,首先对该测量系统进行标定,然后通过测量实验验证该方法的孔位测量精度。

#### 3.1 多传感测量系统标定实验

##### 3.1.1 统一标定板设计

为了提高多传感融合在线测量系统的测量精度,设计了一个即可用于相机内外参数的标定,也可用于标定激光测距传感器安装零点位置和姿态参数的标定板。建立如图6所示标定板坐标系 $O_{cb}-X_{cb}Y_{cb}Z_{cb}$ ,记为 $\{O_{cb}\}$ ,该标定板上设有2个平面和4个斜面,平面的参数方程为

$$ax + by + cz - d = 0 \quad (7)$$

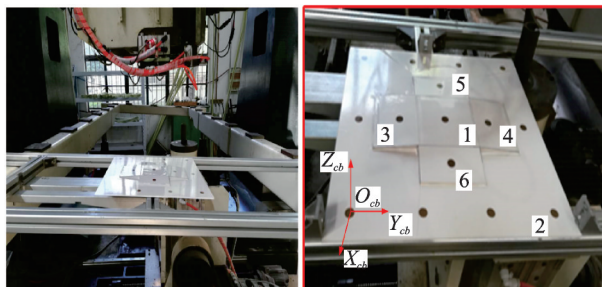


图 6 标定实验

Fig.6 Calibration experiment

通过三坐标测量仪获得标定板上各标记点的坐标以及平面方程参数,其中1~6个平面方程的参数如表1所示。

表 1 测量平面方程参数

Table 1 Parameters of measuring plane equation

$i$	$A$	$b$	$C$	$d$
1	0.000 0	0.000 0	1.000 0	85.000 0
2	0.000 0	0.000 0	1.000 0	100.000 0
3	0.000 0	-0.087 2	0.996 2	84.676 5
4	0.000 0	-0.173 6	0.984 8	98.480 8
5	0.104 5	0.000 0	0.994 5	84.534 4
6	0.139 2	0.000 0	0.990 3	99.026 8

##### 3.1.2 相机测量标定

相机安装在上末端执行器后,通过Faugeras方法标定其内外参数。将标定板放置在自动钻铆机构托架平台上,调整上末端至标定板上方并与标定板平面平行,如图7所示。采集标定板上的特征点图片,通过图像处理,获得 $\{O_c\}$ 下的特征点坐标,记为 $W_i=(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ 。由式(3,4)可得

$$z_c \cdot p_v^T = (T_{cv} \quad 0) T_{cw} (W_i \quad 1)^T \quad (8)$$

将式(8)展开消去 $z_c$ ,并代入标定板上 $n$ 个特征点坐标值,通过最小二乘方法,可以求得相机的内、外参数矩阵 $T_{cv}$ 和 $T_{cw}$ 。

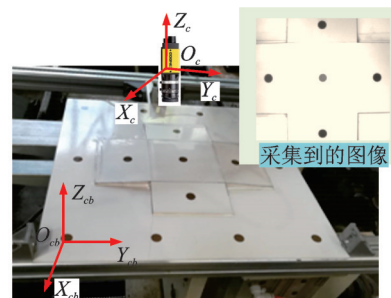


图 7 相机内外参数标定

Fig.7 Camera calibration

##### 3.1.3 法向测量标定

在实际使用中需要对激光测距传感器的安装位置和发射姿态进行标定。4个激光测距传感器实际安装位置为 $R_1 \sim R_4$ ,其在 $\{O_d\}$ 下的坐标记为 $(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri})^T$ ,发射方向为 $(l_{Ri}, m_{Ri}, n_{Ri})^T$ 。各个激光与对应在标定板上的交点位置为 $G_1 \sim G_4$ ,其在 $\{O_d\}$ 下的坐标记为 $(x_{Gi}, y_{Gi}, z_{Gi})^T$ ,如图8所示。

每个激光测距仪的测量值记为 $h_i$ ,则

$$(x_{Gi} \quad y_{Gi} \quad z_{Gi})^T = (x_{Ri} \quad y_{Ri} \quad z_{Ri})^T + h_i (l_{Ri} \quad m_{Ri} \quad n_{Ri})^T \quad (9)$$

每一个激光测距传感器有6个未知量 $(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, l_{Ri}, m_{Ri}, n_{Ri})^T$ 需要标定,因此需要至少6个已知参数的基准平面和激光测距传感器测量值才

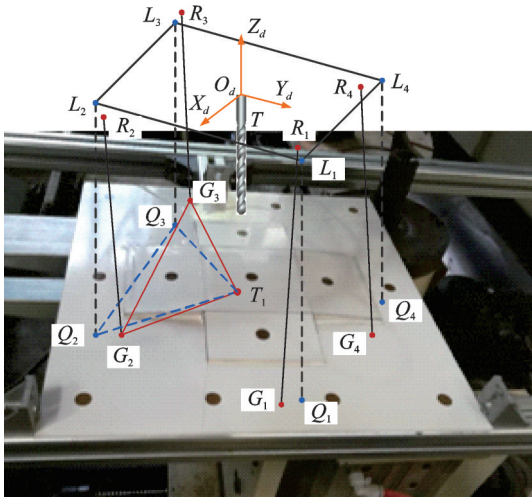


图8 法向测量标定

Fig.8 Orientation measurement calibration

能标定激光测距传感器安装姿态。将式(9)代入到式(7)即可解出激光测距传感器的实际安装位置和发射姿态,有

$$ax_{R_i} + by_{R_i} + cz_{R_i} + h_i(al_{R_i} + bm_{R_i} + cn_{R_i}) = d \quad (10)$$

### 3.2 测量实验

使用标定好的多传感融合测量系统对孔位进行在线测量。将待测量样件装夹固定在自动钻铆机并联调姿托架上,利用多传感融合的测量系统对1~8个预制孔进行测量,通过坐标变换得到其在 $\{O_w\}$ 下的坐标,如图9所示。同时通过三坐标测

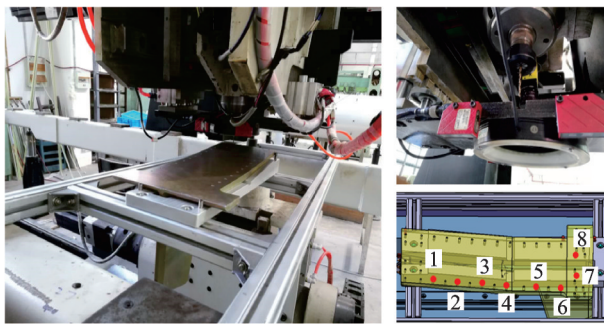


图9 测量实验

Fig.9 Measurement experiment

量机,对1~8孔信息进行测量,两者测量结果如表2所示。

### 3.3 结果分析

由表2中数据,可以获得8个预制孔的多传感器位姿测量结果和三坐标测量结果的位置和姿态偏差分别如图10,11所示。测量结果表明,测量精度平均位置误差在0.2 mm以内,法向误差在0.3°以内。在飞机自动钻铆中,制孔允许的位置和法向误差分别控制在 $\pm 0.5$  mm和 $\pm 0.5^\circ$ 以内<sup>[2]</sup>。故本文研究的多传感融合的在线测量精度能够满足飞机钻铆孔位测量精度要求。

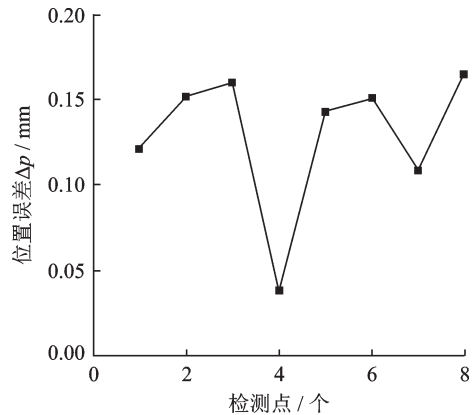


图10 测量点位置误差

Fig.10 Position error of measurement points

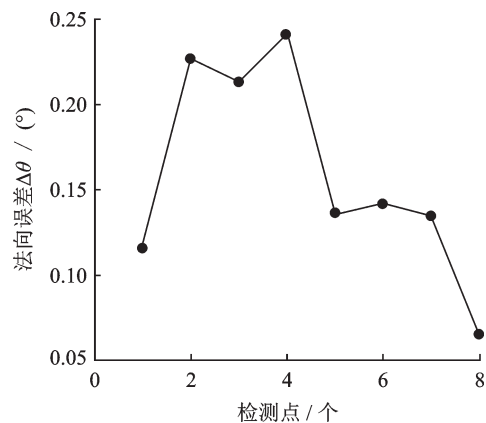


图11 测量点位姿误差

Fig.11 Orientation error of measurement points

表2 测量点位姿信息

Table 2 Results of measurement points

测量点	三坐标测量位姿( $P_m N_m$ )	多传感融合测量位姿( $P N$ )
1	(133.849, -177.388, 92.532, 0, 0.105, 0.995)	(133.803, -177.305, 92.607, 0.015, 0.117, 0.993)
2	(133.849, -113.642, 86.761, 0, 0.105, 0.995)	(133.852, -113.622, 86.610, 0.004, 0.12, 0.993)
3	(133.849, -49.896, 80.991, 0, 0.105, 0.995)	(133.861, -49.887, 80.151, 0.013, 0.115, 0.993)
4	(133.849, 13.85, 75.22, 0, 0.105, 0.995)	(133.85, 13.821, 75.244, 0.004, 0.11, 0.994)
5	(133.849, 90.333, 72.225, 0, 0, 1)	(133.762, 90.348, 72.337, 0.002, 0.01, 0.999)
6	(133.849, 154.333, 70.423, 0, 0, 1)	(133.793, 154.219, 70.504, 0.001, 0.004, 0.999)
7	(87.849, 194.333, 70, 0, 0, 1)	(87.812, 194.298, 70.096, 0.003, 0.007, 0.999)
8	(17.849, 190.333, 70, 0, 0, 1)	(17.828, 190.356, 70.163, 0.01, 0.005, 0.999)

## 4 结 论

本文提出了一种用于飞机壁板自动钻铆孔位位姿的在线测量方法。该方法通过建立视觉和激光测距传感器与钻铆机参考坐标系间的映射关系,给出了多传感器融合方法及孔位和姿态的在线测量原理。通过标定多传感融合测量系统在线测量精度可以达到孔位测量位置误差 $\leq 0.2$  mm,法向误差 $\leq 0.3^\circ$ 。基于多传感融合的在线测量方法,能够满足飞机钻铆孔位测量精度要求,从而保证飞机壁板的钻铆精度。

### 参考文献:

- [1] 陈修强,田卫军,薛红前.飞机数字化装配自动钻铆技术及其发展[J].航空制造技术,2016,59(5):52-56.  
CHEN Xiuqiang, TIAN Weijun, XUE Hongqian. Automatic drilling and riveting technology of aircraft digital assembly and its development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 52-56.
- [2] ZHANG Y L, BI Q Z, YU L, et al. Online adaptive measurement and adjustment for flexible part during high precision drilling process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 3579-3599.
- [3] JIANG L P, CHEN W L, WANG M, et al. Approach to interference aircraft automatic riveting process control of drilling and riveting[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(6): 609-614.
- [4] 沈建新,田威.基于工业机器人的飞机柔性装配技术[J].南京航空航天大学学报,2014,46(2):181-189.  
SHEN Jianxin, TIAN Wei. Aircraft flexible assembly technology based on industrial robots[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(2): 181-189.
- [5] FROMMKNECHT A, KUEHNLE J, EFFENBERGER I, et al. Multi-sensor measurement system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 47: 4-10.
- [6] 毕运波,涂国娇,方伟,等.环形轨自动化制孔系统孔位修正方法[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(10):1863-1869.  
BI Yunbo, TU Guojiao, FANG Wei, et al. Correcting method of hole position for flexible track automatic drilling system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(10): 1863-1869.
- [7] ZHU W D, MEI B, YAN G R, et al. Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(2): 160-171.
- [8] 蒋滔,方辉,董秀丽.飞机蒙皮铆接质量视觉检测系统的构建[J].航空制造技术,2017,60(6):88-91.  
JIANG Tao, FANG Hui, DONG Xiuli. Construction of visual inspection system for riveting quality of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 88-91.
- [9] 姜春英,牛祥鑫,张诚然,等.机器人航空铆接的视觉定位方法研究[J].航空制造技术,2018,61(4):55-59.  
JIANG Chunying, NIU Xiangxin, ZHANG Chengran, et al. Research on visual positioning method for robot aeronautical riveting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(4): 55-59.
- [10] 袁红璇.飞机结构件连接孔制造技术[J].航空制造技术,2007,50(1):96-99.  
YUAN Hongxuan. Manufacturing technology of connecting hole in aircraft structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(1): 96-99.
- [11] YU L, ZHANG Y L, BI Q Z, et al. Research on surface normal measurement and adjustment in aircraft assembly [J]. Precision Engineering, 2017, 50: 482-493.
- [12] YUAN P J, WANG Q S, SHI Z Y, et al. A micro-adjusting attitude mechanism for autonomous drilling robot end-effector[J]. Science China, 2014, 57: 1-12.
- [13] TIAN W, ZHOU W X, ZHOU W, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 495-500.
- [14] 公茂震,袁培江,王田苗,等.航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法[J].北京航空航天大学学报,2012,38(10):1400-1404.  
GONG Maozhen, YUAN Peijiang, WANG Tianmiao, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1400-1404.
- [15] 周平,翟建军,潘国威,等.一种基于旋量理论的自动钻铆机调姿反解算法[J].航空制造技术,2017,60(14):62-67.  
ZHOU Ping, ZHAI Jianjun, PAN Guowei, et al. An adjustment positive inverse solution algorithm of automatic drilling and riveting machine based on screw theory [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 62-67.