

数字化钻铆的曲面法向测量方法

Measurement Method for Evaluating Normal Direction of Surface for Digital Drilling and Riveting

中航工业北京航空制造工程研究所 杜兆才

[摘要] 在飞机壁板等复杂曲面的数字化钻铆过程中,为保证沿曲面微元的法向钻铆采用非接触式测量方法,利用多点激光测距的测量结果,计算被测部位的法向,调整安装在工业机器人或其他移动设备上的末端执行器的姿态,使钻铆装置沿被测部位的法向进给。采用平面拟合方法,确定基准平面方程。利用多个测距装置测量的到基准平面的距离,标定测距装置的安装位置、姿态参数。根据多个测距装置测得的到被测部位的距离,计算待钻铆部位的法向。算例表明该曲面法向测量方法正确,可应用于定位、调姿等飞机数字化制造及装配工作。

关键词: 数字化装配 法向测量 测距 拟合

[ABSTRACT] A method of noncontact laser distance measurement is applied for digital drilling and riveting of complex surface. By means of measurement results from locating devices, the normal direction of measured area is evaluated. The posture of end-effector fixed on the end of industrial robot is adjusted to feed along the evaluated normal direction. The datum plane for calibration is derived from plane fitting method. The position and posture of locating devices are calibrated on the basis of the distances between locating devices and datum plane. The normal direction of measured area is derived from the distances measured by locating devices. A numerical example illustrates the correctness of the proposed method. The method can be used for positioning and attitude-adjusting for digital manufacturing and assembly.

Keywords: Digital assembly Normal direction evaluation Distance measurement Fitting method

装配是飞机研制过程中的关键环节,装配工作量约占产品制造工作量的40%~50%。装配连接以钻铆为主,据不完全统计,钻铆工作量约占装配连接工作量的80%以上。目前,我国飞机装配中的钻铆工作还是以手工操作为主,手工制孔精度低、质量稳定性较差。制孔、铆接

的低质量和低效率已成为制约飞机装配质量的瓶颈环节。新一代飞机对连接精度、装配质量等提出了更高的要求,因此,迫切需要采用数字化钻铆技术^[1]。

对于采用机器人末端安装钻铆末端执行器在飞机壁板等复杂曲面上实现自动钻铆的工作方式,在制孔前,要求准确地测量待加工孔的位置和方向,否则,无法达到制孔要求。在自动铆接前,也要准确地掌握孔位和孔径信息,否则,无法顺利安装铆钉和铆接,复杂曲面的法向测量精度已成为实现自动钻铆等数字化装配工作的关键问题^[2]。国外已借助多种光学测量设备,提高了机器人定位精度和孔位识别精度,从而保证钻铆孔位精度^[3-5]。我国在测控技术等方面的经验和技术水平都落后于国外,如不妥善解决复杂曲面的法向测量精度,就无法精确地调整钻铆位姿,也就无法实现高质量的制孔和铆接。

从理论上讲,制孔时可以根据理论数学模型获得制孔部位的法向信息,由于部件的加工误差、装配误差、变形等因素,往往导致制孔部位的实际外形与理论外形有一定的偏差,如果仍然按照理论数学模型确定制孔部位的法向,会导致制孔质量缺陷^[6]。在实际工作中,直接测量复杂曲面的法向比较困难,因此,通常采用间接测量的方法来确定制孔部位的法向。目前,有的研究者采用3个位移传感器,通过3个位移传感器测量值来判定法向^[7]。也有的研究者采用4个安装高度一致的测距仪,利用其中的3个测量值来判定法向^[8]。上述方法对测量仪器提出了安装高度相等或平行等安装要求,由于测距仪、位移传感器等测量仪器自身往往缺乏定位基准,在实际应用中,很难保证精确、可靠的定位,因此,需要采用一种不以测量仪器安装位置和姿态为前提条件的法向测量方法。本文提出一种利用多个激光测距仪的测量值来判定复杂曲面法向的方法。

1 激光测距仪的标定

非接触式测量精度高,不受被测部位材质、结构的影响,不损伤被测部件,适用于飞机蒙皮等复杂曲面的

测量,应用范围比较广。激光测距仪是一种常用的非接触式测量仪器,它采用集成的激光测距模块进行测量,由激光测距模块发出激光束照射被测部位表面,通过接

收反射的激光,测算距离,根据多个激光测距仪测得的距离值确定被测部位的多个点,由多个点确定被测部位的法向。测量原理如图1所示。

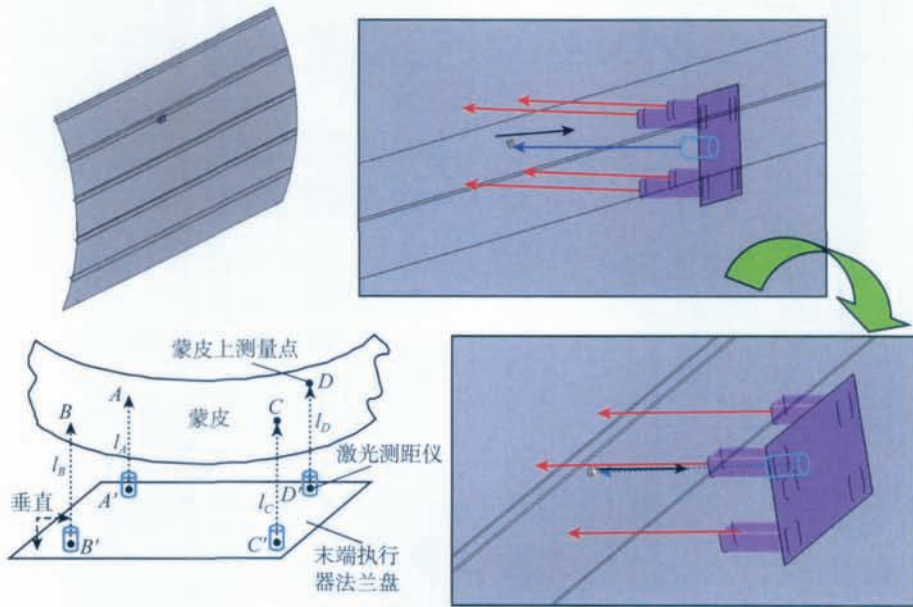


图1 多个激光测距仪的测量原理

Fig.1 Measurement principle of multi laser distance measurement meter

由于激光测距仪通常仅通过螺钉与设备连接,缺少精确定位措施,激光测距仪的安装位置和姿态的精度难以保证。无法可靠地判定激光束的零点位置和射出方向与理论数学模型一致。如果测量仪器本身的测量基准不明确,由测量值推算出的被测部位的位置、姿态值的误差很可能超出预定的要求。因此,必须首先标定激光测距仪的安装位置和姿态。

1.1 构造用于标定的基准平面

为了标定激光测距仪,必须首先构造一个作为标定基准的平面。采用特征值法建立基准平面。

假设平面方程为:

$$ax + by + cz = d \quad (1)$$

式中, a 、 b 和 c 分别为平面单位法向量的3个分量,即满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, d 为坐标原点至平面的距离, $d \geq 0$ 。

假设测量了平面上 n 个点的坐标值 $\{(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$, 点 i 到公式(1)表达的平面的距离 d_i 为:

$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d| \quad (2)$$

为了提高基准平面的精度,期望获得最佳拟合平面,则应在 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 的前提下,使下列函数值最小:

$$F(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d)^2 \quad (3)$$

利用 Lagrangian 乘法,构造如下函数求极值:

$$f(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n d_i^2 - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1) \quad (4)$$

将式(4)中的 $f(a, b, c, d)$ 对 d 求偏导数,并令导数为0:

$$\frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial d} = -2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0 \quad (5)$$

整理式(5),得到:

$$d = a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} + b \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} + c \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (6)$$

因此,式(2)可改写为:

$$d_i = \left| a \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right) + b \left(y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) + c \left(z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right) \right| \quad (7)$$

设 $\Delta x_i = x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, $\Delta y_i = y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$, $\Delta z_i = z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$, 则式(7)可简写为:

$$d_i = |a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i| \quad (8)$$

分别求式(4)中的 $f(a, b, c, d)$ 对 a 、 b 和 c 的偏导数,并令各个偏导数均等于0,得

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta x_i - 2\lambda a = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta y_i - 2\lambda b = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta z_i - 2\lambda c = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式(9)构成了特征值方程组,可表示为:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可知,求解系数 a 、 b 和 c 的问题已转化为矩阵特征值和特征向量的求解问题。为了便于表达,令:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix};$$

$$X = \{a \ b \ c\}^T。$$

则式(10)可表示为:

$$AX = \lambda X。 \quad (11)$$

矩阵 A 是一个 3×3 的实对称矩阵,特征值为:

$$\lambda = \frac{(AX \cdot X)}{(X \cdot X)}, \quad (12)$$

式中, (\cdot) 表示括号内两个向量的点乘。

由于系数 a 、 b 和 c 满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 的前提条件,可知 $(X \cdot X) = 1$,则可求出:

$$\lambda = \frac{(AX \cdot X)}{(X \cdot X)} = \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2。 \quad (13)$$

因此, $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 的最小值即为矩阵 A 的最小特征值,最小特征值对应的特征向量的各个分量即为系数 a 、 b 和 c 。

矩阵 A 的特征值可利用式(14)求出:

$$|A - \lambda I| = 0, \quad (14)$$

矩阵 A 为 3×3 的实对称矩阵,因此, A 最多只有 3 个实数特征值,设 λ_{\min} 是最小的特征值,求解相应的齐次线性方程组:

$$(A - \lambda_{\min} I)X = 0。 \quad (15)$$

得到的非零解即为 λ_{\min} 对应的特征向量,各个分量即为平面方程的参数 a 、 b 和 c 。

在测量过程中,环境的干扰、人员的不当操作以及测量仪器性能的不稳定都可能导致测量数据中出现异常点,如果直接利用所有的数据点拟合平面,求出的参

数 a 、 b 、 c 和 d 不能反映真实的平面,因此,必须首先去除异常点^[9],具体做法如下:

(1)利用参数 a 、 b 、 c 的值,根据公式(8)计算出每个点至拟合平面的距离 d_i 。

(2)利用公式(16)计算 d_i 的标准偏差 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^T (d_i - \bar{d})}{n - 1}}, \quad (16)$$

式中, $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$ 。

(3)如果 d_i 的值超过了标准偏差的 2 倍,则可认为该点是异常点,剔除。

(4)利用剔除了异常点后的所有点的数据重新计算参数 a 、 b 、 c 的值。

(5)重复 1~4 步,直到余下的所有点的 d_i 值都小于 2 倍的标准偏差时为止。

(6)利用剔除了异常点后计算出的参数 a 、 b 、 c 的值得到平面方程。

1.2 标定方法

由于安装条件的限制,激光测距仪的安装位置和方向不可避免地存在偏差,即激光束的零点和方向与理论数值不同,因此,需要根据实测数据推算激光束的零点和方向。为了便于工程应用,采用自标定方法,推算激光束的零点和方向。

假设第 i 个激光测距仪的激光束零点 P_i 坐标为 (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) ,激光束的方向矢量为 (m_{pi}, n_{pi}, q_{pi}) ,因此,可建立激光束直线的对称式方程:

$$\frac{x - x_{pi}}{m_{pi}} = \frac{y - y_{pi}}{n_{pi}} = \frac{z - z_{pi}}{q_{pi}}, \quad (17)$$

将式(17)与剔除了异常点后的平面方程(1)联立,可求出激光束直线与实测平面的交点 Q_i 的坐标值 (x_{qi}, y_{qi}, z_{qi}) 为:

$$\begin{cases} x_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + x_{pi} \\ x_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + x_{pi} \\ x_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + x_{pi} \end{cases}。 \quad (18)$$

激光束的零点 P_i 到终点 Q_i 的距离为 L_i ,则有

$$L_i = \|P_i Q_i\| = \sqrt{(x_{pi} - x_{qi})^2 + (y_{pi} - y_{qi})^2 + (z_{pi} - z_{qi})^2}, \quad (19)$$

L_i 即为激光测距仪的实测数值,由式(18)、(19)可知, L_i 中共包含 6 个未知数 x_{pi} 、 y_{pi} 、 z_{pi} 、 m_{pi} 、 n_{pi} 、 q_{pi} ,这说明当平面确定后,激光测距仪测出的距离仅取决于激光束的零点和激光束的方向。

为了求解 6 个未知数 $x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}, m_{pi}, n_{pi}, q_{pi}$, 可通过变换基准平面的位置和方向的方式, 利用 6 个不同的基准平面获得 6 个不同的 L_i 值, 将 6 个 L_i 的表达式联立, 即可求解。

1.3 求解

采用 Newton 迭代法通过将非线性问题线性化的方法求解由式 (18)、(19) 联立得到的方程组。将方程组写成如下形式

$$F_j(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}, m_{pi}, n_{pi}, q_{pi}) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad (20)$$

设已知方程组 (20) 的一组初始近似值为 $(x_{pi0}, y_{pi0}, z_{pi0}, m_{pi0}, n_{pi0}, q_{pi0})$, 把 $F_j(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}, m_{pi}, n_{pi}, q_{pi})$ 都在 $(x_{pi0}, y_{pi0}, z_{pi0}, m_{pi0}, n_{pi0}, q_{pi0})$ 附近用 TAYLOR 级数展开, 并取其线性部分, 得到方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F_j}{\partial x_{pi}}(x_{pi} - x_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial y_{pi}}(y_{pi} - y_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial z_{pi}}(z_{pi} - z_{pi0}) + \\ & \frac{\partial F_j}{\partial m_{pi}}(m_{pi} - m_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial n_{pi}}(n_{pi} - n_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial q_{pi}}(q_{pi} - q_{pi0}) = \\ & -F_j(x_{pi0}, y_{pi0}, z_{pi0}, m_{pi0}, n_{pi0}, q_{pi0}) \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (21) \end{aligned}$$

判断由式 (21) 构造的方程组的系数矩阵, 如果系数矩阵的行列式不等于 0, 则可利用 Newton 迭代法的迭代序列求解。

2 法向测量

当测量范围较小时, 可以近似地认为复杂曲面的被测部位是一个平面。标定了激光测距仪的激光束起点和方向后, 根据 n ($n \geq 3$) 个激光测距仪的长度值, 通过方程组 (18), 得到被测部位平面上的 n 个点, 利用 n 个点的可以采用拟合的办法构造被测部位的平面方程, 平面方程的法向即为待求的法向。为了提高拟合精度, 可采取上文中提到的剔除异常点的方法排除因环境的干扰、人员的不当操作以及测量仪器性能的不稳定等因素产生的不良影响。但需要注意的是, 应全面分析, 判断产生异常点的原因, 并判断该因素是否也影响了其他测距仪的测量数据的准确性。

3 算例

采用 4 个激光测距仪测量曲面的法向。从理论上讲, 布置的 4 个测距仪的激光束零点距离理论基准平面 $0.545x + 0.446y + 0.710z = 2.645$ 的距离应相等, 4 个测距仪的激光束应平行。但由于存在安装误差, 4 号测距仪的激光束零点到基准平面的距离比其他 3 个测距仪的距离短 0.1mm, 3 号测距仪的激光束与其他 3 个测距仪的激光束不平行, 有 0.5° 夹角。根据基准平面, 标定了 4 个激光测距仪的激光束的零点和方向, 如表 1 所示。

根据 4 个测距仪的测量结果, 得出被测平面的法

表1 激光测距仪的激光束的零点和方向的标定值

项目	零点位置			方向		
	x_{pi}	y_{pi}	z_{pi}	m_{pi}	n_{pi}	q_{pi}
1号激光测距仪	40.45	47.89	-9.61	0.582	0.463	0.669
2号激光测距仪	-41.36	46.39	54.13	0.582	0.463	0.669
3号激光测距仪	42.38	-45.26	47.42	0.589	0.459	0.665
4号激光测距仪	-46.34	-49.24	117.88	0.582	0.463	0.669

向为 $\{0.545 \ 0.446 \ 0.710\}^T$, 在保留三位有效数字的情况下, 与理论上的法向方向一致。如果不标定激光测距仪的激光束零点和方向, 采用理论数值计算, 那么得到的平面法向为 $\{0.555 \ 0.453 \ 0.698\}^T$, 与实际的法向夹角为 1° , 如果沿着该方向钻铆, 就会导致钻铆缺陷, 无法满足通常的技术要求。由此可见, 标定测距仪的激光束零点位置和方向是非常必要的, 也说明本文提出的方法可以排除安装误差的影响, 得出合理的结果。

4 结论

本文提出了不借助外部测量仪器的自标定方法, 标定了激光测距仪的零点和姿态, 并综合利用多个激光测距仪提供的冗余信息, 排除异常点的影响, 提高了测量精度。算例表明, 基于多个激光测距仪的飞机数字化钻铆的法向测量方法简单、可行, 可获得较高的法向测量精度, 可用于飞机复杂曲面数字化钻铆的法向测量。

参考文献

- [1] 刘善国. 先进飞机装配技术及其发展. 航空制造技术, 2006 (10): 38-41.
- [2] 王黎明, 冯潼能. 数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用. 航空制造技术, 2008 (11): 42-45.
- [3] Devlieg R, Sitton K, Feikert E. ONCE (ONE-sided Cell End effector) Robotic Drilling System// 2002 Society of Automotive Engineers, 2002 (01): 2626.
- [4] Hogan S, Hartmann J, Thayer B. Automated Wing Drilling System for the A380-GRAWDE// 2003 Society of Automotive Engineers, 2003-01-2940
- [5] Truess J A, Assadi M D, Hartmann J L, et al. Flexible High Speed Riveting Machine// 2003 Society of Automotive Engineers, 2003(01): 2948.
- [6] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于 POGO 柱三点支撑的飞机大部件调姿方法. 航空学报, 2009, 30 (7): 1319-1324.
- [7] 薛汉杰, 张敬佩. 蒙皮类部件钻孔法向的测量和调整. 航空制造技术, 2010 (23): 60-62.
- [8] 邹冀华, 周万勇, 韩先国. 飞机装配中基于 3-RPS 的并联机构法向调整算法. 中国机械工程, 2011, 22 (5): 557-560.
- [9] 官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36 (7): 981-984.

(责编 小城)