

基于三维点云的机械加工精度自动检测方法

杨坤, 李子宽, 李嘉

河海大学

摘要: 本文提出了一种基于三维点云的零件精度自动检测方法,对传统 ICP(迭代最近邻点)方法进行改进,将基于配准误差的点对权值添加到坐标转换参数和总体残差的迭代计算过程中,克服了误差点对配准的影响;根据误差分布假设检验原理设计加工精度快速评价方法,帮助质检人员快速识别问题零件,提高检测效率和精度;通过试验验证了改进 ICP 算法对局部误差点云配准的鲁棒性以及加工精度评价方法的准确性。

关键词: 机械构件;三维点云;鲁棒配准;正态分布假设检验;ICP

中图分类号: TG80;TH162

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.028

Automatic Detection Method of Machining Accuracy Based on 3D Point Cloud

Yang Kun, Li Zikuan, Li Jia

Abstract: An automatic detection method for parts accuracy based on 3D point cloud is proposed in this paper. The traditional ICP(Iterative Closest Point) method is improved. The point-to-weight based on the registration error is added to the iterative calculation process of the coordinate transformation parameters and the overall residual, which overcomes the influence of the error point on the registration. According to the error distribution hypothesis test principle, a rapid evaluation method of machining accuracy is designed, which can help quality inspectors to quickly identify problem parts and improve detection efficiency and accuracy. The robustness improved ICP algorithm for local error point cloud registration and the machining accuracy evaluation method are verified by experiments.

Keywords: mechanical component; three-dimensional point cloud; robust registration; normal distribution hypothesis test; ICP

1 引言

加工精度检测是保证精密零件产品质量的关键环节,传统的机械零件质检方法主要使用卡尺、微分尺、三维坐标仪^[1]等进行接触式测量,人工选点频繁,测量结果易受选点误差的影响。近年来,研究人员开始尝试利用三维扫描技术进行零件精度检测,并提出了多种全表面非接触检测方案。而这些方法在配准实物扫描点云和设计模型时,均未考虑零件表面加工误差部位会造成配准结果整体偏差^[2,3]的问题。此外,公开报道的检测方案均是在配准基础上直接进行零件表面偏差计算,仅将结果简单地标记在点云上,需要质检人员依靠人眼区分点云测量随机误差与零件表面的加工误差^[4,5]。

针对上述问题,本文提出了一种能够自动判定机械零件合格性和加工精度的方法,该方法主要由两步组成:①利用改进 ICP 算法实现扫描点云与设计模型的鲁棒配准;②根据误差分布假设检验实现零件合格性的自动筛查,并评价零件的加工精度。

通过试验证明,改进 ICP 配准方法不会将零件的局部加工误差分摊到无误差部位,误差分布假设检验能够准确甄别不合格零件,并自动生成加工精度的评价结果。

2 含有噪声点云的鲁棒配准

扫描点云和设计模型常常处于不同的三维坐标系中,将它们调整到统一坐标系的计算过程称为配准,配准计算一般分成“粗配准”和“精细调整”两个步骤。

2.1 粗配准

粗配准的目标是大致对齐扫描点云和设计模型的位置与姿态,为随后的精细调整提供可靠的初始状态。从计算效率和稳定性方面考虑,本文选用主成分分析法(PCA)完成点云与模型的三维粗配准^[6,7]。分别计算扫描点云和设计模型的三角网顶点的协方差矩阵,有

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{P})(p_i - \bar{P})^T \quad (1)$$

式中, C 为协方差矩阵; n 为点云中点的数量; \bar{P} 为点云(或模型)的重心; P_i 为点云中的点; T 为数学

符号矩阵的转置。

以重心为原点,以 C 的特征向量为 $X、Y、Z$ 轴,建立各自标准姿态直角坐标系,将点云与模型分别调整到该坐标系下,从而实现两者的粗配准。

2.2 精细调整

在对机械零件的加工精度检测中,不可避免地会遇到有加工误差的产品,这些误差零件的某些局部位置会与设计模型存在明显的几何偏差,导致扫描点云中存在与设计模型不符的连片加工误差点。如果采用经典 ICP 算法^[8-10]进行精细配准,经过迭代计算,这些加工误差会被整幅点云平均分摊掉,导致存在加工误差部位的偏差量减小,而无误差部位却出现明显偏差。为解决该问题,利用选权迭代思想改进经典 ICP 算法,在每一轮迭代计算完成后,依据配准残差给点对赋予相应的权重,通过降低误差点权重来逐渐消除它们对配准结果的影响,最终实现扫描点云与设计模型的精确配准。改进 ICP 算法流程图见图 1。

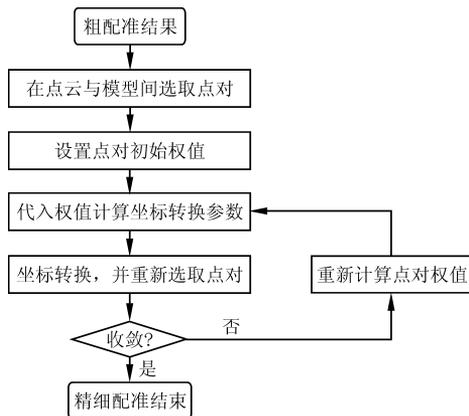


图 1 改进 ICP 算法流程

(1) 点对选权规则

扫描点云 P 与设计模型 Q 具有不同的数据结构,将 Q 对应的表面三角网作为参考,计算扫描点云 P 到参考网 Q 的最近距离点集 $X_i = C(P_i, Q)$,点集 P 与 X 具有一一对应关系。

将选权迭代应用于 ICP 算法,通过赋予误差点很小的权值来克服它们对计算旋转矩阵 R 和平移向量 t 的影响。能够使对应点集间的误差平方和达到最小的 R 和 t 计算式为

$$\operatorname{argmin}_{R,t} J(R,t) = \sum_{i=1}^n \|\rho_i [x_i - (Rp_i + t)]\|^2 \quad (2)$$

式中, ρ_i 为权值; $p_i \in P, x_i \in X$ 是一组对应点对。

与点对应关系不断更新类似,点对权值也会更新。新的权值可根据前一次迭代结束时的残差来计算,对残差较大的点对赋予较小的权值。权值函数

的选择是稳健估计的关键,而 Huber 法是测量平差中常常被选用的一种基于残差的定权方法,可表示为

$$\rho(v) = \begin{cases} 1 & |v| \leq c \\ c/|v| & |v| > c \end{cases} \quad (3)$$

式中, c 为常系数。

将其应用于改进 ICP 算法,试验表明,Huber 法并不能对误差点赋予合理的权值,并且点云中的加工误差点比例范围不可预知, c 值难以准确确定。

为了克服这些问题,参考巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器函数设计了更加有效的权值计算方法为

$$\rho(v)^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^{2n}} \quad (4)$$

式中, μ 为 v 的均值; σ 为 v 的方差; n 为常数,本试验取 $n=5$ 。

Huber 函数与 Butterworth 函数曲线如图 2 所示。为了消除误差点的影响,保证非误差点具有较高权值,在迭代过程中可以固定 μ 值,设 $\mu=0$ 。

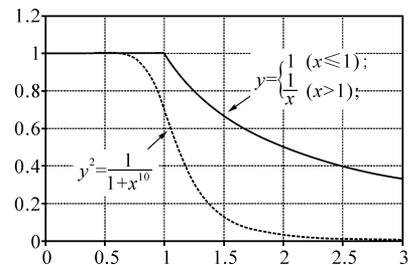


图 2 Huber 函数与 Butterworth 函数曲线

迭代计算过程中点对权值 $\rho_i = p(e_i)$, e_i 为前一次迭代计算得到的残差值,在首次迭代时,取 $\rho_i = 1$ 进行等权计算。

(2) 求解坐标转换参数

在四元数方法中刚体变换用矢量表示为 $q = [q_R | q_T]$, $q_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$, $q_0 \geq 0$, $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$,其中 q_R 是描述旋转变换的矢量, $q_T = [q_4, q_5, q_6]^T$ 是平移矢量。将点对权值代入四元数方法求解坐标转换参数,具体方法如下:

① 计算扫描点集 P 的重心 μ_p 和对应点点集 X 的重心 μ_x ,有

$$\mu_p = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \rho_i p_i, \mu_x = \frac{1}{n_x} \sum_{i=1}^{n_x} \rho_i p_i \quad (5)$$

② 根据重心计算 P 和 X 的加权协方差矩阵 C_{PX} 为

$$C_{PX} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} [(p_i - \mu_p) \rho_i (x_i - \mu_x)^T] \quad (6)$$

求 C_{PX} 的反对称矩阵 \mathbf{A} , \mathbf{A} 中各元素为

$$A_{ij} = (C_{PX} - C_{PX}^T)_{ij} \quad (7)$$

通过 \mathbf{A}_{ij} 构造列矢量 $\mathbf{\Delta} = [A_{23}, A_{31}, A_{12}]^T$, 根据列矢量 $\mathbf{\Delta}$ 和 C_{PX} 构造四阶对称矩阵为

$$\mathbf{Q}(C_{PX}) = \begin{bmatrix} tr(C_{PX}) & & & \mathbf{\Delta}^T \\ & \mathbf{\Delta} & & \\ & & C_{PX} + C_{PX}^T - tr(C_{PX})\mathbf{I}_3 & \\ & & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{I}_3 为三阶单位矩阵。

③求出对应矩阵 \mathbf{Q} 的最大特征值的单位特征矢量 \mathbf{q}_R 。矢量即为所求最优旋转矩阵对应的单位四元数表达, 构建旋转矩阵为

$$\mathbf{R}(q_R) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

④根据 $\mathbf{q}_T = \boldsymbol{\mu}_x - \mathbf{R}(q_R)\boldsymbol{\mu}_p$ 计算对应的平移向量 \mathbf{q}_T 。依据旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{q}_T , 对扫描点集 P 进行坐标变换。至此, 完成一次迭代计算。

⑤第 k 次迭代的配准误差为

$$E_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|d_i^{(k)}\| \quad (10)$$

式中, $d_i^{(k)}$ 为第 k 次迭代 P 到 X 的平均距离。

当 $|E_k - E_{k+1}| < \varepsilon$ 时, 认为迭代收敛, 此时结束精确配准, ε 是一个预设的极小正值。

3 误差检验与加工精度评价

本文主要从两个方面来评价零件的加工精度, 首先采用误差分布假设检验方法^[11]判断距离偏差 d_i 是否服从正态分布, 然后依据零件生产标准规定的公差界限进一步判断产品是否合格。

3.1 误差分布假设性检验

与设计模型完全相符的合格零件, 其对应的扫描点云误差主要来自于三维扫描仪的测量随机误差, 应服从正态分布。本文采用 χ^2 检验法, 检验距离偏差 d_i 是否服从正态分布, 从而判断零部件的合格性。

设距离偏差值 d_i 为质量特性值 x_i , 其分布函数为 $F(x)$, 正态分布函数为 $F_0(x)$, 根据 x_i 检验下述假设是否成立

$$H_0: F(x) = F_0(x) \quad (11)$$

根据 x_i 估计 $F_0(x)$ 的两个参数 μ 和 σ , 以确定正态分布函数 $F_0(x)$ 的具体形式。这样就可以在假设 H_0 的前提下计算出 x_i 落入 k 组中的概率 p_i , 并由 p_i 与点数量 n (即样本容量) 的乘积算出理论频数 np_1, np_2, \dots, np_k 。因此, 采用检验统计量 χ^2 来描

述它们之间的偏离程度, 根据 χ^2 的大小判断它们之间的差异是由样本的随机性引起的, 还是由于 $F(x) \neq F_0(x)$ 所引起的, χ^2 的表达式为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i} \quad (12)$$

进行检验时, 根据事先给定的显著水平 α , 利用 $P(\chi^2 > \chi_\alpha^2) = \alpha$ 计算临界值 χ_α^2 。最后将计算得出的 χ^2 与 χ_α^2 相比较: 如果 $\chi^2 < \chi_\alpha^2$, 则接受 H_0 , 即认为本次检测的距离偏差 d_i 服从正态分布; 否则, 认为距离偏差分布不服从正态分布, 产品可能存在系统性的加工误差, 将其认定为不合格产品。

3.2 公差界限检验

如果零件不存在明显的尺寸误差和形变误差, 但是加工不精细, 表面过于粗糙, 依然有可能通过正态分布假设性检验。这显然不符合工业检测要求, 所以对距离偏差服从正态分布的零件进一步执行误差公差界限检验, 即通过检测 3 倍误差的绝对值是否小于公差界限 $\Delta_{\text{限}}$ 来判断零件表面的粗糙程度。如果 $|3\sigma| < \Delta_{\text{限}}$, 则认为零件表面加工精细, 满足加工精度要求, 属于合格件。

4 试验与分析

4.1 点云精细配准试验

设计了经典 ICP、Huber 法 ICP 和本文改进 ICP (Butterworth ICP) 算法的对比试验。设计如图 3 的试验场景, 长方体模型尺寸为 $10\text{mm} \times 6\text{mm} \times 2\text{mm}$, 该模型的采样点云包含 9,986 个点。在采样点云中添加标准差为 0.03mm 的随机噪声, 以模拟三维扫描仪随机测量误差。在点云中添加一处垂直于模型表面向外凸起的系统性误差, 作为模型加工误差, 凸起中心位置误差最大为 1.1mm 。点云与模型经 PCA 粗配准得到如图 3 所示的初始状态。对设计模型与目标点云分别应用经典 ICP、Huber 法 ICP 和 Butterworth ICP 配准, 结果见图 3。

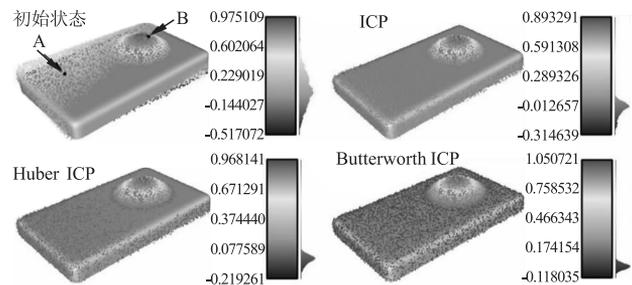


图3 初始状态及配准图像

选取观测点 A (位于平面上) 和观测点 B (位于凸起部位), 分别代表非加工误差点和加工误差点,

B 点实际偏差量为 0.96mm。记录它们在迭代过程中的权值变化、模型表面残差值变化、点云残差标准差变化以及残差平均值变化,将结果绘制于图 4 中。

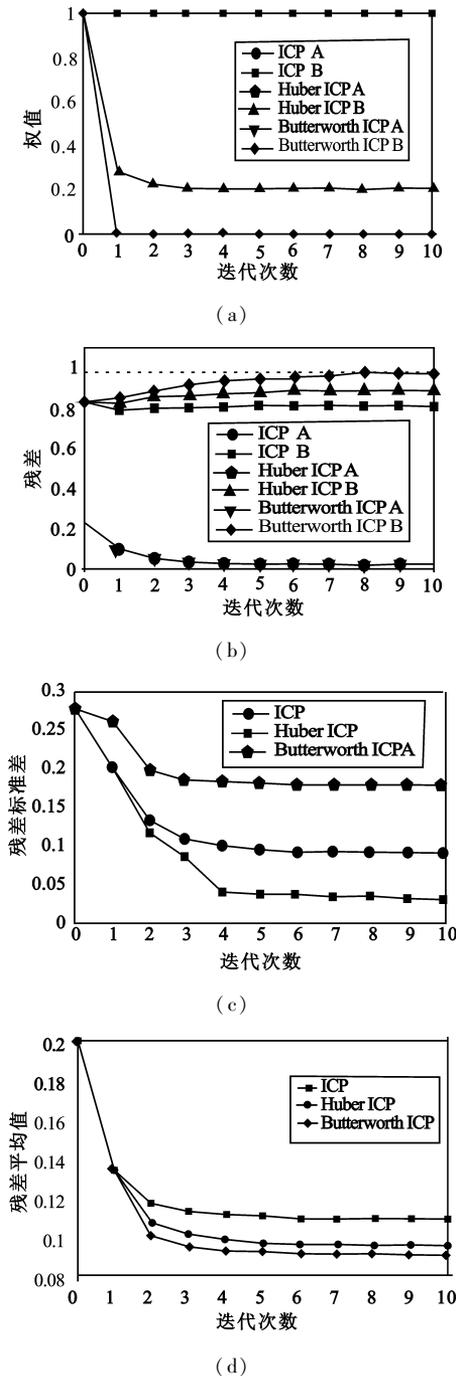


图 4 试验结果

由图 4a 和图 4b 可以看出,经典 ICP 不进行选权计算,因此 A、B 两点的权值始终为 1。对比 Huber ICP 与 Butterworth ICP,位于凸起上的观测点 B,其 Huber ICP 权值最终为 0.202,464,而 Butterworth ICP 中的权值最终降至 0.000,008,可见 Butterworth ICP 比 Huber ICP 能赋予误差点更小的权值,更能消

除误差点对配准结果的影响,迭代结束时 B 点与模型的偏差量更加接近实际误差值(0.96mm)。

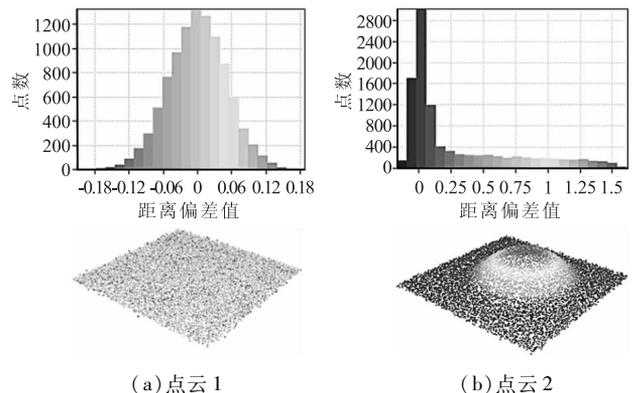
由图 4c 可以看出,经典 ICP 的配准结果具有较大误差,迭代收敛后的残差标准差仍然接近 0.18mm。对比 Huber ICP 与 Butterworth ICP,Huber 法始终没能将误差点权值完全降下来,直至收敛仍然对配准影响较大,致使收敛残差标准差依然接近 0.1mm;而 Butterworth ICP 收敛后残差标准差仅为 0.031,038mm,与采样点云中添加的随机误差(标准差为 0.03mm)相当。并且 Butterworth ICP 的残差平均值也始终低于 Huber 法,见图 4d。

试验表明,本文提出 Butterworth ICP 方法可以极大提高配准精度,最后的配准残差与点云自身的随机噪声水平相当,该配准方法能够克服加工误差对配准计算的不利影响,具有较强的鲁棒性。

4.2 正态分布假设性检验

为了验证误差检验与加工精度评价方法的正确性,采用四组采样点云与原模型进行比对检测。通过添加变形模拟加工误差的问题,增加不同程度的随机噪声,模拟加工精确性问题:点云 1 无变形,添加标准差为 0.05mm 的随机噪声,其距离偏差应为正态分布,模拟合格零件;点云 2 有较大凸起,最大偏差为 1.52mm,添加标准差为 0.05mm 的随机噪声,其距离偏差不符合正态分布,可以模拟在制造过程中存在较大加工误差的零件;点云 3 有均匀分布的细微变形,最大偏差为 0.29mm,添加标准差为 0.05mm 的随机噪声,其距离偏差不满足正态分布,可以模拟具有人工不易检测的细小加工误差的零部件;点云 4 无变形,添加标准差为 0.1mm 的随机噪声,其距离偏差虽然服从正态分布,但标准差较大,可以模拟加工粗糙的零件。

对以上 4 组数据分别进行比对检测,检测结果如图 5 所示。根据点到模型的配准残差对点云着色(下图),并得出残差直方统计图(上图)。



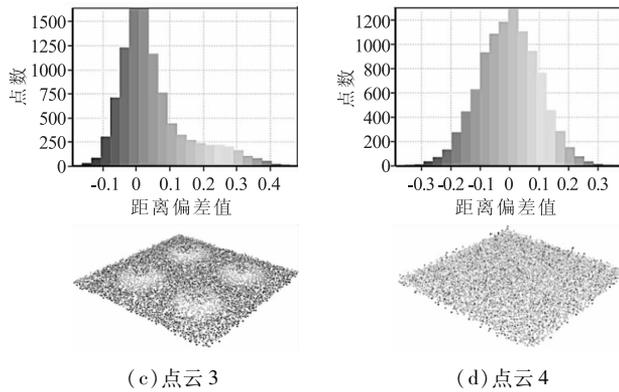


图5 对比检测结果

对4组检测结果进行正态分布的假设检验,预先设定显著水平 $\alpha=0.05$,检验结果如表1所示。

表1 检验结果

组别	点个数	预添加随机噪声标准差 σ	假设检验结果		合格性判定	
			标准差 σ	统计量 χ^2	临界值 χ^2_{α}	检验结果
1	9883	0.05	0.0501	30.233	32.671	通过
2	10066	0.05	0.4317	15816	32.671	不通过
3	9907	0.05	0.1054	3082.9	32.671	不通过
4	9975	0.10	0.1012	18.851	32.671	通过

假设检验统计量为 χ^2 ,可由式(12)计算得到。将其与样本大小为 n 时的临界值进行比较。如果 $\chi^2 < \chi^2_{\alpha}$,则接受 H_0 ,否则拒绝 H_0 。以此判断是否通过假设检验。

由表1可知,有突起变形的第2组和第3组无法通过假设检验,无论变形量大小与否都会改变检测的正态分布,该方法对加工误差引起的误差分布变化具有较强的敏感性;第1组与第4组没有发生变形,但加工精度不同;第4组较为粗糙,假设零件给定公差(即允许的加工精度)为0.2mm。采用公差界限检验方法进行精确度评价,其中,第1组的 $|3\sigma|=0.1503 \leq 0.2$,零件合格;第4组的 $|3\sigma|=0.3036 > 0.2$,零件不合格。

试验结果表明,本文提出的误差检验与加工精度评价方法能够实现量化的加工精度评价,可以用于零件合格性批量自动筛查。

5 结语

根据误差分布假设检验方法提出了一种快速判定零件表面是否存在加工误差的方法。按照预设的置信度,该方法不仅能自动识别(仅包含偶然误差的)合格零件点云与(存在加工误差的)不合格零件点云,而且能够在合格零件点云中进一步识别出加工精度超出限定公差的次品零件。

为了防止扫描点云与设计模型配准过程中误差点污染非误差点,根据选权迭代的思想对经典ICP算法进行改进,并设计了Butterworth选权函数。

试验表明,Butterworth ICP算法对加工误差部位的扫描点具有较强的鲁棒性,配准计算不会让加工误差分摊到无误差部位。通过与Huber选权法对比,Butterworth选权能够取得更精确的配准结果,Butterworth ICP算法能够有效解决存在局部变形的点云精确配准问题,能够有效减少质检人员目视检测的工作量。

参考文献

- [1] Richard W, Bono Micheal J, Dillon, 等. 用于模态和 NVH 试验的三维数字化坐标仪[J]. 振动、测试与诊断, 2001(4): 57-59, 65.
- [2] 季东兵. 汽车副车架三维数字化模型构建及检测[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- [3] 黄源, 达飞鹏, 陶海路. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 1-7.
- [4] 刘涛, 吴军, 王霞琴, 等. 复杂三维曲面涡旋零件的精度检测[J]. 机械制造, 2014, 52(8): 78-80.
- [5] 刘国超, 梁辉. 三维激光扫描技术在异形产品表面加工质量检测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2015(4): 47-51.
- [6] 黄伟国, 顾超, 朱忠奎. 用于目标识别的 PCA-SC 形状匹配算法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2103-2110.
- [7] 宋海峰, 陈广胜, 杨巍巍. 基于 PCA 的高光谱遥感图像分类[J]. 测绘工程, 2017, 26(12): 17-20, 26.
- [8] Paul J B, Neil D M. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [9] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images [J]. Image and Vision Computing, 1992, 10: 145-155.
- [10] Shun'ichi K, Tomonori K, Atsushi M. Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(9): 33-35.
- [11] 卞为梅. 假设检验在数据分析中的应用[J]. 中国质量, 2004(3): 79-81.

第一作者: 杨坤, 本科生, 河海大学地球科学与工程学院, 211100 南京市

First Author: Yang Kun, Undergraduate, School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China