

文章编号 1004-924X(2018)05-1219-12

## 回转形体点云的旋转轴线自动提取

李明磊\*, 李广云, 王 力

(信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 固体火箭发动机推力线的测定是航天器精密安装领域的一项关键技术,也是回转形体旋转轴线提取的一种代表性应用。针对现有相关方法存在的结果不够客观、可靠性不高且适应性欠缺等问题,提出了一种基于表面法矢约束的回转形体点云旋转轴自动提取方法。首先,计算形体点云的表面法矢,通过设置最小二乘法矢计算标准差阈值剔除非可靠点集,用以对旋转轴计算结果进行质量保证;然后,选用可靠点作为种子点,依据种子点同纬点集法矢之间的特殊关系对此点集进行筛选,并对提取的同纬点集进行平面拟合和空间圆拟合,得到旋转轴初值;最后,根据点云表面法矢与旋转轴之间的位置关系列出最小二乘平差的目标函数,通过迭代平差求解初值的改正数,从而得到最终的旋转轴提取结果。通过实验测试,利用模拟数据和实测数据对方法的准确度和精密度进行验证。实验结果显示:有效采样间隔点云的旋转轴提取结果偏斜量达到  $0.01^\circ$  以内,横移量达到  $0.02\text{ mm}$  以下,表明提出的方法正确,可以实现对回转形体点云旋转轴线的高可靠性自动提取。

**关键词:** 固体火箭发动机;推力线;旋转轴;点云;法矢

**中图分类号:** P258; TN16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1219

## Automatic extraction of rotation axis line from 3D scanned point cloud of rotational symmetric object

LI Ming-lei\*, LI Guang-yun, WANG Li

(School of Navigation and Aerospace Engineering,  
Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

\* Corresponding author, E-mail: mingleili\_xd@163.com

**Abstract:** Measurement of solid rocket nozzle thrust line is one of a key technique in the field of spacecraft precise installation and is a representative application of rotation axis line extraction of rotational symmetric object. Given that the existing methods have the problems such as nonobjective, poor reliability and low adaptability, an automatic solution for rotation axis extraction from 3D scanned high density of point cloud data was proposed, in which all the surface points and their normal vectors were utilized as constraints. Firstly, the normal vector of each point in point cloud was calculated and unreliable points were eliminated according to the standard deviation value of local planar fitting for normal vector calculation. Then, the initial value of rotation axis was achieved through planar and spherical fitting of reference points which had same latitude with the randomly selected reliable seed point. Finally, refinement result of rotation axis was calculated by solving the

收稿日期:2017-08-24;修订日期:2017-10-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41274014, No. 41501491)

objective function listed based on the relationship between normal vectors of each reliable point and the rotation axis. The test experiments were performed, and the accuracy and precision of the method were verified by simulated and measured data. The experimental results indicate that the deflection degree is under  $0.003^\circ$  and the transverse distance is under 0.02 mm, which satisfies the requirements of rotation axis extraction of rotational symmetric object.

**Key words:** rocket nozzle; thrust line; rotation axis; point cloud; normal vector

## 1 引言

作为一种较为先进的工业测量系统<sup>[1]</sup>,三维激光雷达在工业测量和工程测量的应用中有着其独特的优点,虽然不能像全站仪那样通过人为调整仪器照准目标点实现测角和测距,但扫描仪却可以覆盖式地获取目标区域的高密度点集<sup>[2]</sup>。对于类似工业测量领域中固体火箭发动机推力线的测定以及工程测量领域中隧道中轴线的测定等相关反求问题,由于此类几何直线特征为不直接体现在点云表面分布上且不可视的几何结构上存在的直线<sup>[3]</sup>,一般不能通过直接测定的方式来获取,因此全站仪等工业测量系统难以实现较理想有效的直接测定,一种较为有效的解决方案为通过拟合的方式进行获取,而扫描仪的覆盖式测量特点可为此类问题的处理提供数据保障。

本文针对母线未知的回转形体点云几何旋转轴线提取问题展开研究,具体结合固体火箭发动机推力线的提取问题对本文提出的方法进行描述和验证。固体火箭发动机是在远程导弹及包括卫星等航天器的发射与飞行中广泛应用的推进设备<sup>[4-5]</sup>,通过燃料燃烧经过尾喷管向后喷火产生向前的反推力,从而实现对火箭机体的推进<sup>[6]</sup>。发动机推力的方向矢量称为推力线,理论上与其喷管喉颈与尾喷管口端面中心的连线重合,发动机尾喷管在设计上为回转形体,一般认为其尾喷管几何旋转轴与其推力线重合。然而,受加工精度及形变等因素的影响,实际落成之后的发动机推力线会产生横移与偏斜<sup>[7]</sup>,导致发动机会做部分无用功并且影响火箭飞行轨道,因此,对发动机的推力线进行精确测定具有十分重要的研究意义。

目前已有的旋转轴线测定方法主要可总结为:直接测定法、截面圆测定法、曲面拟合提取法、基于表面信息的提取法和基于投影区域中线的提取法等。直接测定法以发动机推力线的分力动态

测试法<sup>[8-9]</sup>为代表,通过从力学角度测量发动机点火时的若干分力,经过力的合成得到发动机的推力矢量(即旋转轴方向矢量)。这种方式成本较高,并且受测力传感器的个数及分布的影响较大。截面圆测定法主要有端面截面圆法<sup>[10-11]</sup>和平行截面圆法<sup>[11-14]</sup>等类型;端面截面圆测量法利用电子经纬仪<sup>[10]</sup>或激光跟踪仪<sup>[11]</sup>等工业测量系统测量回转形体前后某些成对的端面部位(如发动机的前后裙端面),得到截面圆上点的三维坐标数据,然后通过空间圆拟合得到截面圆圆心坐标,最后以连接前后两个截面圆圆心的空间直线作为旋转轴测量结果;平行截面圆测量法通过测量与参考平面平行的若干截面圆<sup>[12]</sup>,或者首先利用可覆盖式测量的仪器设备(如坐标测量机<sup>[13]</sup>、激光跟踪仪或激光雷达<sup>[14]</sup>等)获取回转形体表面完整的坐标点数据,根据预先选定的参考截面按照一定间隔截取与其平行的若干截面圆进行空间圆拟合,然后对各截面圆圆心的连线进行直线拟合得到旋转轴。该类方法测量结果的精度受待测端面或参考截面的选用等为因素影响较大,使得其结果不够客观,可靠性不足。曲面拟合提取法利用覆盖式测量得到的点云数据为基础,依据已知的回转形体曲面设计类型(母线已知)进行曲面拟合以获取旋转轴<sup>[15]</sup>,此方法在曲面拟合时曲面方程的阶数不易确定,并且在高阶非线性方程的线性化中会丢失一定精度<sup>[11]</sup>,拟合结果一般只能用到一部分内表面点,同样达不到较高的可靠性。基于点云表面信息的提取法在计算法矢的基础上利用法矢与旋转轴之间关系或回转形体法矢的特性等信息对旋转轴进行提取;文献<sup>[16]</sup>针对母线造型未知的点云,首先将点云中各点的主方向投影到高斯球面,通过对高斯球面点的分布密集度统计、筛选与拟合得到参考平面,将参考平面的法矢作为旋转轴的方向矢量,将点云各点的法矢在此参考平面上投影线的交点作为旋转轴定位点。点云表面曲率属于较高阶的曲面特征,其计算方式

一般依托点邻域的邻域进行高阶曲面拟合得到,计算结果受点邻域范围的选用影响较大,从而此类依据点云主方向的高斯投影方式不一定可以得到满意的参考平面从而影响旋转轴的提取结果。文献[17]针对圆柱状分布的隧道点云,成对选取相互接近垂直的法矢求外积,并将多对法矢外积的平均值作为中轴线的方向矢量;文献[18]针对圆柱状分布的隧道点云采用分段处理的策略,首先将点云的法矢作为三维点坐标投影到高斯球面,投影点集呈现圆弧分布,将拟合圆弧面得到的平面法矢作为隧道中轴线的方向矢量,利用垂直此方向矢量的截面截取隧道断面点,以断面点的坐标平均值作为隧道在此处中轴线的定位点。这类基于法矢相交的旋转轴提取法一般只适用于圆柱状分布的回转形体点云。基于点云二维投影区域中线的提取法根据回转形体点云分布的先验信息将点云沿多个方向投影到投影基准面上,然后将二维投影作为图像按照图像相关数据处理方法进行处<sup>[19-20]</sup>;文献[21]将隧道点云分别投影到点云分布区域的底面和侧面平面上,提取投影区域的两条边界点进行 RANSAC 拟合得到边界线,将一条边界线上的点沿其法线方向与对面边界线求交点,这两点连线的中点作为中轴线点候选点,将底面和侧面两个面得到的候选中轴线点求平均值,再将得到的这一系列平均候选中轴线点进行中轴线拟合,得到最终的中轴线;文献[22]采用了同样的基于投影边界线提取隧道点云中轴线的方式;类似的,文献[23]首先将点云分别投影到点云分布区域的底面和侧面平面上,然后沿点云的延伸方向求取一个小递增区间内投影区域的最大、最小和中间值,之后对中间值点进行拟合得到中轴线。这类基于投影区域中线的提取方法同上述基于法矢的旋转轴提取法一样,仅针对圆柱状回转形体分布的点云。

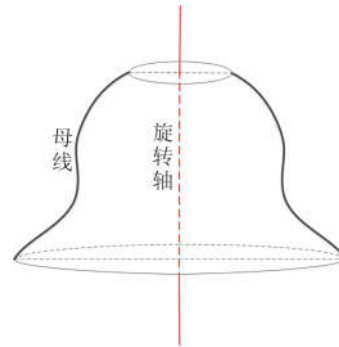
针对现有的旋转轴提取方法存在的问题,本文依托点云表面法矢构建旋转轴线拟合的目标函数,通过平差迭代求解,致力于实现一种适应面广、高可靠性及高精度的旋转轴自动化提取方法。

## 2 旋转轴的自动提取方法

### 2.1 方法概述

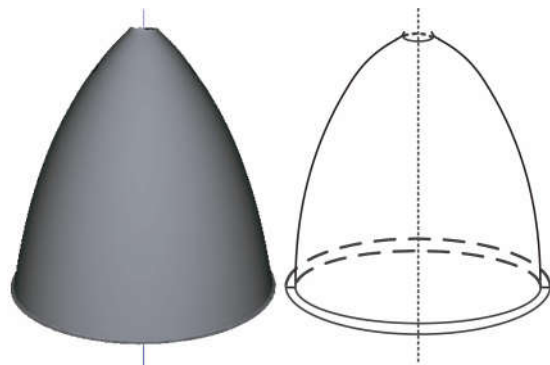
图 1(a)所示为回转形体的结构示意图,由母

线围绕其旋转轴旋转 360°生成,图 1(b)所示为采用高精度三维激光雷达获取的某固体火箭发动机尾喷管内表面的高密度三维点云数据,并同时给出了其对应示意图,算法的流程如图 2 所示。



(a) 回转形体示意图

(a) Sketch map of some rotary symmetric object



(b) 发动机尾喷管点云及其示意图

(b) Point cloud of rocket nozzle and its sketch map

图 1 回转形体

Fig. 1 Rotary symmetric object

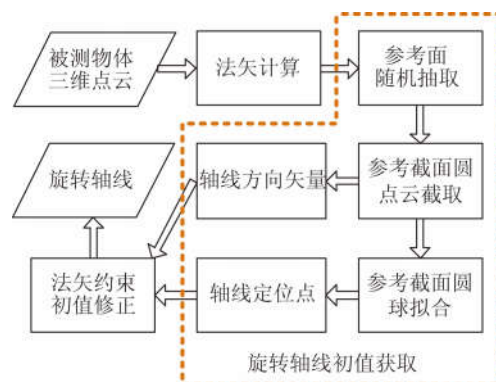


图 2 算法流程示意图

Fig. 2 Algorithm procedure

## 2.2 表面法矢的精确计算

点云的法矢(曲面在各点处切平面的法矢)为其表面的低阶信息,相比曲率的计算更容易得到准确的结果。直接依托各点的邻域计算得到的法矢存在二值性(相邻点的法矢朝向可能相反)和分布变化不连续性,并且受点分布疏密和邻域选用范围等因素的影响<sup>[24-25]</sup>,其精确计算需要一个质量保证和质量控制体系,本文采用的法矢精确计算的步骤如下:

Step1:质量保证。对测量得到的点云数据进行预采样使点云分布均匀,预采样的意义和效果在文献[24]中已有较详细的论述;

Step2:法矢计算。根据每个点的邻域点集,采用最小二乘平面拟合,计算各点处的表面法矢,拟合计算可得到各点处的切平面方程和拟合标准差;

Step3:质量控制。利用邻域传递的方式解决法矢计算结果的二值性问题,根据各点的邻域点法矢的分布,采用双边滤波器对法矢分布及变化的连续性进行调整<sup>[24]</sup>。

通过以上步骤,可以得到较为精确的法矢计算结果,为下一步旋转轴提取算法的执行提供高精度的输入数据。

## 2.3 旋转轴线初值的计算

本文将旋转轴定义为一个定位点  $O$  加一个方向矢量  $\mathbf{n}$  的方式表示,即可用二元组表示,此二元组的初值采用参考平面的法矢加上对应参考截面的圆心来表示:

$$\tau l = (O, \mathbf{n}). \quad (1)$$

在获取参考平面的方式上,现有相关方法一般采用人工选定的方式,本文提出了一种更为客观参考平面自动获取的新思路,首先选取种子点,判断余点与此种子点之间的法矢之间的关系并依据一定准则筛选出同纬点集(其定义为过种子点垂直于旋转轴的平面与回转形体交线上的点集,为圆环数据,如图 3(彩图见期刊电子版)中蓝色线条;同经点集定义为种子点和旋转轴的平面与回转形体交线上的点集,如图 3 中绿色线条),进而将同纬点集平面拟合结果作为旋转轴的方向矢量,将同纬点集的球心拟合结果作为旋转轴的定位点,具体描述如下文。

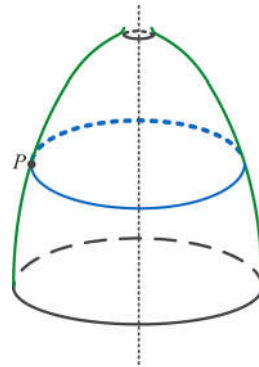


图 3 点  $P$  的同纬点集(蓝色)与同经点集(绿色)定义示意  
Fig. 3 Points which have same latitude (in blue) and longitude (in green) with point  $P$

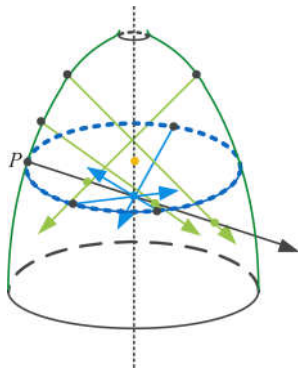
本文算法针对的是三维激光雷达实测得到的点云数据,作为一种测量数据,不可避免会包含测量误差,在类似隧道等目标场景中也会难免会获取各种非隧道面点,这些都会对拟合计算的结果产生影响,为此,首先考虑进行不可靠点的剔除。在点云表面法矢计算时可以同时得到各点处局部平面拟合的标准差,这里将标准差大于极限误差(3 倍于标准差的平均值)的点作为非可靠点,不参与后期的拟合计算,非可靠点的识别效果如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。



图 4 非可靠点筛选结果(红色点)  
Fig. 4 Filtering result of unreliable points (in red)

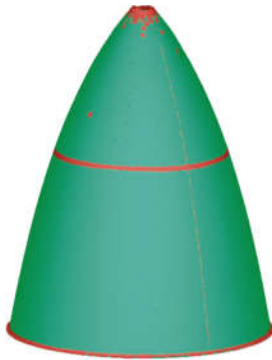
剔除非可靠点后剩余的点集为可靠点集,从可靠点集中选取点云中局部平面拟合标准差最小的点  $P$  作为种子点,遍历可靠点集判断各点与  $P$  点法矢的相交性。对于圆柱体,与种子点法矢相交的点集仅包含同纬点集;而对于非圆柱回转形体,与种子点法矢相交的点包含了其同经点集和同纬点集,如图 5(a)所示,不同于同经点集,同纬点集与  $P$  点法矢相交于同一点,为了得到参考平

面,需要从与种子点法矢相交点集中分离出同纬点集,考虑到同纬点集分布在圆环上,点  $P$  与其同纬点  $P'$  以及两点的法矢的交点  $O'$  构成等腰三角形  $\triangle O'P'P$ ,即图 6(a)中  $\alpha_1$  应等于  $\alpha_2$ ,而同经点  $P''$  对应的  $\beta_1$  和  $\beta_2$  不满足相等条件,故通过此等腰三角形判断准则的筛选即可得到种子点的同纬点集(如图 6(b)所示)。本文将同纬点集的平面拟合结果作为参考平面。



(a)与种子点法矢相交点示意

(a)Sketch map of intersecting normal vector lines

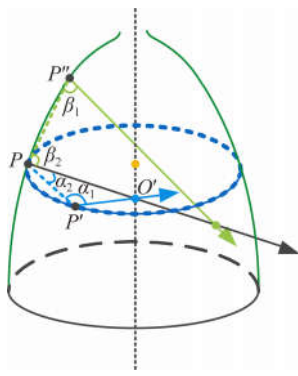


(b)与种子点法矢相交点集筛选结果

(b)Filtering result of such points

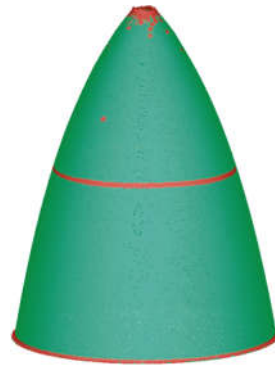
图 5 与种子点  $P$  法矢相交的点集

Fig. 5 Points of normal vector lines are intersecting with that of the seed point  $P$



(a)等腰三角形判定原则

(a)Isosceles triangle condition



(b)种子点的同纬点集筛选结果

(b)Filtering result of such points

图 6 同纬点集的筛选

Fig. 6 Filtering method of points which have same latitude with seed point  $P$

设种子点的同纬点集为  $\{P_i = [x_i \ y_i \ z_i], i \in (1, 2, \dots, k)\}$ , 对其进行平面拟合, 得到参考平面法矢  $\mathbf{n} = (a, b, c)$ , 将其作为式(1)中  $\mathbf{n}$  的初值, 将圆环的圆心作为式(1)中  $O$  的初值。由于同纬点集为截面圆环数据, 直接用于球拟合不能得到准确的球心位置, 本文将球心约束在拟合出的平面上, 进而利用同纬点集进行附加约束的最小二乘球面拟合进行圆环圆心的求解。

设未知参数中球心坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 球半径为  $r$ , 已知球面上的任意点为  $(x, y, z)$ :

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k]^T,$$

$$\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k]^T,$$

$$\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_k]^T,$$

则球面方程为:  $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$ , 即:

$$-2x \cdot x_0 - 2y \cdot y_0 - 2z \cdot z_0 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2) + (x^2 + y^2 + z^2) = 0.$$

以变量  $R$  代替  $(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2)$ , 则可列误差方程:

$$\mathbf{V} = -2x_0 \mathbf{X} - 2y_0 \mathbf{Y} - 2z_0 \mathbf{Z} + R + (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} + \mathbf{Z}^T \mathbf{Z}),$$

设待求参数  $\hat{\mathbf{X}} = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ R]^T$ , 则:

$$\mathbf{V} = [-2\mathbf{X} \ -2\mathbf{Y} \ -2\mathbf{Z} \ I] \cdot \hat{\mathbf{X}} - (-\mathbf{X}^T \mathbf{X} - \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \mathbf{Z}^T \mathbf{Z}) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L}, \quad (2)$$

约束条件为  $ax_0 + by_0 + cz_0 + d = 0$ , 即:

$$[a \ b \ c \ 0] \cdot \hat{\mathbf{X}} + d = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{W} = 0. \quad (3)$$

根据具有约束条件的参数平差原理<sup>[26]</sup>, 可解得:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}} = -\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{B}^T \mathbf{K} - \mathbf{U}) \\ \mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}, \mathbf{U} = \mathbf{A}^T \mathbf{L}, \\ \mathbf{K} = (\mathbf{B} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{W} + \mathbf{B} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{U}^T) \end{cases}, \quad (4)$$

从而可解得球心坐标  $(x_0, y_0, z_0)$ , 以定位点  $O = (x_0, y_0, z_0)$  和单位方向矢量  $\mathbf{n} = (a, b, c)$  即可表示出旋转轴的方程式(1)。

### 2.4 旋转轴线初值的修正

上述方法得到的发动机推力线初值的精度受提取(选取)的喷管口端面边线点的影响较大, 结果也是不可靠的, 需要进一步提高其精度。发动机喷管内表面属于旋转对称形体, 理想状态下, 其表面点云各点的法矢应都能与其旋转轴相交(如图 7 所示), 而实际情形是每条法矢与旋转轴(推力线)构成的一对直线之间往往有一定间距(属异面直线), 如图 8 所示。

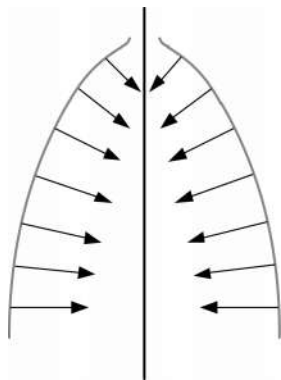


图 7 法矢与推力线之间关系

Fig. 7 Relationship between normal vector and thrust line

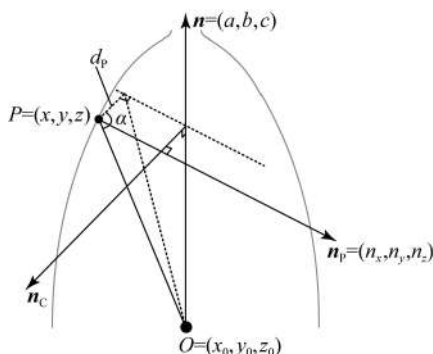


图 8 法矢与推力线构成异面直线

Fig. 8 Skew lines formed by normal vector and thrust line

设点云中一点  $P = (x, y, z)$ , 其法矢为  $\mathbf{n}_p =$

$(n_x, n_y, n_z)$ ,  $\mathbf{n}_p$  与  $\mathbf{n}$  的外积为  $\mathbf{n}_c = \mathbf{n}_p \times \mathbf{n}$ , 设  $\mathbf{n}_c$  与  $(P-O)$  的夹角为  $\alpha$ , 则  $\mathbf{n}_p$  与  $\mathbf{n}$  之间的异面距离为:

$$d_p = \|P-O\|_2 \cdot \cos \alpha = \frac{(P-O) \cdot \mathbf{n}_c}{\|\mathbf{n}_c\|_2}, \quad (5)$$

将点云中所有点(个数为  $n$ )的法矢与  $\mathbf{n}$  构成的异面直线之间的距离列为列向量:

$$\mathbf{D} = [d_{p_0} \quad d_{p_1} \quad \cdots \quad d_{p_n}]^T,$$

根据最小二乘原理, 则旋转轴方程式(1)应满足:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^n d_{p_i}^2, \quad (6)$$

即  $\mathbf{D}^T \mathbf{D} = \min$ 。将各向量值代入式(5)后即可得到  $d_p$  关于待求解变量:

$$\mathbf{X}_\Delta = [x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad a \quad b \quad c]^T$$

的非线性函数, 对其进行线性化可得误差方程:

$$v = \frac{\partial d_p}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial d_p}{\partial y_0} \delta y_0 + \frac{\partial d_p}{\partial z_0} \delta z_0 + \frac{\partial d_p}{\partial a} \delta a + \frac{\partial d_p}{\partial b} \delta b + \frac{\partial d_p}{\partial c} \delta c - d_{p_0}, \quad (7)$$

式(7)中  $d_{p_0}$  为将  $(x_0, y_0, z_0, a, b, c)$  的初值代入式(5)得到的  $d_p$  初值。利用式(7)计算待求解变量的改正量:

$$\Delta \mathbf{X}_\Delta = [\delta x_0 \quad \delta y_0 \quad \delta z_0 \quad \delta a \quad \delta b \quad \delta c]^T,$$

将式(7)扩展到所有点  $\{P_i = [x_i \quad y_i \quad z_i], i \in (1, 2, \dots, k)\}$  得:

$$\mathbf{V}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{X}_\Delta} \cdot \Delta \mathbf{X}_\Delta - \mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial x_0} & \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial y_0} & \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial z_0} & \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial a} & \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial b} & \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial c} \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{X}_\Delta - \mathbf{D}_0, \quad (8)$$

$(x_0, y_0, z_0)$  的值仅在垂直于旋转轴方向上对旋转轴的提取精度产生影响作用, 但为避免其沿旋转轴方向的随机变化, 对上述误差方程附加约束条件:

$$\begin{cases} a(x_0 + \delta x_0) + b(y_0 + \delta y_0) + c(z_0 + \delta z_0) + d = 0 \\ ((a + \delta a)^2 + (b + \delta b)^2 + (c + \delta c)^2)^{\frac{1}{2}} = 1 \end{cases}. \quad (9)$$

依据附加约束条件的参数平差理论, 参照式(2)~(4)的解算思路, 附加式(9)约束条件平差求解式(8)得到待求解变量的改正量  $\Delta \mathbf{X}_\Delta$ , 从而对旋转轴提取的初值进行修正, 得到更为准确的旋转轴提取结果。

为了得到更为稳定的结果, 将上述平差过程得到的修正结果  $(\mathbf{X}_\Delta + \Delta \mathbf{X}_\Delta)$  再次作为初值代入式(8)进行平差求解, 迭代直至前后两次提取出的

旋转轴方向矢量间夹角小于阈值。

### 3 实验验证

为验证本文提出的基于表面法矢约束的回转形体点云旋转轴线提取方法,首先采用旋转轴已知的模拟旋转对称形体点云数据对算法的准确度进行验证,之后采用高密度的实测某固体火箭发动机点云数据对算法的精密度进行验证。

#### 3.1 准确度验证

图 9 所示模拟数据为从旋转轴为  $z$  轴的旋转抛物面上提取的点云,通过法矢计算(选用  $k$  邻域,  $k=30$ )→参考平面的自动选取→平面和圆弧拟合粗提取→迭代法矢约束精提取,得到的旋转轴计算结果如表 1 所示,其中修正的结果是在初值的基础上,在  $n_x$  和  $n_y$  值中分别加入  $1^\circ$  误差后再

采用本文修正方法计算得到的结果。模拟实验结果表明,本文提出的旋转轴线提取方法具有较好的准确性,即使初值存在较大偏差,修正算法仍可以收敛到准确的结果。

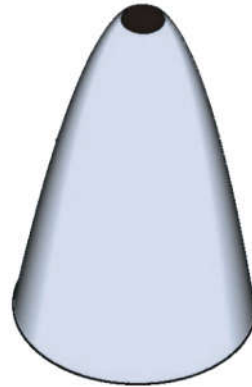


图 9 模拟旋转抛物面数据  
Fig. 9 Simulated point cloud of rotating paraboloid

表 1 模拟旋转抛物面旋转轴提取结果

Tab. 1 Rotating axis extraction result of simulated data

方法	定位点 O 坐标( $\times 10^{-3}$ m)			方向矢量( $\times 10^{-3}$ )			与真值夹角/ $^\circ$	与真值距离/mm
	$x$	$y$	$z$	$n_x$	$n_y$	$n_z$		
初值	0.140	0.008	-2.195	1.807	0.102	999.998	0.114 591	0.161
修正	0.000	0.000	-2.195	0.000	0.001	999.999	0.000 062	0.000
真值	0.000	0.000	-2.195	0.000	0.000	1 000.000	—	—

#### 3.2 精密度验证

本组实验采用 Creaform HandySCAN 3D™ 手持式三维扫描仪(如图 10(a)所示)对某尺寸的发动机尾喷管内表面进行两次不同初始扫描角度的高覆盖率扫描(如图 10(c)所示),第一次扫描获取的

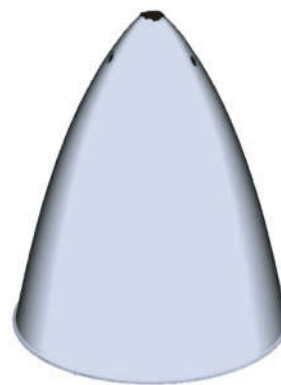
点云(Data1)包含 4 699 505 个点,平均点间距为 0.174 mm,厚度为 0.054 mm(根据局部最小二乘平面拟合标准差计算得到,反应扫描测量精度),第二次扫描获取的点云(Data2)包含 4 670 813 个点,平均点间距为 0.177 mm,厚度为 0.055 mm。



(a)Creaform HandySCAN 3D™ 扫描仪  
(a)Creaform HandySCAN 3D™ 3D scanner



(b)测量场景  
(b)Measurement scene



(c)测量结果  
(c)Measurement result

图 10 实测数据

Fig. 10 Measured data

为验证算法的稳定性,对前后两次扫描测量获取的点云分别进行不同间隔的采样,并对比采样后计算结果间的差异,其中各组数据采用同样的参考平面进行计算。两组点云采用不同采样间隔计算得到的发动机推力线方向矢量与坐标轴之间的夹角如表 2 所示,其中点云序号 1 均对应采用原始无采样点云计算的结果,其中点邻域选用  $k$  邻域,并且  $k=30$ 。

图 11 所示为表 2 推力线计算结果中推力线

方向矢量与各坐标轴间夹角的统计图,从图中可以看出,当采样间隔在  $0.5\sim 1.5$  mm 之间时,本文方法可以得到较为稳定的推力线计算结果。点间隔过小容易导致点云各点的  $k$  邻域聚集在很小的范围,从而不能真实反映被测物体的面状表面特性,过大采样间隔也会使激光雷达的高密度数据采集特性失去意义,并且容易使点云各点的  $k$  邻域分布范围过大,从而不能真实反映被测物体的局部面状表面特性。

表 2 第 1 组实测发动机喷管口点云推力线提取结果

Tab. 2 Trust line extraction result of the first scan

点云序号	采样间隔/mm	旋转轴与坐标轴夹角/(°)					
		Data1			Data2		
		$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
1	—	100.782 1	96.868 4	12.828 5	95.340 7	107.551 2	18.396 8
2	0.3	100.754 2	96.860 8	12.800 6	95.335 1	107.563 8	18.407 1
3	0.4	100.754 9	96.847 6	12.794 0	95.323 1	107.577 2	18.416 4
4	0.5	100.755 6	96.843 4	12.792 2	95.320 5	107.588 8	18.426 7
5	0.6	100.757 4	96.840 3	12.792 1	95.317 2	107.598 7	18.435 2
6	0.7	100.757 9	96.838 1	12.791 3	95.315 6	107.601 7	18.437 6
7	0.8	100.756 6	96.839 5	12.791 0	95.314 9	107.607 1	18.442 5
8	0.9	100.759 2	96.837 7	12.792 2	95.315 2	107.606 5	18.442 1
9	1.0	100.762 8	96.837 0	12.794 8	95.316 5	107.609 7	18.445 5
10	1.1	100.757 8	96.839 5	12.792 0	95.317 4	107.608 6	18.444 7
11	1.2	100.762 3	96.837 8	12.794 9	95.320 0	107.608 9	18.445 9
12	1.3	100.764 0	96.838 0	12.796 4	95.319 8	107.609 1	18.446 0
13	1.4	100.763 1	96.838 5	12.796 0	95.322 8	107.606 9	18.444 8
14	1.5	100.766 6	96.839 3	12.799 4	95.322 3	107.604 8	18.442 6
15	2.0	100.764 5	96.846 0	12.801 2	95.334 5	107.595 7	18.437 6
16	2.5	100.754 0	96.855 2	12.797 4	95.346 6	107.582 7	18.428 8
17	3.0	100.766 4	96.865 7	12.813 7	95.359 3	107.573 5	18.424 0

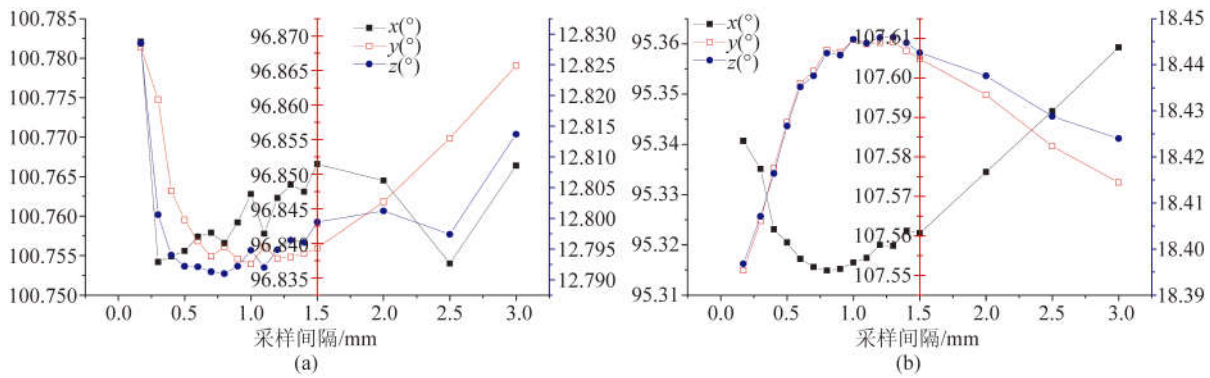


图 11 点云不同采样间隔得到的方向向量与三坐标轴之间夹角

Fig. 11 Intersection angles between thrust line direction vectors and the three coordinate axes under different sampling rates

统计采样间隔 0.5~1.5 mm 之间计算得到的推力线方向向量与 3 个坐标轴之间的夹角标准差,如表 3 所示,其结果表明,在有效采样间隔 0.5~1.5 mm 之内,两组数据采用多个采样间隔获取的推力线提取结果与 3 个坐标轴夹角的最大标准差分别为 0.003 6°和 0.006 2°,满足推力线偏斜的 0.05°重复提取精度<sup>[15]</sup>要求。

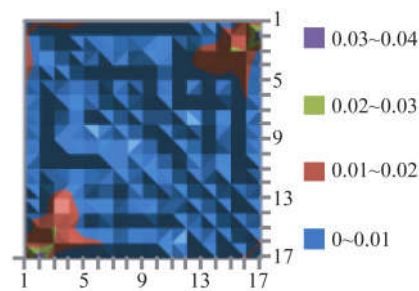
表 3 有效采样范围得到的提取结果与坐标轴夹角的标准差  
Tab. 3 Standard deviation of the angles between thrust line extraction results under valid sampling rates and the three coordinate axes (°)

数据编号	x 轴	y 轴	z 轴
1	0.003 6	0.001 8	0.002 7
2	0.002 8	0.006 2	0.005 9

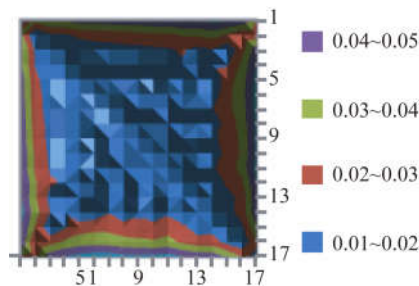
统计 17 组不同分辨率推力线提取结果之间的横移量可以得到一个 17×17 维的对称方阵,将两组数据对应的横移量方阵分别显示如图 12 所示。从图中结果可以看出,在有效采样间隔 0.5~1.5 mm 之内不同采样间隔提取得到的推力线之间的横移量基本在 0.01 mm 以下,满足推力线横移的 0.1 mm 重复提取精度<sup>[15]</sup>要求。

### 3.3 实验对比

为进一步验证本文算法的稳定性,本组实验与固体火箭发动机推力线测量领域中具有行业代表性的平行截面圆法进行对比,并选用图形图像领域中基于主方向的旋转轴提取算法<sup>[16]</sup>进行对比,实验选用 Data1 3 种不同采样间隔的点云作为输入,3 种算法对每种数据分别共同采用 6 个人工随机选用的参考平面进行解算,如图 13 所示,选用的部分参考平面较为极端地存在较大偏差(>10°)。



(a)第 1 组数据统计结果  
(a)Result of the first scan



(b)第 2 组数据统计结果  
(b)Result of the second scan

图 12 不同采样间隔提取推力线结果之间的横移量  
Fig. 12 Transverse distances between thrust line extraction results under different sampling rates

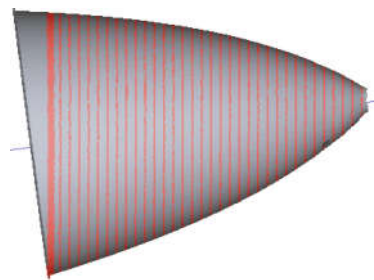


图 13 较为极端的参考平面选用情况以及其平行截面圆  
Fig. 13 Side view of a harsh reference plane (the bold line) and its parallel cross-section circles

统计 3 种算法针对 3 种不同采样间隔的点云分别采用 6 种人工选用的参考平面得到的推力线提取结果与坐标轴夹角的标准偏差如表 4 所示。从表 4 所示的统计结果可知,本文算法在参考平面存在较大偏差时的提取结果仍可满足推力线偏

斜的  $0.05^\circ$  重复提取精度要求,具备较高的可靠性,虽然文献[16]基于主方向的方法同样不受参考平面选用的影响,但由于采用了难以准确计算的高阶曲面曲率信息,其结果的精密度低于本文算法。

表 4 对比实验结果统计

Tab. 4 Statistic result of comparative experiments

		旋转轴提取结果与坐标轴夹角/ $^\circ$								
采样间隔/mm		平行截面圆法			主方向法			本文方法		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
标准差	1.0	0.061 1	0.096 9	0.029 8	0.020 3	0.011 8	0.015 4	0.004 4	0.002 2	0.003 2
	1.2	0.052 5	0.025 4	0.035 1	0.019 9	0.031 3	0.047 5	0.003 4	0.003 8	0.003 0
	1.5	0.100 5	0.142 7	0.026 5	0.049 7	0.022 5	0.029 6	0.006 4	0.003 3	0.004 7
平均标准差		0.071 4	0.088 3	0.030 5	0.030 0	0.021 8	0.030 8	0.004 7	0.003 1	0.003 6

## 4 结 论

本文以回转形体点云旋转轴线提取为研究对象,具体结合固体火箭发动机的推力线提取,提出一种利用点云表面点法矢对提取结果进行约束的旋转轴提取方法。该方法的主要思路为:在对点云表面法矢进行精确计算的基础上,根据点与点之间法矢的相关关系实现同纬点集的筛选,进而得到旋转轴初值,最终根据点云表面法矢与旋转轴之间的相关关系对初值进行修正。通过模拟数据和实测数据的实验验证,表明该方法具有较高

的准确度和精密度,为相关逆向工程应用提供了一种新的高可靠性解决方案。

本文算法的局限性主要在于:由于需要计算点云表面法矢,并依据法矢进行旋转轴线的提取,因此处理结果易受法矢计算结果的制约;由于依据点与点之间的法矢关系进行同纬点集的选定,在母线特别复杂的情形中可能会导致错误的参考平面选定结果。

该方法相比现有旋转轴提取方法的优点在于:参考平面依托于种子点的同纬点集获取,避免了人工参与,并且在修正算法中几乎每个可靠点的法矢都参与约束运算,具有较高的可靠性优势。

## 参考文献:

- [1] 李广云,李宗春. 工业测量系统原理与应用 [M]. 北京:测绘出版社, 2011.  
LI G Y, LI Z CH. *Principles and Applications of Industrial Measuring Systems* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 李明磊,高欣圆,李广云,等. 地面三维激光扫描仪与外架数码相机间安置参数的高精度标定 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2158-2166.  
LI M L, GAO X Y, LI G Y, *et al.*. High accuracy calibration of installation parameters between 3D terrestrial laser scanner and external-installed digital camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2158-2166. (in Chinese)
- [3] 李明磊,宗文鹏,李广云,等. 基于体素生长的点云结构直线段提取 [J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0112001.  
LI M L, ZONG W P, LI G Y, *et al.*. Extraction of structure line segments from point clouds using voxel-based region growing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112001. (in Chinese)
- [4] 王世光,蒋太飞,田义宏. 飞航导弹固体火箭发动机技术进展 [J]. 飞航导弹, 2006(6): 47-50.  
WANG SH G, JIANG T F, TIAN Y H. Progress of winged missile solid rocket engine technology [J]. *Winged Missiles Journal*, 2006(6): 47-50. (in Chinese)

- [5] 李学焕,李俊,王立新,等.月球着陆探测器发动机推力线测量及标定[J].火箭推进,2013,39(6):85-89.  
LI X H, LI J, WANG L X, *et al.*. Measurement and calibration of thrust line of lunar lander engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2013, 39(6): 85-89. (in Chinese)
- [6] KUENTZMANN P. Introduction to solid rocket propulsion [R]. RTO-EN-023, 2004: 27-31.
- [7] 来平安,田维平,余贞勇,等.固体火箭发动机推力线横移和偏斜模拟计算[J].固体火箭技术,1999,22(1):35-38.  
LAI P A, TIAN W P, YU ZH Y, *et al.*. Simulation calculation of the misalignment and deflection of thrust-line of solid rocket motor [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(1): 35-38. (in Chinese)
- [8] 费涛,曲继和,翟江源,等.基于磁悬浮试验架的固体火箭发动机侧向力测量研究[J].固体火箭技术,2005,28(4):308-311.  
FEI T, QU J H, ZHAI J Y, *et al.*. Measurement research on side force of solid rocket motor based on magnetic suspension test fixture [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005, 28(4): 308-311. (in Chinese)
- [9] 陈修平.月面软着陆火箭发动机推力矢量测试系统研究[D].大连:大连理工大学,2013.  
CHEN X P. *Research on thrust vector measurement system for a lunar soft-landing rocket motor* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] QJ 3237-2005 固体火箭发动机几何推力线偏斜和横移测量方法[S]. 2005.  
QJ 3237-2005 Measurement method for geometrical thrust deviation and off-set of solid rocket motor [S]. 2005. (in Chinese)
- [11] 张春富.基于激光跟踪仪的固体火箭发动机推力线测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
ZHANG CH F. *Study on the measuring technique of thrust line of solid rocket motor with laser tracker* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 王志军.基于激光雷达测量原理的火箭推力线测量技术研究[D].长春:长春理工大学,2011.  
WANG ZH J. *Research on measurement technology of rocket thrust line based on the measurement principle of laser radar* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 李伟森,李蕾,杜昌达.发动机推力线快速测量方法研究[J].宇航计测技术,2012,32(5):56-60.  
LI W S, LI L, DU CH D. Research on a fast measurement method of engine thrust line [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(5): 56-60. (in Chinese)
- [14] LI L J, REN J J, YANG X, *et al.*. Study on digitized measuring technique of thrust line for rocket nozzle [J]. *Precision Instrument and Mechanology*, 2014, 3(1): 153-158.
- [15] 陶力,杨再华,阮国伟,等.基于激光雷达的卫星发动机精度测量方法[J].航天器环境工程,2013,30(3):328-331.  
TAO L, YANG Z H, RUAN G W, *et al.*. Alignment precision measurement method of satellite engine based on laser radar [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(3): 328-331. (in Chinese)
- [16] 柯映林,李岸.基于主方向高斯映射的旋转面特征提取[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(6):942-946.  
KE Y L, LI A. Rotational surface extraction based on principal direction Gaussian image from point cloud [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(6): 942-946. (in Chinese)
- [17] 汪子豪.从隧道三维点云中自动截取断面轮廓的方法[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):47-52.  
WANG Z H. Automatic tunnel section cutting method by using 3D laser scanning point clouds [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(2): 47-52. (in Chinese)
- [18] 蓝秋萍,洪超,林欢,等.从三维点云中自动提取隧道几何特征线[J].测绘工程,2015,24(10):1-4,10.  
LAN Q P, HONG CH, LIN H, *et al.*. Automatic extraction geometric feature lines in the tunnel from 3D point cloud [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(10): 1-4, 10. (in Chinese)
- [19] HAN S, CHO H, KIM S, *et al.*. Automated and efficient method for extraction of tunnel cross sections using terrestrial laser scanned data [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, 27(3): 274-281.
- [20] KANG ZH ZH, ZHANG L Q, TUO L, *et al.*. Continuous extraction of subway tunnel cross sections based on terrestrial point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(1): 857-879.
- [21] 托雷,康志忠,谢远成,等.利用三维点云数据的

- 地铁隧道断面连续截取方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(2): 171-175, 185.
- TUO L, KANG ZH ZH, XIE Y CH, *et al.*. Continuously vertical section abstraction for deformation monitoring of subway tunnel based on terrestrial point clouds [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(2): 171-175, 185. (in Chinese)
- [22] 朱宁宁. 三维激光扫描在地铁隧道形变监测中的应用 [J]. 测绘工程, 2015, 24(5): 63-68.
- ZHU N N. Application of 3D laser scanning to the subway tunnel deformation monitoring [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(5): 63-68. (in Chinese)
- [23] 李理, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1056-1062.
- LI CH, LU X P, ZHU N N, *et al.*. Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(9): 1056-1062. (in Chinese)
- [24] 李明磊, 张蕊, 李广云. 激光扫描点云法矢精确计算与表面光顺方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(7): 1153-1161.
- LI M L, ZHANG R, LI G Y. Accurate normal calculating and surface smoothing of laser-scanned point clouds [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(7): 1153-1161. (in Chinese)
- [25] 高欣圆, 李明磊, 王力, 等. 旋转形体点云轴线提取制约因素分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(2): 35-37, 41.
- GAO X Y, LI M L, WANG L, *et al.*. Limitations on axis extraction from point clouds of rotator [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(2): 35-37, 41. (in Chinese)
- [26] 隋立芬, 宋力杰, 柴洪洲. 误差理论与测量平差基础 [M]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- SUI L F, SONG L J, CHAI H ZH. *Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:



李明磊(1989—),男,河南宝丰人,博士研究生,2011年、2014年于信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光点云数据处理及精密工程测量等方面的研究工作。E-mail: mingleili\_xd@163.com

#### 导师简介:



李广云(1965—),男,江苏高淳人,硕士,博士生导师,1983年、1987年于解放军测绘学院分别获得学士、硕士学位,2005年于英国皇家军事测量学校获得硕士学位,主要从事精密工程测量、卫星导航及导航装备与应用等方面的研究工作。E-mail: guangyun\_li@sohu.com