航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法

公茂震 袁培江 王田苗 张 睿

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对飞机蒙皮的机器人制孔中铆接孔的垂直度问题,提出了一种曲面法线测量的新方法,然后对钻头的姿态进行调整,保证钻头沿钻孔点的法线方向钻孔. 该方法首先利用 3 个激光测距传感器测量出钻孔点周围 3 个特征点的坐标,然后求出已知的钻孔点处的切向量,通过叉积原理计算出钻孔点的法向量及其与钻头中心轴线的夹角,并将它们反馈到控制系统,最后控制系统利用定角度的二元角度调节法调节钻头的角度使其与钻孔点的法线重合. 在航空制孔机器人平台上的实验及结果证明了这种钻头垂直度调节的高精度和高效性.

关 键 词: 曲面法线测量; 垂直度调节; 二元角度调节; 激光测距传感器; 航空制孔机器人

中图分类号: TP 242.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1400-05

Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot

Gong Maozhen Yuan Peijiang Wang Tianmiao Zhang Rui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the requirement of robotic drilling for aircraft fuselage, a novel verticality adjustment method of drill bit in aeronautical drilling robot system was proposed, which is composed of surface-normal measurement and adjustment of drill bit's attitude. Three laser range sensors were used in surface-normal measurement to measure the distances between sensors and three measurement positions around the drilling point. Thus the normal vector can be calculated from the cross product of any two vectors that are tangent to the surface at the drilling point. Meanwhile, the angle between normal vector and drill bit was obtained, which was fed back to the control system. Finally, the attitude of drill bit was adjusted using the binary angular adjustment mechanism (BAAM) to correct drill bit in line with the normal vector, which ensures to drill along the normal direction of drilling point. The high-accuracy, high-efficiency and practicability of the verticality adjustment method were tested by the experiments conducted on the aeronautical drilling robot, which meet the requirements of the auto-drilling for aircraft manufacturing.

Key words: surface-normal measurement; verticality adjustment; binary angular adjustment mechanism (BAAM); laser range sensor; aeronautical drilling robot

据统计,大多数飞机机体疲劳失效事故源于结构连接部位的疲劳裂纹,而疲劳裂纹大多产生在连接孔处[1],因此连接处孔的加工质量极大影响着飞机的安全性和使用寿命. 孔的垂直度是影响孔的加工质量的主要因素之一,它不仅会使孔的直径发生改变[2],而且在飞机的装配过程中会影响铆接质量从而导致机构连接的不稳定[3-4]. 在机器人自动钻孔过程中,孔的垂直度取决于钻

收稿日期: 2011-10-12; **网络出版时间**: 2012-09-26 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120926.1104.008.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61075084)

作者简介: 公茂震(1986-),男,山东临沂人,硕士生,gongmaozhen1986@gmail.com.

头的中心轴线和钻孔点处法线的重合程度,所以钻头的垂直度调节对保证钻孔的加工质量起着至关重要的作用.

钻头的垂直度调节主要由 2 部分组成:曲面的法线测量和钻头的姿态调整. 目前,设备很难靠自身控制使钻头沿钻孔点的法线方向钻孔[5],需要利用法线测量与末端调姿装置来调整钻头的姿态. 对于曲面的法线测量,近些年来国内外已有大量的研究. 向量叉积法[6]虽然计算简单,但是精度低;二次曲面拟合法[7]对二次曲面精度很高,但对一般的曲面具有一定的局限性; NURBS 曲线法[8]和三角网格法[9]都要测量大量的点才能达到较高的精度,不适合实时的精确测量. 本文针对以上出现的问题提出了一种基于 3 个激光测距传感器的非接触法线测量方法,此方法测量精度高,速度快,且不会损伤被测物体表面. 对于钻头的姿态调整,大多数研究工作从调整被加工工件来相对的调节钻头的姿态,比如三点快速调平算法[10]和最近发明的一种带角度自动调节装置的钻孔设备[11]. 但对于像飞机蒙皮这样大型的不易移动的工件,这些方法就难以实现其垂直度的调节. 本文从调节钻头实体的角度出发提出了一种二元角度调节方法,它可以精确容易的实现钻头定角度的姿态调整.

最后,在自行研制的航空制孔机器人平台上进行实验,实验证明了法线测量的高精度和高效性及钻头姿态调整的准确性和有效性.

1　垂直度调节方法设计

航空制孔机器人系统的钻孔过程由 4 部分组成:视觉定位、法线测量、钻头姿态调整和判断钻孔. 其中法线测量和钻头姿态调整称为钻头的垂直度调节,是机器人制孔的关键技术和难点.

在钻孔前首先需要视觉系统识别并定位被标记的钻孔点 P. 然后机器人的末端执行器移动至 P 处,利用 3 个激光测距传感器测量并计算 P 处的单位法向量 $\boldsymbol{e}_N$. 再判断 $\boldsymbol{e}_N$ 和钻头的轴线 κ 的夹角 φ 是否在偏差范围内:若 φ 在偏差范围内则锁定钻头直接进行钻孔;若 φ 不在偏差范围内则利用二元角度调节方法对钻头的姿态进行调整,使钻头最大程度的沿 P 点的法线方向钻孔,保证钻孔的加工质量.

假设偏差范围为 ±0.5°,激光测距传感器测量的 3 个特征点为 $V_i(i=1,2,3)$,钻孔过程的详细流程图如图 1 所示.

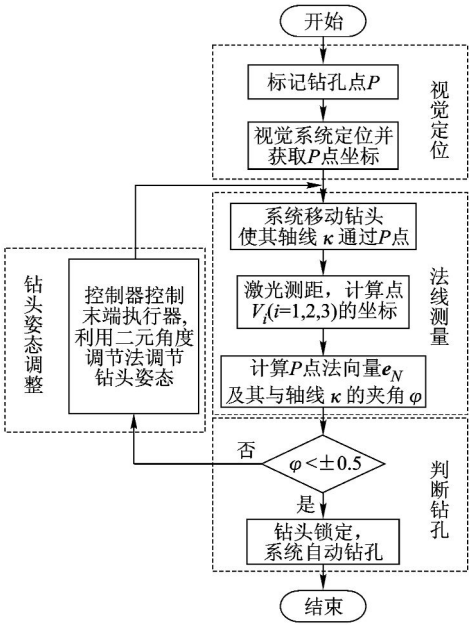


图 1　钻孔过程的流程图

2　曲面法线测量

2.1　系统建模与坐标计算

本文中的 3 个激光测距传感器的发射点 M_i $(i=1,2,3)$ 均匀的分布在钻头同心的圆周 E 上,并且此 3 个发射点在同一个平面 π_1 上,如图 2 所示. 钻头所在的中心轴线 κ 与平面 π_1 垂直,且与平面 π_1 的交点为点 O. 以点 O 为原点建立笛卡儿坐标系 $Oxyz$,其中 x 轴通过点 M_1,y 轴平行于 M_2M_3,z 轴沿钻头的中心轴线 κ 方向.

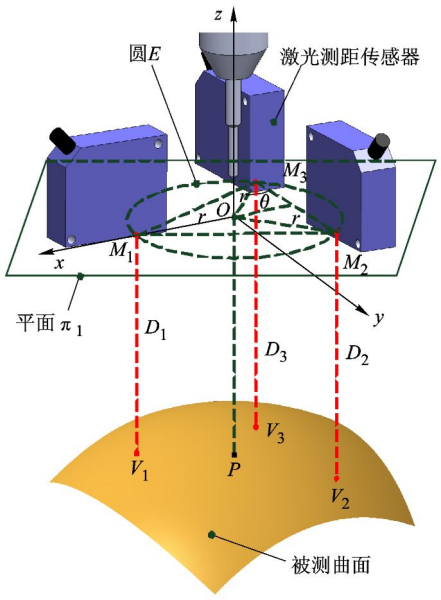


图 2　曲面法线测量示意图

在测量过程中 3 个激光测距传感器可测得点 $M_i(i=1,2,3)$ 与相对应的 3 个特征点 $V_i(i=1,2,3)$ 之间的距离 $D_i(i=1,2,3)$,所以点 $V_i(i=1,2,$

3)的 z 坐标可以表示为

$$\left.\begin{aligned} z_{V_1} &= -D_1 \\ z_{V_2} &= -D_2 \\ z_{V_3} &= -D_3 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

若圆 E 的半径为 R,根据等边三角形的几何性质可得 3 个特征点 $V_i(i=1,2,3)$ 的 x 和 y 坐标:

$$\left.\begin{aligned} x_{V_1} &= r \\ x_{V_2} &= -r\sin\theta \\ x_{V_3} &= -r\sin\theta \\ y_{V_1} &= 0 \\ y_{V_2} &= r\cos\theta \\ y_{V_3} &= -r\cos\theta \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

由于 $\triangle M_1M_2M_3$ 是等边三角形,所以式(2)中的 $\theta=30°$,根据式(1)和式(2)可得特征点 $V_i(i=1,2,3)$ 的坐标为 $V_1(r,0,-D_1)$,$Q_2\left(-\frac{1}{2}r,\frac{\sqrt{3}}{2}r,-D_2\right)$,$Q_3\left(-\frac{1}{2}r,-\frac{\sqrt{3}}{2}r,-D_3\right)$.

2.2 法向量计算

在坐标系 $Oxyz$ 中,假设 P 点的坐标为 (x_P,y_P,z_P). 由于点 $V_i(i=1,2,3)$ 和 P 是曲面上的 4 个点,所以此 4 点不共面,因此 P 点和 $V_i(i=1,2,3)$ 中任意 2 点都能确定 1 个平面,以点 P,V_1,V_2 为例,此 3 点确定唯一的平面 π_2,如图 3 所示.

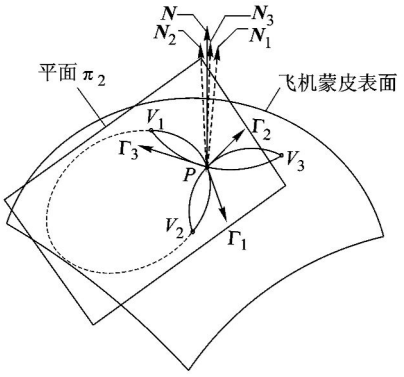


图 3 法向量的计算示意图

平面 π_2 与曲面的交线是一条曲线 V_1PV_2,以同样的方法可以得到另外 2 条交线:曲线 V_2PV_3 和曲线 V_3PV_1. 显然,曲线 V_1PV_2 在平面 π_2 上,因此由 P,V_1,V_2 3 点可求出平面 π_2 的一般式方程:

$$F(x,y,z) = Ax + By + Cz + D = 0 \tag{3}$$

平面 π_2 和被测曲面的交线近似为一椭圆,因此在平面 π_2 上可以找一个合适的点 $Q(x_Q,y_Q,z_Q)$ 作为一个椭球体的中心,P,V_1,V_2 3 点可以确定唯一的椭球体. 椭球体的解析式可表示为

$$H(x,y,z) = \frac{(x-x_Q)^2}{a^2} + \frac{(y-y_Q)^2}{b^2} + \frac{(z-z_Q)^2}{c^2} = 0 \tag{4}$$

然后用平面 π_2 和椭球的交线 Σ 来近似的代替交线 Q_1PQ_2. 交线 Σ 可由式(3)和式(4)表示为

$$\left.\begin{aligned} F(x,y,z) &= 0 \\ H(x,y,z) &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

对式(5)利用雅可比行列式可求得曲线 Σ 在点 P 处的切线为

$$\boldsymbol{\Gamma}_1 = \left(\left|\begin{matrix} F_y & F_z \\ H_y & H_z \end{matrix}\right|_P, \left|\begin{matrix} F_z & F_x \\ H_z & H_x \end{matrix}\right|_P, \left|\begin{matrix} F_x & F_y \\ H_x & H_y \end{matrix}\right|_P\right)$$

同理,可求得曲线 V_2PV_3 和 V_3PV_1 的近似切向量 $\boldsymbol{\Gamma}_2$ 和 $\boldsymbol{\Gamma}_3$,过曲面上一点且在曲面上的任意曲线在该点处的切向量都与曲面在此点处的法向量垂直[12],因此由叉积可得 P 处的 3 个法向量:

$$\boldsymbol{N}_1 = \boldsymbol{\Gamma}_1 \times \boldsymbol{\Gamma}_2, \boldsymbol{N}_2 = \boldsymbol{\Gamma}_2 \times \boldsymbol{\Gamma}_3, \boldsymbol{N}_3 = \boldsymbol{\Gamma}_3 \times \boldsymbol{\Gamma}_1$$

由于曲面上的 3 个点确定的平面 π_2 与曲面的交线是用逼近的解析式来近似代替的,所以求得的法向量也存在一定的误差. 要使计算出的法向量更准确就需要求此 3 个向量的平均值,而加权求法向量的平均值更接近理论值[13]. 本文采用角度加权平均法[14]可得加权平均后点 P 处曲面法向量 $\boldsymbol{N}$ 的单位法向量:

$$\boldsymbol{e}_N = \frac{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} w_i \boldsymbol{N}_i}{\left\| \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} w_i \boldsymbol{N}_i \right\|} \tag{6}$$

式(6)中的 $i=1,2,3$,w_i 是权因子,角度加权平均法的权因子如式(7)所示:

$$w_i = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{PV_i}\cdot\overrightarrow{PV_{i+1}}}{\|\overrightarrow{PV_i}\|\cdot\|\overrightarrow{PV_{i+1}}\|}\right) \tag{7}$$

需要说明的是当 $i=3$ 时,令 $i+1=1$,即 w_3 对应的是向量 $\overrightarrow{PV_3}$ 和 $\overrightarrow{PV_1}$ 所成的角 $\angle V_1PV_3$.

3 钻头姿态调整

图 4 所示为定角度二元调整装置,其上下为 2 个固定台,中间为 2 个相同的楔形旋转台. 调整时,2 个旋转台旋转可以使钻孔末端执行器的钻头围绕固定中心线实现三维空间运动,即实现一个圆锥运动. 若 2 个旋转台向适当的方向旋转适当的角度,便可以实现定角度的调节. 定角度二元调整方法可大幅度的降低系统复杂程度,减小系统重量和体积.

二元角度调整机构可带动钻削机构作约 4°的角度偏转. 如图 5a 和图 5b 所示,2 个楔形旋转台的倾角为 α,当它们处于图 5a 状态时,旋转台 1 固定,旋转台 2 沿顺时针方向绕斜面的中心轴线

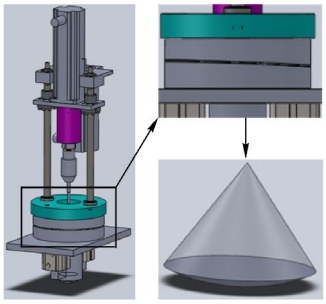
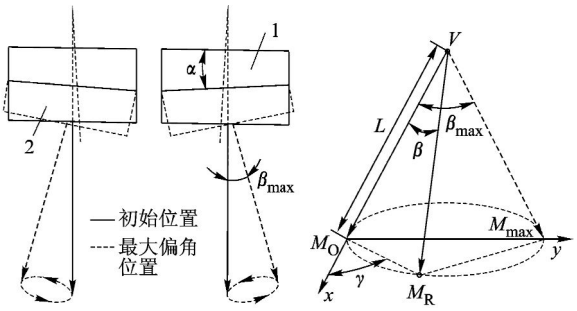


图 4　二元角度调节

转动,此时钻头也沿顺时针做圆锥摆动,当旋转台 2 达到极限位置时钻头达到最大的摆动角度 φ_{max},根据几何性质可得到 α 与 φ_{max} 的关系:

$$\varphi_{max} = 2\alpha \tag{8}$$

再同时转动旋转台 1 和 2 使其到图 5b 所示状态,同样旋转台 1 固定,旋转台 2 沿顺时针方向绕斜面的中心轴线转动,此时钻头将会在初始位置的另一侧沿顺时针做圆锥摆动. 这样只要适当的转动 2 个旋转台便可以实现钻头达到其周围 4°以内的任何区域,从而实现法向角度调整. 由于此机构利用步进电机通过齿轮传动使装置转动,因此可以对钻头进行实时精确地定角度调整.



a　左半侧钻头运动轨迹　b　右半侧钻头运动轨迹　c　二元角度调节的几何关系

图 5　钻头的二元角度调节过程

要使钻头调整到与第 2 节计算出的法向量重合,需要求出钻头与法向量的夹角 φ 和法向量绕 z 轴在 xOy 平面上转过的角度 β. 假设曲面在钻孔点 P 处的单位法向量为 $\boldsymbol{e}_N = (x_e, y_e, z_e)$,而钻头的方向向量为 $\boldsymbol{e}_z$,于是可以得到

$$\varphi = \arccos(\boldsymbol{e}_N \cdot \boldsymbol{e}_z) \tag{9}$$

$$\beta = \arccos \frac{(1,0,0) \cdot (x_e, y_e, 0)}{\| (x_e, y_e, 0) \|} \tag{10}$$

如图 5c 所示,M_O 为钻头的初始位置,M_R 为钻头调整后所在的位置,VM_O 与 VM_R 之间的夹角即为钻头与法向量的夹角 φ. 角度 γ 是钻头由 M_O 处调整到 M_R 处时旋转台 2 旋转的角度,假设 $|VM_O| = L$,在 $\Delta M_O M_R M_{max}$ 中根据几何性质可得

$$2L\sin\frac{\beta}{2} = 2L\sin\frac{\varphi_{max}}{2}\sin\gamma \tag{11}$$

将式(9)代入式(11)中解得

$$\gamma = \arcsin\frac{\sin\frac{\beta}{2}}{\sin\alpha} \tag{12}$$

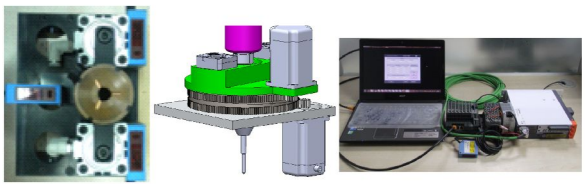
钻头的调节过程为旋转台 1 和 2 同时从初始位置顺时针绕中心轴旋转$(\beta - \gamma)$,旋转台 1 固定,旋转台 2 顺时针转动 γ 即可完成钻头姿态的调整.

4　实　验

本实验以自行研制的航空制孔机器人为实验平台,如图 6a 所示. 激光测距传感器采用德国 SICK 公司的小型测距传感器,其测量精度为 ±100 μm,测量范围为 65 mm ~ 105 mm.



a　实验平台



b　激光测距传感器　c　二元调整机构　d　控制系统

图 6　航空制孔机器人系统

航空制孔机器人系统的控制系统采用奥地利 B&R 公司的实时控制系统,如图 6d 所示. 在 Automation Studio(AS)编程环境下进行编程,其数据处理精度为 ±5 μm,实时的刷新时间为 10 ms.

3 个激光测距传感器均匀的分布在钻头的周围,如图 6b 所示,其 3 个激光发射点等边的位于同一个圆上,此圆的实际半径为 $R = 57.5$ mm. d_i $(i = 1,2,3)$ 表示激光测距传感器测得激光发射点与 3 个特征点的距离,故可得 3 个特征点的坐标. 在飞机蒙皮上选择 3 个不同的点进行法线的测量,实验数据如表 1 所示. 在二元角度调节装置部分,如图 6c 所示,2 个旋转台由 2 个步进电机通过齿轮传动带动其旋转,步进电机的步距角为 0.18(°)/步,齿轮的传动比为 1∶3,因此控制系统每发一个脉冲旋转台旋转 0.06°,其最终调节精度可达 0.08°. 在钻头调整时,3 个激光测距传感器测得 3 个距离,经控制器 AI 模块和控制器

X20,由以太网通信将数据传输到 AS 中. 数据在 AS 中进行处理,计算出P点的单位法向量 $\boldsymbol{e}_N$ 和 $\boldsymbol{e}_N$ 与钻头的夹角 φ 和角度 β,再将其换算为 2 个电机需要的脉冲数控制 2 个旋转台进行精确的旋转,达到调整钻头垂直度的目的.

图 7 所示为钻头垂直度调整前后系统钻孔的质量,并对调整后的孔利用内径千分尺从 0°开始每隔 30°测一次直径,计算孔的圆度. 通过对比和对孔圆度的分析发现孔的质量明显得到提高,这证明了此算法的可行性和精确性.

表 1 法向量测量数据

序号	$D_i(i=1,2,3)$/mm			P 点坐标/mm	$\boldsymbol{e}_N$/mm	φ/(°)
	$\|\overrightarrow{M_1V_1}\|$	$\|\overrightarrow{M_2V_2}\|$	$\|\overrightarrow{M_3V_3}\|$			
1	86.620316	88.276314	86.876663	(0, 0, −87.257762)	(−0.011084, 0.014051, 0.999840)	1.025482
2	85.937201	86.472896	87.028465	(0, 0, −86.479521)	(−0.009431, −0.005578, 0.999940)	0.627813
3	86.372544	87.872910	87.235619	(0, 0, −87.160358)	(−0.013700, 0.006398, 0.999886)	0.866346

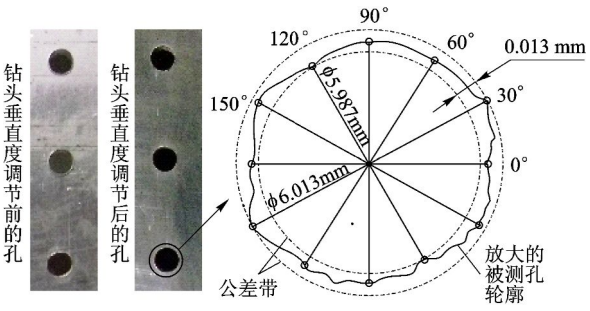


图 7 钻头垂直度调整前后钻孔对比

5 结 论

1) 基于 3 个激光测距传感器的曲面法线测量方法建模简单,测量过程中 3 个激光测距传感器同时测距,数据的反馈和处理时间短,提高了钻孔的效率;法向量计算算法精确度高,保证了航空制孔的质量.

2) 二自由度角度调节法用一套运动机构实现两轴运动,不仅减小了运动机构的体积,而且可以使钻孔部件按照设定角度整体偏转;它将阶梯状传统两轴插补运行轨迹转变为纯粹的二点连线的极坐标定位,从而路径最短且平滑,提高了调整的速度和精确度.

参考文献 (References)

[1] Bakuckas J G, Bigelow C A, Tan P W. Characterization of fatigue behaviour of aircraft fuselage structure[C]//Proceedings of the 22nd Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Lucern, Switzerland: EMAS, 2003: 5 – 9

[2] Wang Min, Xue Shaoding, Jiang Hongyu, et al. Development of knowledge-based system on aircraft assembly drilling process [C]//IEEE International Conference on Information Science and Engineering (ICISE). Hangzhou: IEEE, 2010: 1 – 4

[3] Proppe C. Probabilistic analysis of multi-site damage in aircraft fuselages[J]. Computational Mechanics, 2003, 30(4): 323 – 329

[4] Lutters W G, Ackerman M S. Achieving safety: a field study of boundary objects in aircraft technical support[C]//Proceedings of ACM conference on Computer Supported Cooperative Work. New York: ACM, 2002: 266 – 275

[5] Devlieg R, Szallay T. Applied accurate robotic drilling for aircraft fuselage[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 180 – 186

[6] Hasegawa N, Okada T, Shimizu T. Measurement of surface-normal using a range sensor with a pair of wedge-prisms[C]//IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology (IMTC). Ottawa, Canada: IEEE, 2005, 1744 – 1749

[7] 应高明,王仲奇,康永刚,等. 飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究[J]. 机床与液压,2010,38(20):1 – 4
Ying Gaoming, Wang Zhongqi, Kang Yonggang, et al. Study on normal vector measurement method in auto-drilling and riveting of aircraft panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(20): 1 – 4 (in Chinese)

[8] 蔺小军,王增强,单晨伟. 自由曲面 CMM 测量测头半径补偿方法[J]. 航空制造技术,2011(10):75 – 77,85
Lin Xiaojun, Wang Zengqiang, Shan Chenwei. Method of probe radius compensation for free surface measurement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(10): 75 – 77, 85 (in Chinese)

[9] Page D L, Sun Y, Koschan A F, et al. . Normal vector voting: crease detection and curvature estimation on large, noisy meshes [J]. Graphical Models, 2002, 64: 199 – 229

[10] 秦现生,汪文旦,楼阿莉,等. 大型壁板数控钻铆的三点快速调平算法[J]. 航空学报,2007,28(6):1455 – 1460
Qin Xiansheng, Wang Wendan, Lou Ali, et al. Three-point bracket regulation algorithm for drilling and riveting of aerofoil [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1455 – 1460 (in Chinese)

[11] 夏长洪. 一种带角度自动调节装置的钻孔设备:中国,201833210U[P]. 2011-5-18
Xia Changhong. A drilling equipment with automatic angle adjustment: China, 201833210U[P]. 2011-5-18 (in Chinese)

[12] Gerald F. Curves and surface for CAGD: a practical guide[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002: 261 – 263

[13] Jin Shuangshuang, Lewis R, West D. A comparison of algorithms for vertex normal computation[J]. The Visual Computer, 2005, 21(1/2): 71 – 82

[14] Klasing K, Althoff D, Wollherr D, et al. Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Kobe: IEEE, 2009: 3206 – 3211

(编 辑:文丽芳)