

引用格式: WANG Hongping, LIU Xin, ZHAO Shichen, et al. Quality Inspection of Hole Parameters of Aircraft Surface Based on Incomplete Point Cloud Data[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12):1212006

王红平,刘鑫,赵世辰,等. 基于缺失点云的飞机表面镗孔质量检测[J].光子学报,2022,51(12):1212006

基于缺失点云的飞机表面镗孔质量检测

王红平,刘鑫,赵世辰,王宇,王磊

(长春理工大学 机电工程学院,长春 130022)

摘要:为了实现飞机蒙皮镗孔的高质量检测,提出一种结构光镗孔参数检测方法。该方法基于正交投影建立空间圆锥参数模型,并采用傅立叶曲线和 power 函数优化模型,有效地避免了实际工程中镗孔点云缺失带来的检测精度下降问题。首先对原始点云进行降噪处理,根据边缘点集中分布在一侧的特点提取了上下边缘并拟合成平面,其次根据正交投影后锥角在 XOZ 坐标平面或 YOZ 坐标平面满足傅立叶变换的特点,建立了精确的空间圆锥数学模型,进而获取评价镗孔质量的参数。另外,考虑到被检镗孔本身轴线与坐标平面 Z 轴会存在偏差,即拟合的空间圆锥轴线与 Z 轴存在偏差,基于傅立叶变换曲线得出的极值差与法向偏差角之间的关系,提出了法向偏差角的优化数学模型,进一步保证了质量参数的准确性。实验验证了该算法具有更高的精度和更好的抗噪声性能。

关键词:缺失点云;曲面拟合;傅立叶曲线;镗孔;法向偏差角度

中图分类号:TH39

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1212006

0 引言

随着工业领域新兴技术的发展,结构光相机的精度和实用性不断提升,已广泛应用于物体形状测量^[1-3]、逆向工程等领域,其中基于点云的曲面拟合是逆向工程的一个重要研究分支。近年来,许多专家学者利用结构光相机对物体进行三维测量,并将三维点云数据拟合方法应用于物体检测^[4]和参数估计^[5]。镗孔在机械结构中起着重要的作用,特别在飞机装配行业中,如飞机骨架与蒙皮之间普遍采用铆接^[6],孔径尺寸、镗窝深度和法向偏差角度是否满足制孔质量要求是其连接精度和结构强度的重要保证。因此,刘华等^[7]针对飞机蒙皮装配孔研制了一种集钻铣一体的多功能末端执行器,包括孔位补偿、法向量调整和镗窝深度控制等关键技术,但未针对检孔提出一套完整的方案;SCHNABEL R等^[8]研究了一种高效率的随机抽样一致算法(Random Sample Consensus, RANSAC)用于全局曲面拟合,包括对空间圆锥检测,具有很强的鲁棒性;王醒策等^[9]改进了移动最小二乘算法实现局部曲面拟合,找到曲面准确法向,实现更复杂的细节,具有更高精度。上述研究中,其点云数据均是完整的,未考虑实际工况下因工件高反光、遮挡等因素造成点云缺失的情况。此外,毕运波等^[10]利用双目视觉系统建立了沉头孔平行投影数学模型,将三维空间测量问题转换为二维平面测量问题,完成镗孔垂直度检测。同时撒继铭等^[11]提出了一种利用圆曲线和圆锥曲面拟合方法,完成镗孔内外孔径和法向偏差角检测,该算法中镗孔法向偏差角测量利用圆锥表面任意三点其切平面必交于一点原理,以该点为圆锥顶点,建立圆锥数学模型,计算圆锥轴线的方向与外孔平面的法向量夹角。计算过程中利用圆锥表面任意三点法向量来计算其切平面,实际工程中点的法向量极易受到周围噪声影响,特别在镗孔部分缺失点云的情况下点的法向量检测更加困难。因此对镗孔法向偏差角检测精度具有不确定性。

综上所述,大多数现有的曲面拟合方法在拟合完整的点云数据时表现良好。然而在工业环境中,由于场景的复杂性,工件在扫描时出现遮挡、高反光,且受到噪声的影响,导致工件原始点云数据部分丢失,参数检测出现较大偏差;此外,复杂曲面上镗孔法向偏差角检测仍具有挑战性。针对上述问题,本文提出了一种

基金项目:吉林省科技厅重点技术攻关项目(No. 20190302019GX)

第一作者(通讯作者):王红平(1976-),女,教授,博士,主要研究方向为机器视觉、图像处理研究。Email:3572368669@qq.com

收稿日期:2022-05-08;录用日期:2022-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

基于正交投影法建立空间圆锥参数模型实现铤孔工件检测的方法,该方法采用了两种优化模型,解决了实际工况下点云数据缺失和曲面铤孔法向偏差角测量误差大等问题,提高了检测精度。具体方案是:1)对点云进行双边滤波处理,以减少离群点和噪声的影响;2)利用RANSAC算法^[12]分割上表面,根据边缘点云集分布一侧特点提取上下边缘并拟合所在平面参数,再利用正交投影后锥角在平面 XOY 或平面 XOZ 满足傅立叶变换函数关系,计算出铤孔的锥角和锥点,建立精确的空间圆锥数学模型;3)通过铤孔上下边缘平面与空间圆锥数学模型进行数据融合,获取待检测的铤孔的参数,当空间圆锥轴线与 Z 轴出现偏差角时,其任意平面锥角变化曲线 $|F(x)_{\max} - F(x)_{\min}|$ 与法向偏差角度满足Power函数,从而大大提升铤孔法向偏差角度测量精度。

1 提取铤孔边缘信息

1.1 铤孔边缘数据点提取

由于散乱点云在数据存储结构中每个点是无规律排布的,在这样的数据结构中查找每个点的 K 近邻必须遍历所有点,因此必须建立点云数据的空间拓扑结构。本文采用KD树法建立散乱点云之间数据结构,从而查询每个点 P_i 与其最近 K 邻域点集 $N_i = (i = 0, 1, \dots, k-1)$ 。根据铤孔边缘点云分布情况,通过点的 K 邻域几何分布来判断该点是否为边缘点。若某一点为边缘点,则其 K 邻域点分布偏向某一侧如图1(a)所示;若某一点不是边缘点,则 K 邻域点均匀的分布在点 P_i 周围如图1(b)所示。

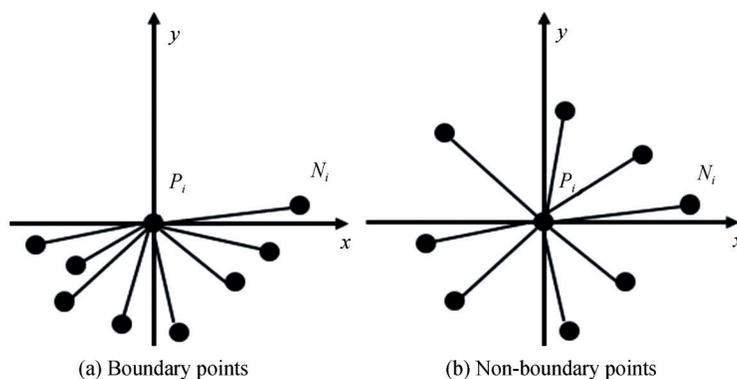


图1 铤孔边缘点分布

Fig. 1 Distribution of boundary points

以 P_i 和 K 邻域点集 N_i 为样本点,利用最小二乘法拟合局部平面 S_i , S_i 满足

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

平面 S_i 法向量 $\mathbf{n}(A, B, C)$, K 邻域样本点 N_i 投影到 S_i 平面

$$\begin{cases} X_{N'_i} = \frac{(B^2 + C^2)x_i - AB y_i - AC z_i - AD}{A^2 + B^2 + C^2} \\ Y_{N'_i} = \frac{(A^2 + C^2)y_i - AB x_i - BC z_i - BD}{A^2 + B^2 + C^2} \\ Z_{N'_i} = \frac{(A^2 + B^2)z_i - BC y_i - AC x_i - CD}{A^2 + B^2 + C^2} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可知点集 N_i 投影平面 S_i 后,其投影后点集 $N'_i (i = 0, 1, \dots, k-1)$ 。构建局部二维平面坐标系,取平面内任意一点 N'_0 ,使得 $\overrightarrow{P_i N'_0} = (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$,在局部平面 S_i 坐标系满足

$$\overrightarrow{P_i N'_i} = \begin{pmatrix} i & j & k \\ A & B & C \\ x_{0i} & y_{0i} & z_{0i} \end{pmatrix} \quad (3)$$

在 S_i 平面内 $\overrightarrow{P_i N'_0}$ 为 X 轴,从式(3)得到 Y 轴 $\overrightarrow{P_i N'_1}$, P_i 为坐标原点。则平面 S_i 内相邻向量之间夹角 θ_i 满足

$$\theta_i = \arccos \left\langle \overrightarrow{P_i N'_i}, \overrightarrow{P_i N'_{i+1}} \right\rangle = \frac{\overrightarrow{P_i N'_i} \cdot \overrightarrow{P_i N'_{i+1}}}{\left| \overrightarrow{P_i N'_i} \right| \left| \overrightarrow{P_i N'_{i+1}} \right|} \quad (4)$$

由式(4),计算 S_i 平面内相邻向量之间夹角最大值 θ_{\max}

$$\theta_{\max} = \max(\theta_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

θ_{\max} 与设定阈值 120° 比较,当 $\theta_{\max} < 120^\circ$ 时,提取上下边缘点。

1.2 下边缘预处理及其边缘平面拟合

实际工程中由于工件材料问题,不同材料工件,激光在镗孔下边缘发生不同程度的反射和衍射现象,导致激光过于集中,或者发生偏转。因此对其下边缘点云数据预处理。

对已提取下边缘点计算 Z 轴方向点的平均值 Z_{mean} 和 Z_{std} , 即

$$Z_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (6)$$

$$Z_{\text{std}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(Z_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \right)^2} \quad (7)$$

当 $Z_i - Z_{\text{mean}} < Z_{\text{std}}$ 时,保存其下边缘点集。

镗孔上下边缘平面拟合步骤:1)利用双边滤波^[13]对原始点云进行降噪处理;2)根据工件高度确定边缘点 P_i 范围,查询该范围内所有邻域点集 N_i ;3)对样本点 N_i 数据利用最小二乘法拟合平面,并且建立局部空间坐标系;4)在局部平面内计算各点向量之间夹角,分割出来上下边缘点,并且对分割后下边缘点云数据进行预处理;5)利用RANSAC拟合上下边缘所在的平面得到其精确的平面参数。

2 镗孔曲面拟合算法

2.1 空间圆锥数学模型建立

镗窝曲面可视为圆锥曲面一部分,本文提出建立空间圆锥数学模型,代替待检测的镗孔曲面,完成镗孔参数检测。空间圆锥数学模型如图2所示。

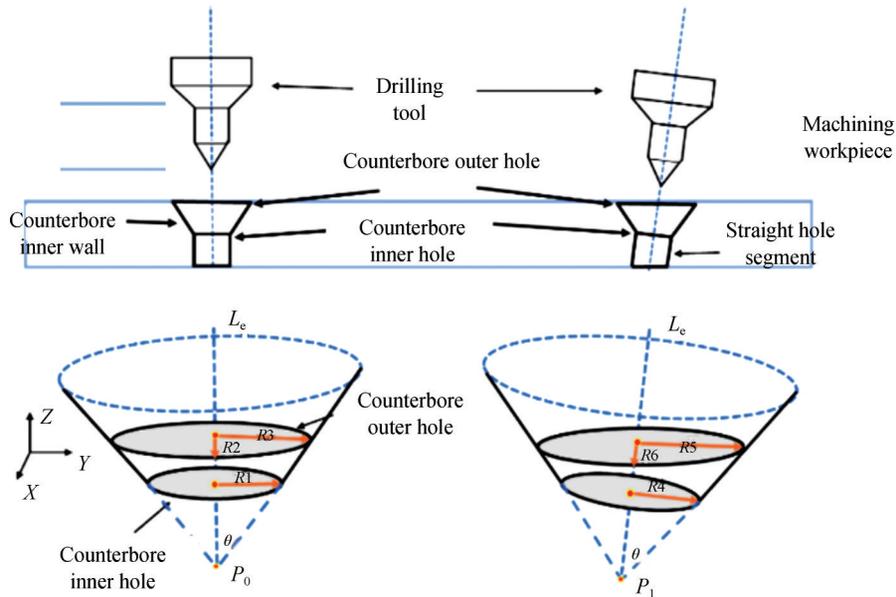


图2 空间圆锥示意图
Fig. 2 Schematic diagram of space cone

图2所示空间圆锥的参数包括圆锥的锥角 θ 、圆锥轴线 L_c 、顶点 P_0 。根据锥面的几何特征,当圆锥锥点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 、锥角 θ 、轴线 L_c 方向确定时,可以确定空间唯一圆锥方程。图3为经过RANSAC分割镗孔上表面和镗孔下边缘处理之后的得到新的点云集 $N_{\text{new}} = (x'_i, y'_i, z'_i)$ 。

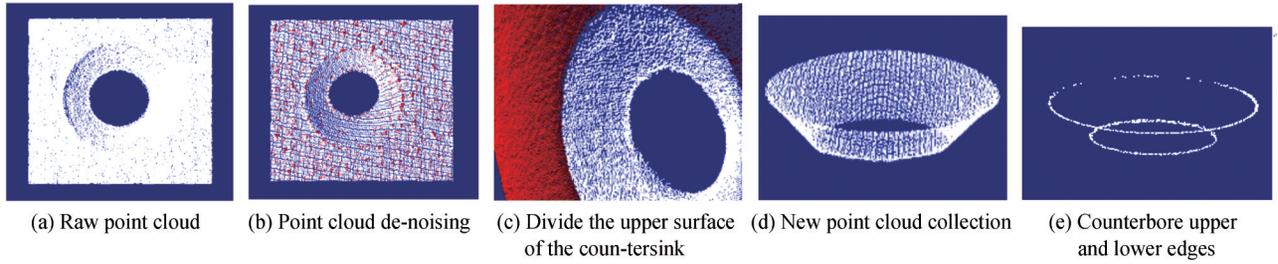


图3 铤孔点云预处理过程

Fig. 3 Countersinking point cloud preprocessing process

在实验过程中,以多激光传感器为标定方案^[14],使相机垂直工件表面进行拍摄。以结构光测量系统中坐标系为基准,建立点云空间直角坐标系,以便将预处理后点云 $N_{\text{new}} = (x'_i, y'_i, z'_i)$ 正交投影到平面 XOZ 和平面 YOZ 。投影到平面点满足

$$\begin{cases} [x''_i, y''_i, z''_i] = [x'_i, y'_i, z'_i] \cdot T_{vi} \\ T_{v1} = T_{XOZ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; T_{v2} = T_{YOZ} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8),投影到平面 XOZ 的点集 $N''_{XOZ} = (x''_i, 0, z''_i)$,投影到平面 YOZ 的点集 $N''_{YOZ} = (0, y''_i, z''_i)$ 。

根据1.1节提取上下边缘算法,提取 $N''_{XOZ} = (x''_i, 0, z''_i)$ 和 $N''_{YOZ} = (0, y''_i, z''_i)$ 边缘点,计算此时的锥角,建立空间圆锥数学模型。

如图4所示,根据RANSAC算法拟合平面 XOZ 和平面 YOZ 内直线 L_1, L_2, L_3, L_4 ,其方向向量分别为 a_1, b_1, a_2, b_2 ,设圆锥锥角 $\theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2})$,则锥角 θ_i 满足

$$\theta_{i1}, \theta_{i2} = \arccos \frac{a_j \cdot b_j}{|a_j| |b_j|} \quad (i = 1, 2 \dots; j = 1, 2) \quad (9)$$

由式(9),可得到空间圆锥锥角参数 θ_i 。

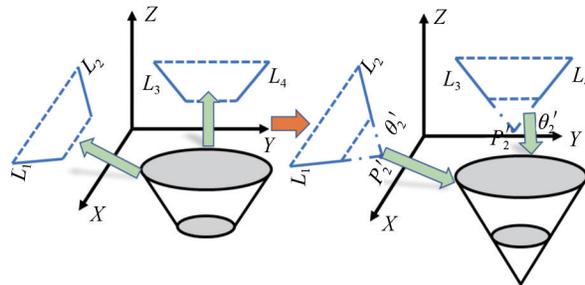


图4 正交投影构建空间圆锥示意图

Fig. 4 Schematic diagram of constructing a space cone by orthogonal projection

表1所示为铤孔点云通过正交投影法投影到 XOZ 平面的锥角边缘点数与异常点数对比。其异常点主要来源于工件高反光造成的点云数据缺失,在提取边缘点时误将内部点提取出来。由图5比较RANSAC和移动最小二乘算法拟合锥角参数可知,移动最小二乘拟合算法在完整的点云数据上表现良好,但针对异常点云值时这种方法会造成很大误差和较低的鲁棒性,RANSAC算法则表现稳健,从包括“异常值”的一组观测数据中迭代估计已知数学模型参数,消除异常点干扰,因此本文采用RANSAC算法。

表 1 锥角边缘点数分布

Table 1 Point distribution of cone angle boundary

Serial number	Total points		Number of outliers	
	L_1	L_2	L_3	L_4
1	72	68	3	3
2	54	63	7	6
3	60	61	0	0
4	65	62	3	6

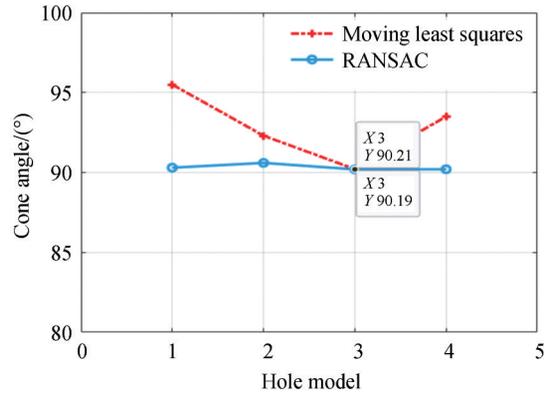


图 5 圆锥锥角拟合方法对比

Fig. 5 Comparison of cone angle fitting methods

本文提出的建立圆锥模型进行镗孔参数检测的方法,对投影后检测锥角的精度要求较高。因此提出一种数学模型(傅立叶级数)对已获得圆锥锥角进行参数优化。由于空间圆锥在平面 XOZ 和平面 YOZ 上投影,其锥角投影周期为 π 符合傅立叶级数特性,因此在平面 XOZ 或平面 YOZ 投影后圆锥锥角满足数学模型

$$F(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(xw) + b_2 \sin(xw) \quad (10)$$

图 6 为傅立叶级数曲线仿真结果,图中表示空间圆锥参数为锥角 90° ,法向偏差角 3° ,拟合后的误差平方和 $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = 3.954 \times 10^{-6}$ 。

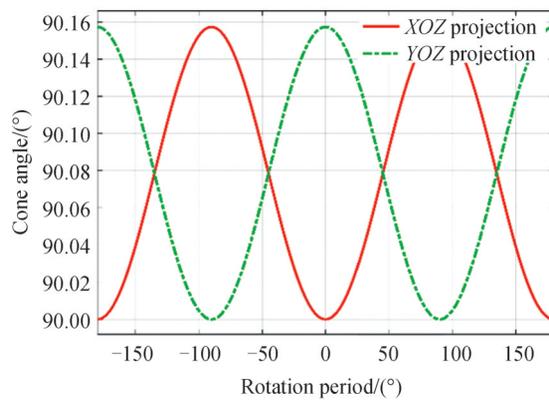


图 6 镗孔锥角拟合示意图

Fig. 6 Schematic diagram of plane cone angle fitting

2.2 镗孔法向偏差角度检测

针对曲面镗孔上表面参数方程较为复杂并且计算困难等问题,本文对此提出 Power 数学模型,检测镗孔的法向偏差角度。当圆锥轴线与 Z 轴产生不同的偏差角时,基于 2.1 节锥角在平面 XOZ 或平面 YOZ 面投影后的变化曲线,建立某一投影平面内 $\theta_{\text{dif}}(\theta_{\text{dif}} = |\max(f(x)) - \min(f(x))|)$ 与法向偏差角的关系,可得到

平面 XOZ 或平面 YOZ 投影后圆锥角度的极值差 θ_{dif} 与法向偏差角度 θ_{std} 关系(如图 7), 可表示为

$$\theta(x)_{\text{std}} = a(\theta_{\text{dif}})^b \quad (11)$$

拟合后的相关系数 R^2 为 1, (R^2 可衡量回归方程整体拟合度), 残差范数为 5.1×10^{-4} 。

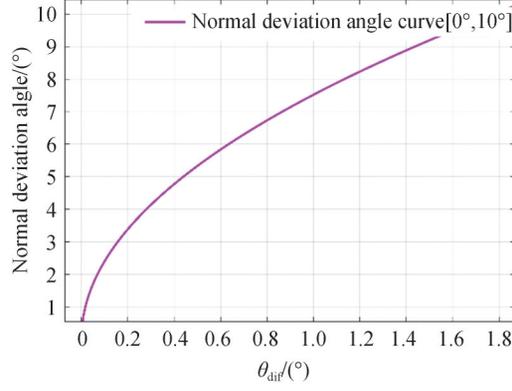


图7 锥角极值差与法向偏差角曲线
Fig.7 Normal deviation angle curve

2.3 铤孔几何参数检测

由空间圆锥模型可计算出圆锥锥点 $P_0 = (X_0'', Y_0'', Z_0'')$ 并推导出旋转轴线 L_e 与平面 XOZ 、平面 YOZ 和平面 XOY 偏离角度 α, β, γ , 因此可得旋转轴线 L_e 方向向量 $s = (m, n, p)$ 与坐标平面形成的夹角为

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \cos \langle \mathbf{n}_{XOZ}, \mathbf{s} \rangle = \frac{\mathbf{n}_{XOZ} \cdot \mathbf{s}}{|\mathbf{n}_{XOZ}| \times |\mathbf{s}|} \mathbf{n}_{XOZ} = (1, 0, 0) \\ \sin \beta &= \cos \langle \mathbf{n}_{YOZ}, \mathbf{s} \rangle = \frac{\mathbf{n}_{YOZ} \cdot \mathbf{s}}{|\mathbf{n}_{YOZ}| \times |\mathbf{s}|} \mathbf{n}_{YOZ} = (0, 1, 0) \\ \sin \gamma &= \cos \langle \mathbf{n}_{XOY}, \mathbf{s} \rangle = \frac{\mathbf{n}_{XOY} \cdot \mathbf{s}}{|\mathbf{n}_{XOY}| \times |\mathbf{s}|} \mathbf{n}_{XOY} = (0, 0, 1) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可计算出轴线 L_e 方向向量 s , 所以 L_e 方程为 $x - x_0/m = y - y_0/n = z - z_0/p$, 同理: 圆锥旋转曲面母线 $F(x, y, z) = 0$, 在母线 $F(x, y, z)$ 任取一点 $M_1 = (x_1, y_1, z_1)$, 则过 M_1 的纬圆上任意一点 $P(x, y, z)$, 满足

$$M_1 P \perp S, \quad \left| \overrightarrow{P_0 P} \right| = \left| \overrightarrow{P_0 M_1} \right| \quad (13)$$

$$\begin{cases} m(x - x_1) + n(y - y_1) + p(z - z_1) = 0 \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 \end{cases} \quad (14)$$

结合圆锥母线方程 $F(x_1, y_1, z_1) = 0$, 可得空间圆锥旋转曲面。

本文铤孔曲面拟合算法步骤为

- 1) 对原始点云进行预处理, 提取铤孔上下边缘, 拟合上下平面参数。
- 2) 利用正交投影法得到空间圆锥模型参数: 锥点 P_0 , 锥角 θ , 铤孔法向量偏差角度, 并确定空间唯一圆锥方程。
- 3) 通过铤孔上下边缘平面与空间圆锥方程数据融合, 最终完成铤孔参数检测。

3 实验与结论

3.1 实验平台搭建及算法流程

检测系统主要由机器人系统、视觉检测系统和上位机等组成, 其中机器人系统、视觉检测系统与上位机之间通过 TCP/IP 协议进行通讯。实验平台搭建如图 8 所示, 由 fanuc-m20ia 六轴机器人、计算机、结构光相机和四激光传感器等组成, 视觉检测装置通过法兰挂载到机器人末端。使用 2.9Hz CPU 和 8GRAM 内存笔

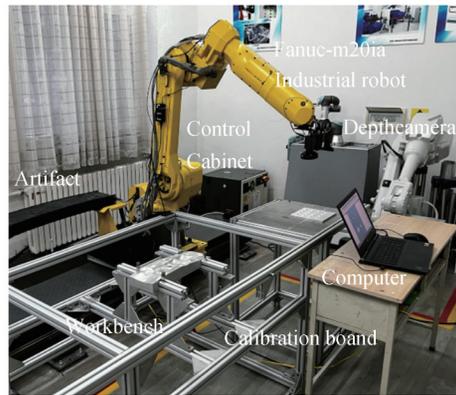
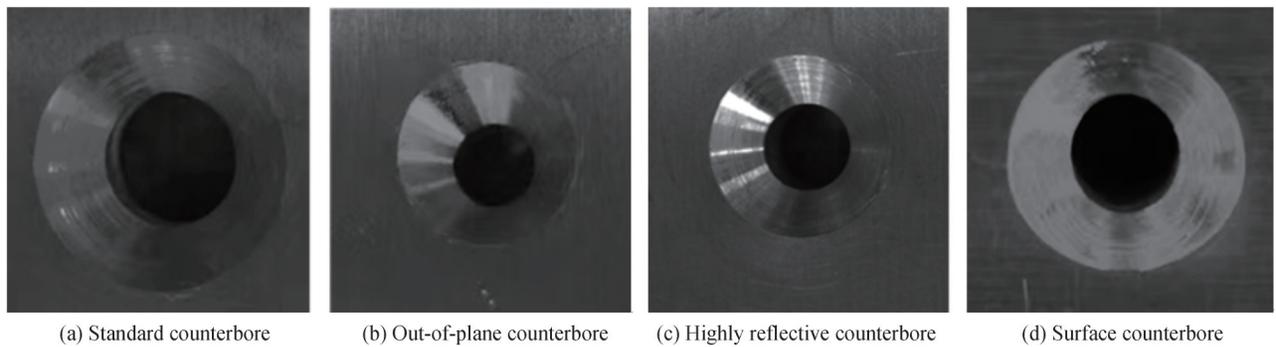


图8 实验系统

Fig. 8 Experimental system diagram

记本电脑,通过 matlab R2018b 对点云进行处理。实验分为四组(如图 9):a)标准镗孔;b)异面镗孔;c)高反光镗孔;d)曲面镗孔。图 10 为不同工况下分割上平面后的镗孔的点云图。



(a) Standard counterbore

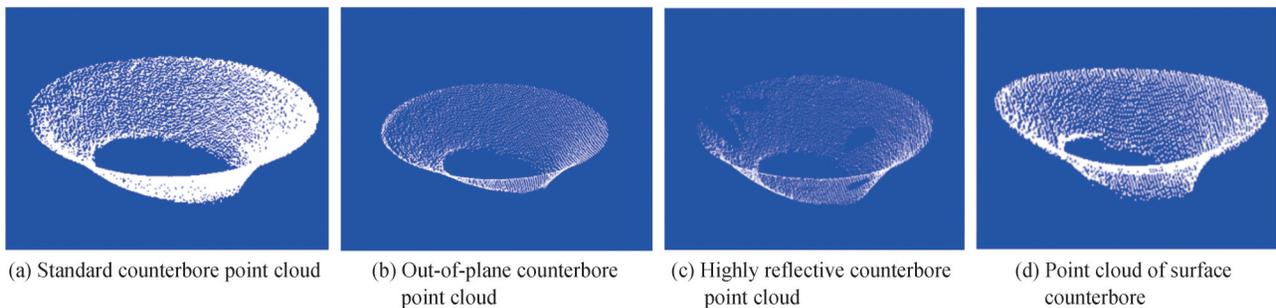
(b) Out-of-plane counterbore

(c) Highly reflective counterbore

(d) Surface counterbore

图9 不同工况下的镗孔

Fig. 9 Counterbore under different situations



(a) Standard counterbore point cloud

(b) Out-of-plane counterbore point cloud

(c) Highly reflective counterbore point cloud

(d) Point cloud of surface counterbore

图10 不同工况下分割上平面后的镗孔的点云图

Fig. 10 Point cloud after segmentation

本文所提方法对下边缘点进行预处理是至关重要的,下边缘处理直接影响镗孔内孔直径参数检测。将获取的下边缘点云数据集,经过 $Z_i - Z_{\text{mean}} < Z_{\text{std}}$ 预处理后导入 Matlab 软件中,其中 X, Y 坐标表示下边缘位置信息,颜色表示预处理后的点集在下边缘平面法线方向偏移量。如图 11 所示。

如图 11 所示,根据下边缘平面度可知,其负法向偏差最大为 -0.0021 mm ,正法向偏差最大为 0.0613 mm ,平均值为 0.0264 mm ,法向方差为 0.0005 mm 。下边缘平面度证明了下边缘点预处理能够使其绝大部分点在同一空间平面上,保证了镗孔内孔径参数检测精度。

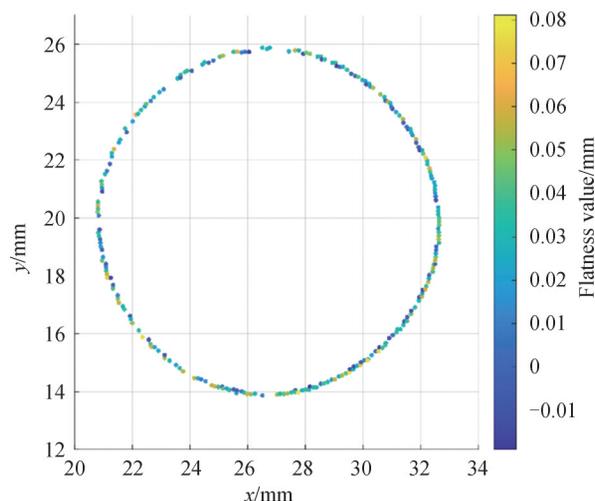


图 11 下边缘平面度

Fig. 11 Flatness of lower edge

3.2 铤孔质量检测参数研究

建立铤孔锥角参数优化模型,根据正交投影法对 3.1 节提到四种铤孔进行检测,以 Z 轴为旋转轴,周期为 $[0, \pi]$,步长为 $\pi/18$,在平面 XOZ 上进行投影。锥角在平面 XOZ 投影后拟合曲线如图 12 所示,其锥角 $F(\theta_a)=89.901^\circ$, $\theta_{\text{dif}}=0.444^\circ$ 、 $F(\theta_b)=89.949^\circ$, $\theta_{\text{dif}}=0^\circ$ 、 $F(\theta_c)=89.903^\circ$, $\theta_{\text{dif}}=0.164^\circ$ 、 $F(\theta_d)=89.951^\circ$, $\theta_{\text{dif}}=0.072^\circ$ 。由于铤孔法向偏差角度 θ_{std} 与 θ_{dif} ($\theta_{\text{dif}}=|\max(f(x))-\min(f(x))|$) 满足 $\theta(x)_{\text{std}}=7.518(\theta_{\text{dif}})^{0.496}$,因此铤孔法向偏移量分别为 5.025° , 0° , 3.066° , 2.038° 。

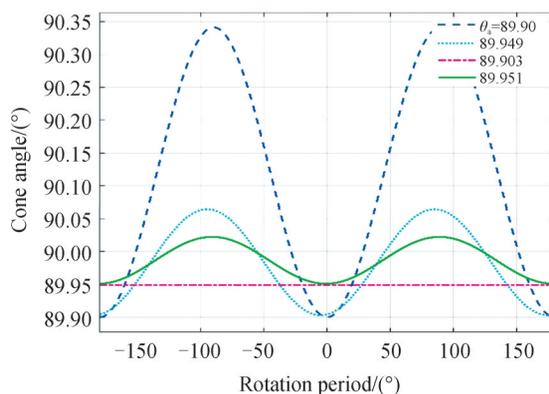


图 12 锥角参数曲线

Fig. 12 Cone angle parameter curve

通过与机器视觉、移动最小二乘曲面拟合算法的比较对本文方法进行了验证。表 2 是不同方法的铤孔内孔径、锥角、法相偏差角和铤孔深度参数提取结果。

已知本文检测的四种铤孔,其内孔直径的真实值分别为 10.011 mm、5.996 mm、5.990 mm 和 6.010 mm,从表 2 可得,机器视觉内孔直径拟合的最大误差为 0.123 mm,移动最小二乘算法拟合的内孔直径最大误差为 0.246 mm,上述两种方法内孔的最大误差均来自孔 3 工件高反光的影响。本文方法获得的内孔直径最大误差为 0.023 mm,相比于机器视觉和移动最小二乘算法在精度上分别提高了 81.3% 和 90.65%,并且本文方法检测得到的铤窝深度最大误差与上述两种方法相比,也具有较高的鲁棒性。此外,上述四种铤孔锥角真值分别为 89.973° 、 89.806° 、 90.022° 、 89.879° ,从表 2 可得,机器视觉铤孔锥角检测的最大误差为 0.521° ,移动最小二乘算法铤孔锥角检测的最大误差为 0.604° 。本文方法检测得出最大误差为 0.121° ,相比于移动最小二乘算法和机器视觉方法分别降低了 79.96%、76.77%。铤孔法向偏差角真实值为 0.003° 、 2.926° 、 4.904° 、

表2 本文方法与其他方法对比
Table 2 The comparison between the method in this paper and other methods

Measurement	Countersinking parameters				
	Inner counterbore diameter/mm	Cone angle/(°)	Normal deviation angle/(°)	Counterbore depth/mm	
Method of this article	Counterbore (a)	9.999	89.949°	0.000°	3.009
	Counterbore (b)	5.984	89.903°	3.066°	2.962
	Counterbore (c)	5.967	89.901°	5.025°	3.006
	Counterbore (d)	5.991	89.951°	2.039°	--
Moving least squares	Counterbore (a)	9.956	89.931°	0.060°	3.033
	Counterbore (b)	5.976	89.639°	3.035°	3.019
	Counterbore (c)	5.744	89.418°	4.592°	2.839
	Counterbore (d)	7.926	89.758°	2.451°	--
Computer vision detection	Counterbore (a)	9.921	89.841°	0.230°	3.023
	Counterbore (b)	5.960	89.567°	2.845°	2.853
	Counterbore (c)	5.867	89.501°	4.572°	2.830
	Counterbore (d)	5.928	89.647°	1.607°	--

2.150°。在缺失点云情况下,本文方法得出的四种镗孔法向偏差角最大拟合误差不超过0.142°,相比机器视觉和移动最小二乘算法误差降低了71.9%和70.6%。因此,上述实验验证了本文所提方法具有更高的检测精度。

本文对易发生高反光铝合金材料上的镗孔进行检测。图13(a)为结构光相机检测工件流程,13(b)为三坐标测量仪检测过程,图13(c)平面镗孔加工样件,板材工件尺寸为200 mm×200 mm×50 mm,由铝合金5 052制成。图13(d)为曲面镗孔加工样件,板件尺寸为200 mm×140 mm×h(10<h<5)mm,由铝合金6 061

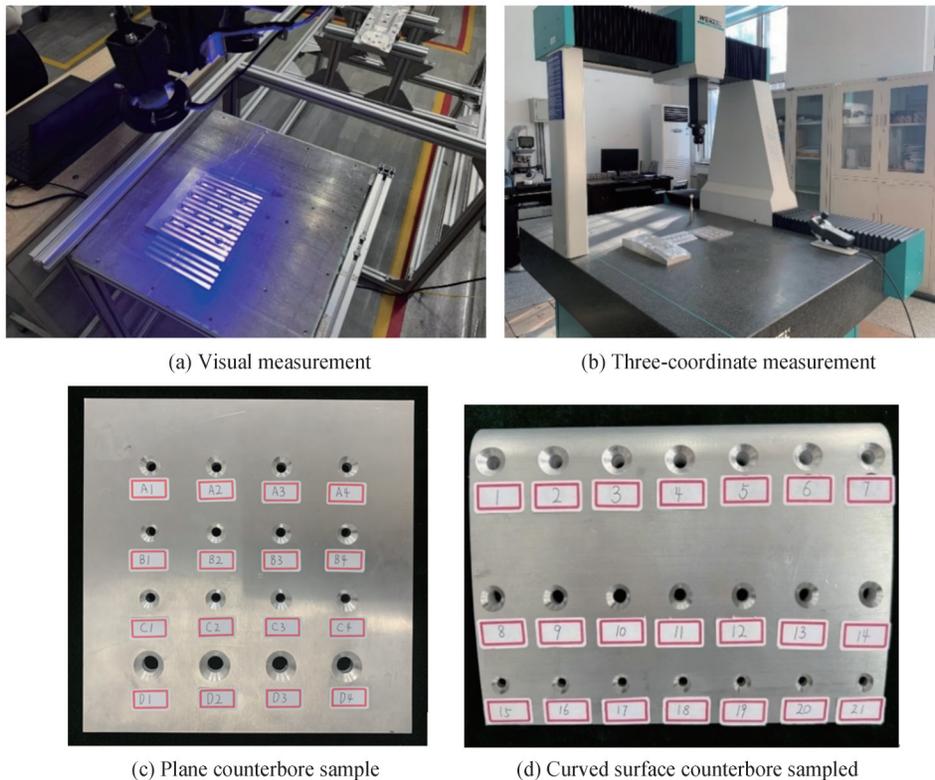


图13 本文方法、三坐标测量仪检测流程和测量工件
Fig. 13 3D vision and 3D inspection process and the workpiece

制成。本实验分为两步:第一步,利用三坐标测量仪、窝量规和千分尺对平面和曲面上的铰孔的法向偏差角度、深度和孔径进行测量;第二步利用结构光相机对工件测量。

表3为平面铰孔样件真实值与本文方法检测结果对比。在四种不同类型的平面铰孔中内孔直径误差最大为 -0.023 mm,深度最大误差为 -0.022 mm,法向偏差角度最大误差为 -0.13° 。由此得出,本文方法即使在易发生高反光工件上,依然有较高的检测精度。

表3 平面铰孔检测
Table 3 Plain counterbore inspection

Measurement	Plane countersinking parameters								
	Inner countersunk diameter/mm			Normal deviation angle/($^\circ$)			Countersunk depth/mm		
	Measurements	Actual value	Error value	Measurements	Actual value	Error value	Measurements	Actual value	Error value
A1	6.001	6.010	-0.009	0.151	0.050	0.101	2.991	3.012	-0.021
A2	6.001	6.012	-0.011	0.129	0.031	0.098	2.988	3.009	-0.021
A3	5.983	5.995	-0.012	-0.009	0.062	-0.071	3.007	2.992	0.015
A4	6.029	6.014	0.015	-0.084	0.036	-0.12	2.973	2.990	-0.017
B1	5.984	5.996	-0.012	3.039	2.922	0.117	2.962	2.983	-0.021
B2	5.975	5.991	-0.016	2.677	2.786	-0.109	2.998	2.985	0.013
B3	5.991	5.987	0.004	3.131	3.027	0.104	3.009	3.004	0.005
B4	6.003	5.990	0.013	3.111	3.209	-0.098	2.961	2.982	-0.021
C1	5.967	5.990	-0.023	5.025	4.904	0.121	2.998	2.986	0.012
C2	5.975	5.988	-0.013	4.887	4.986	-0.099	3.006	2.988	0.018
C3	6.032	6.012	0.02	5.219	5.099	0.120	2.973	2.990	-0.017
C4	5.992	6.010	-0.018	4.750	4.866	-0.116	3.091	3.088	0.003
D1	9.999	10.011	-0.012	0.000	0.003	-0.003	3.009	2.994	0.015
D2	9.980	9.990	-0.01	0.330	0.230	0.1	2.968	2.990	-0.022
D3	9.978	9.991	-0.013	0.194	0.090	0.104	2.997	2.983	0.014
D4	9.975	9.990	-0.015	0.110	0.240	-0.13	2.976	2.996	-0.02

图14为表4中曲面法向偏差角度测量结果分析图,其最大误差为 0.136° ,进一步验证了本文所提方法的准确性和稳定性。值得一提的是,从本文方法原理出发,铰孔的法向偏差角 θ_{std} 是由铰孔锥角在空间坐标平面 XOZ/YOZ 投影的极值差 θ_{diff} 通过Power函数计算得出,因此本文提出的拟合方法针对不同曲率工件上的铰孔依然有较高的检测精度。

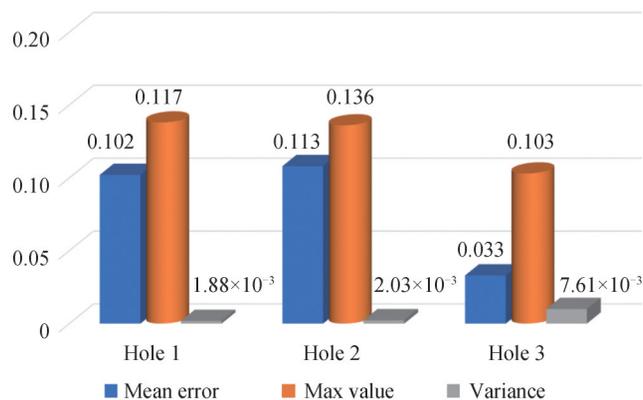


图14 曲面法向偏差角度分析
Fig. 14 Analysis of normal deviation angle of curved surface

表4 曲面镗孔法向偏差角测量
Table 4 Measurement of normal deviation angle of counterbore on complex curved surface

Serial number	Surface countersunk parameters		
	Cone angle extreme difference	Measured value	Standard value
	$\theta_{dir} \times 10^{-4}/(^{\circ})$	$\theta_{mea}/(^{\circ})$	$\theta_{std}/(^{\circ})$
1	2.546	2.038	2.150
2	2.546	1.819	1.943
3	2.383	1.700	1.820
4	1.584	1.834	1.932
5	2.587	2.023	2.023
6	1.891	1.685	1.820
7	0.000	1.772	1.897
8	1.617	0.314	0.413
9	2.383	0.288	0.408
10	1.683	0.346	0.447
11	1.617	0.367	0.503
12	2.111	0.485	0.598
13	2.225	0.460	0.576
14	1.963	0.434	0.543
15	1.551	0.120	0.023
16	1.683	0.189	0.290
17	1.999	0.141	0.031
18	1.133	0.204	0.287
19	1.246	0.185	0.272
20	0.671	0.121	0.185
21	1.751	0.107	0.210

4 结论

为了提高镗孔检测过程的精度和鲁棒性,本文提出了一种结构光镗孔检测方法。针对实际复杂工况下结构光相机获取的工件点云数据部分缺失的问题,以易发生反光的铝制工件为样本进行了大量的图像采样及处理。本文方法获得的不同类型镗孔法向偏差角误差小于 0.142° 、平面工件孔径误差小于 0.025 mm 、孔深误差小于 0.022 mm 。实验结果表明本文方法检测的镗孔的上述四个指标参数优于传统机器视觉和移动最小二乘曲面拟合算法,一方面能很好地消除部分点云缺失情况下的信息干扰,另一方面能有效地提高复杂曲面上镗孔法向偏差检测的结果,检测精度高、抗噪性能好。

参考文献

- [1] LI J, CHEN Z, RAO G, et al. Structured light-based visual servoing for robotic pipe welding pose optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 138327-138340.
- [2] JIA T, XU D, WANG H, et al. An adaptive defocus three-dimensional measurement method based on tabu search and combined gray code[J]. IEEE Access, 2020, 8: 14724-14736.
- [3] JIA Tong, ZHOU Zhongxuan, GAO Haihong, et al. Depth measurement based on infrared coded structured light [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1628-1632.
贾同, 周忠选, 高海红, 等. 基于红外编码结构光的深度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1628-1632.
- [4] SHANG Z, LI W, DONG M, et al. 3D shape measurement system based on fringe projection in 4-step phase shifting[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(4): 584-589.
- [5] FLORES V H. A panoramic fringe projection system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 80-84.
- [6] DING Chuanfu, CHEN Meiying, WU Youjin, et al. Experimental investigation of corrosion fatigue properties for mechanical fastener joints of hydroplane[J]. Journal of Materials Engineering, 1995, (8): 41-44.
丁传富, 陈美英, 吴有金, 等. 飞机典型机械紧固件连接件腐蚀疲劳性能的试验研究[J]. 材料工程, 1995, (8): 41-44.
- [7] LIU H, ZHU W, DONG H, et al. A helical milling and oval countersinking end-effector for aircraft assembly [J].

- Mechatronics, 2017, 46: 101-114.
- [8] SCHNABEL R, WAHL R, KLEIN R. Efficient ransac for point-cloud shape detection[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 26(2): 214-226.
- [9] LI Shifei, WANG Ping, SHEN Zhenkang. Range image surface fitting via moving least squares methods[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(1): 229-233.
李世飞,王平,沈振康.利用移动最小二乘法进行深度图像曲面拟合[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(1): : 229-233.
- [10] BI Yunbo, XU Chao, FAN Xintian, et al. Method of countersink perpendicularity detection using vision measurement[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(2): 312-318.
毕运波,徐超,樊新田,等.基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(2): 312-318.
- [11] SA J, GU H, AN Y, et al. Study on curved surface fitting of countersink based on point cloud[J]. IEEE Access, 2020, (8): 106464-106470.
- [12] FISCHLER M A, BOLLEES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [13] CAO Shuang, YUE Jianping, MA Wen. Bilateral filtering denoise algorithm for point cloud based on feature selection[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43: 351-354.
曹爽,岳建平,马文.基于特征选择的双边滤波点云去噪算法[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(S2): 351-354.
- [14] ZHANG Ying, DING Hongchang, ZHAO Changfu, et al. The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly[J]. Chinese Optics, 2021, 14(2):344-352.
张赢,丁红昌,赵长福,等.基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究[J].中国光学,2021,14(2): 1-10.

Quality Inspection of Hole Parameters of Aircraft Surface Based on Incomplete Point Cloud Data

WANG Hongping, LIU Xin, ZHAO Shichen, WANG Yu, WANG Lei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To realize the quality measurement of the spot facing of the aircraft skin, a structured light 3D vision inspection system is employed in this paper. Due to the high reflection of the workpiece and the influence of the noise, the system mainly solves the problem in the actual project. The acquisition of 3D point cloud data is partially missing. At the same time, due to the complexity of the surface parameter equation on the surface of the countersunk hole, the measurement of the normal deviation angle is difficult and accurate. Aiming at the above problems, the establishment of a spatial cone parameter model based on the orthogonal projection method for quality inspection of countersunk workpieces, and a mathematical model for optimizing the normal deviation angle parameters is proposed to improve the inspection accuracy. First, most points of the workpiece scanned by a point cloud camera are disordered and discrete. In the process of devising, normal estimation, and surface fitting of the original point cloud, it is necessary to operate based on the neighborhood. If there is no efficient auxiliary data structure, and if it is convenient to all points in space to have the k closest distances to a given data point index point, this time complexity will be very large for a large number of data points. KD tree, or k -dimensional tree, is a data structure employed in computer science. It mainly divides data through dimensions and efficiently manages high-dimensional data. In this paper, KD-tree is used to determine a spatial index structure index of scattered points. The first crucial link in the quality inspection process of 3D point cloud spot facing is to denoise the original point cloud. The fundamental purpose of this operation is to remove the influences of point cloud noise and provide high-precision and high-quality 3D data for subsequent workpiece quality inspection. In this experiment, when a surface structured light camera is used to obtain the three-dimensional point cloud data of the workpiece, due to the complexity of the actual working environment, there are various errors in the equipment obtained by the point cloud, which can generate a large number of noisy point clouds. These noisy point clouds are 3D data irrelevant to the detection target. And these noisy data are scattered and disordered spatial point clouds. Noise may also be generated due to external interference, line of sight

occlusion, reflection and diffraction characteristics of some metal workpiece surfaces, obstacles, and other factors. To ensure that the quality parameters of the countersink can be accurately detected, this paper adopts a bilateral filtering noise reduction method to reduce the influence of outliers and noise. Secondly, the RANSAC algorithm is used to segment the upper surface, extract the upper and lower boundaries according to the characteristics of the centralized distribution of the boundary point cloud on one side, and the plane parameters are fitted. According to the orthogonal projection, the cone angle satisfies the Fourier transform function relationship on the plane XOY or the plane XOZ , the cone angle and cone point of the spot-facing hole are calculated, and an accurate spatial cone mathematical model is established. Finally, through data fusion between the upper and lower boundary planes of the spot facing and the spatial cone mathematical model, the parameters of the spot facing to be detected are obtained. When the spatial conical axis and Z axis have deviation angle, the optimal mathematical model of normal deviation angle is proposed. For the surface parameter equation of surface countersink is too complicated, the problem of low normal precision for detection countersink is avoided. Furthermore, to verify the algorithm performance, comparisons are made with machine vision and mobile least squares surface fitting methods. The experimental results show that the algorithm has higher accuracy and better anti-noise performance.

Key words: Missing point cloud; Surface fitting; Fourier curve; Counterbore; Surface fitting normal deviation angle

OCIS Codes: 120.6650; 150.3040; 100.6890; 150.1135