

文章编号 1004-924X(2019)07-1640-09

模式向量法提取点云数据线轮廓点

樊晶晶^{1*}, 马骊群^{1,2}, 孙安斌¹, 王一璋¹

- (1. 北京长城计量测试技术研究所 长度室, 北京 100095;
2. 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要:本文以表面连续的折线型边缘和小圆弧屋脊型边缘为研究对象,提出了一种基于扫描点云数据的线轮廓提取方法。该方法通过构造万向切片从点云数据中提取包含线轮廓点的截面数据,根据截面数据上线轮廓点两侧分布形式,定义了基于法向夹角分布规律的模式向量,将截面数据的相邻点法向夹角序列进行等元素划分,计算各组与模式向量的欧氏距离,在欧氏距离最小的组内提取线轮廓点。为验证方法的准确度,分别对直线型折线轮廓、弯曲折线轮廓和 4 个圆形屋脊轮廓进行试验,并将提取的线轮廓点进行最小二乘拟合,以线轮廓点相对拟合曲线的偏差评价方法的准确度。提取的直线轮廓点和曲线轮廓点的拟合标准偏差分别为 0.076 mm 和 0.047 mm;4 个圆形轮廓点的拟合标准偏差不大于 0.1 mm,圆半径相对三坐标测量结果的偏差不大于 0.1 mm。模式向量法适用于提取折线型边缘和小圆弧屋脊型边缘上的轮廓点数据,具有计算简单,适用性强的特点。当扫描仪准确度优于 0.03 mm 时,模式向量法的准确度在 0.1 mm 的量级。

关键词:模式向量;点云数据;线轮廓;万向切片

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192707.1640

Extraction of line contour points from point cloud data using pattern vector method

FAN Jing-jing^{1*}, MA Li-qun^{1,2}, SUN An-bin,¹ WANG Yi-zhang¹

- (1. *ChangCheng institute of Measurement & Metrology, Beijing 100095, China;*
2. *Science and Technology on Metrology and Calibration, Beijing 100095, China)*

* *Corresponding author, E-mail: jingjingfan@buaa.edu.cn*

Abstract: In this article, an extraction method of line contour points from point cloud data (for a fold-line edge and a ridge edge with a small chamfer) is proposed. In this method, multiple-direction slices were constructed to obtain section data containing line contour points. Then, according to the form characteristic of the section data, a pattern vector was constructed by using the normal angle of two adjacent points to represent the characteristic. The section data was divided into many small groups, each with the same number of components. Euclidean distances between the pattern vector and each small group were calculated, and the group with the smallest Euclidean distance was located for picking out the line contour point. To determine the accuracy of the proposed method, examples of three

收稿日期:2018-11-20;修订日期:2019-01-25.

基金项目:民用飞机专项科研技术研究项目资助(No. MJ-2017-J-70)

kinds of edges were used; a straight-line edge, a curve edge, and four circles. The extracted line contour points were fitted to a straight line, a three-order polynomial, and circles, by the least square fitting method. The deviations of the line contour points to the fitted lines were calculated. The standard deviations of the straight-line and curve edges were 0.076 and 0.047 mm, respectively. The standard deviations of the four circles were smaller than 0.1 mm. The radius deviation of the four circles to the reference data, measured by a coordinate measuring machine, was within 0.1 mm. This pattern vector method is applicable for extracting line contour points on a fold-line edge and a ridge edge with a small chamfer. When the scanning accuracy is higher than 0.03 mm, the pattern vector method ensures an accuracy of 0.1 mm.

Key words: pattern vector; point cloud; line contour; multiple-direction slice

1 引言

随着曲面非接触测量需求的出现,光学三维扫描仪得到快速发展,这类扫描仪具有数据获取效率高、精度高、操作简单及设备便携等优势。相比于逐点坐标测量,扫描仪可快速获得反映被测件外形轮廓特征的点云数据。点云数据被广泛应用于如飞机孔位修正^[1]、曲面变形测量^[2]、曲面重构^[3]、三维尺寸测量^[4]、三维模型重建^[5]、道路障碍物识别^[6]等领域。点云数据可以反映物体的完整形貌,但无法直接给出物体的几何线特征,必须利用点云数据识别出属于特征的数据,如样件表面的点、线、面等特征。

线轮廓是零件的结构框架,在多种应用场合都需要进行识别。而基于点云数据的线轮廓提取方法也是研究热点。赵泉华等^[7]通过将三维点云数据转化为二维投影图像,对图像进行边缘识别的方法获得点云数据的边缘线轮廓。该方法需要确定点云数据的单一投影平面,因此它更适合提取某一特征平面上的线轮廓。陈玲玲等^[8]通过点的 k 邻近点的法向夹角值计算该邻域的高斯显著性,将显著性高于阈值的区域划分为边缘特征区域。该方法属于三维空间上的线轮廓点提取方法,提取结果相比于赵泉华等所提出的方法更可靠,但该方法需要给出先验阈值。文献^[9]中提出了旋转体轴线的提取方法,首先通过离散点法矢量的特殊关系提取与种子点同纬度的点集,将同纬点集进行平面拟合和空间圆拟合,得到旋转轴初值,根据点云表面法矢与旋转轴之间的位置关系列出目标函数,通过迭代的方法修正初值,最终得到旋转轴。该方法基于旋转体的几何特征提取

线轮廓点,因此更适用于旋转体轴线的提取,对不规则实体线轮廓的提取则失效。李明磊等^[10]提出提取点云数据边界边缘的方法,即首先对点云数据进行八叉树划分建立数据的拓扑关系,然后根据网格中点云数据的分布规律判断边界点。该方法可以准确提取出点云数据的边界点,但由于边界边缘处扫描数据存在数据缺失或跳变,导致提取的边界点并不能反映零件的真实边界边缘。作者在文献^[11]中提出通过最大曲率法提取大圆弧屋脊型边缘的线轮廓点。该方案首先在点云数据边界点拟合曲线上构造万向切片,提取万向切片与网格点云数据的交点数据,以交点数据为研究对象,通过识别圆弧的两个端点提取圆弧数据,对圆弧数据进行抛物线拟合,将抛物线上的曲率最大点作为线轮廓点。对于小圆弧屋脊型边缘,由于圆弧区域的扫描数据较少,使得基于圆弧数据拟合的抛物线存在较大误差,影响线轮廓点的提取准确度。

为准确提取折线型边缘和小圆弧屋脊型边缘的线轮廓,本文提出了一种基于扫描点云数据的模式向量法。该方法通过构造万向切片从点云数据中提取包含线轮廓点的截面数据,根据线轮廓点两侧截面线的分布形式设置了反映相邻点法向夹角分布规律的模式向量,并计算模式向量与法向夹角序列的相似度,最终在相似度最大位置提取线轮廓点。

2 模式向量法提取线轮廓点

2.1 线轮廓点的分布特点

线轮廓是指位于样件外表面的通过面与面相交的方式构成的直线或曲线。线轮廓点是位于线

轮廓上的有限离散点。线轮廓点的提取与面面相交方式相关,面面相交的方式可分为:凹陷型、凸出型;按照是否有过渡圆弧可分为:折线型、屋脊型;按照交角大小可分为:钝角型、锐角型和直角型。为说明平面相交的类型,设计了如图 1 所示的三维模型(彩图见期刊电子版)。该三维模型包含了两类边缘:两平面直接相交的折线型边缘和平面相交处存在过渡圆弧的屋脊型边缘,如图 1(a)所示。在垂直于该三维模型边界边缘线的方向构造一个平面,平面与三维模型外表面相交形成如图 1(b)所示的截面线。该条截面线所展示的边缘囊括了实际零件的绝大部分边缘类型。

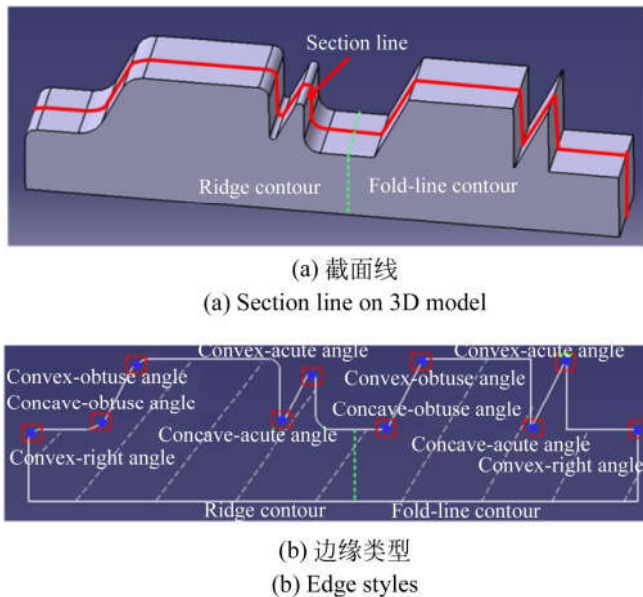


图 1 边缘分类

Fig. 1 Edge classification

图 1(b)中的蓝色点表示该条截面线上的线轮廓点,从中可以看出:不同类型边缘的线轮廓点其两侧的截面线数据具有相同的分布特点。对于屋脊型边缘,其过渡圆弧区域两侧的截面数据呈直线分布;对于折线型线轮廓点,其两侧的截面线数据也是呈直线分布。截面线上直线或曲线可通过相邻点的法向夹角进行识别。理论上,对于屋脊型边缘截面线,其上圆弧区域的相邻点法向夹角为一个常数,而圆弧两侧直线段的法向夹角为常数零。对于折线型截面线,线轮廓点两侧数据的相邻点法向夹角为零,而线轮廓点处的法向夹角发生跳变。两种边缘的法向夹角分布如图 2 所示(彩图见期刊电子版)。图 2 中的蓝色点表示线轮廓点,由此可知:对于折线型边缘的截面线,其

上的线轮廓点位于法向夹角发生跳变的位置;对于屋脊型边缘的截面线,其上的线轮廓点位于法向夹角分布线的上升台阶中间点位置。基于以上分析,本文提出通过设置反映截面线上线轮廓点分布特征的模式向量提取目标点。

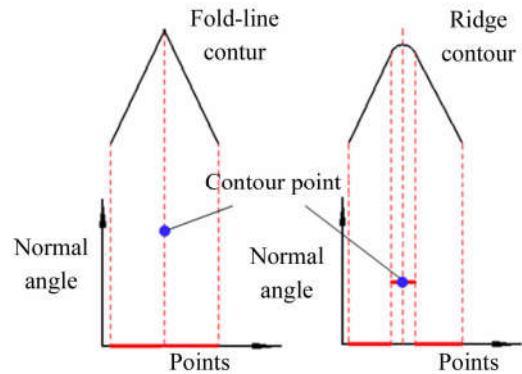


图 2 折线型边缘和屋脊型边缘的法向夹角分布

Fig. 2 Normal angle distribution of fold-line edge and ridge edge

2.2 模式向量的构建

本文中,模式向量是由有限元素组成的反映截面线上线轮廓点分布特征的数组序列。根据线轮廓点两侧相邻点法向夹角的分布规律,设置通用模式向量为: $[0, 0, \frac{\theta}{n}, \dots, \frac{\theta}{n}, 0, 0]$, 其中首尾两端的两个零值分别表示线轮廓点两侧的直线段分布特征,模式向量的中间具有 n 个 $\frac{\theta}{n}$, ($n > 1, \theta > 0$), 表示了线轮廓点处的法向夹角分布特征,对于屋脊型边缘, n 个 $\frac{\theta}{n}$ 表示了截面线上圆弧区域的法向夹角分布特征,其中 θ 表示线轮廓点两侧直线段的夹角, n 的取值与圆弧长度 S 和点云数据的点间距 d 有关,具体计算如式(1)所示。

$$n = \frac{S}{d}. \quad (1)$$

对于折线型边缘的截面线,其上线轮廓点的法向与两侧直线段的法向分别发生一跳变,因此,设置的模式向量为: $[0, 0, \frac{\theta}{2}, \frac{\theta}{2}, 0, 0]$, θ 表示线轮廓点两侧直线段的夹角。

2.3 采用模式向量识别线轮廓点

首先计算截面线上点数据的法向,然后通过向量内积的形式计算相邻点的法向夹角,则每组截面线数据可获得一个法向夹角序列。

将法向夹角序列进行划分以确定与模式向量相似度最大的位置。法向夹角序列的划分方法为:设模式向量共有 $4+n$ 个元素,法向夹角序列共有 N 个夹角值。则从截面线数据的第一点开始将第 $1\sim(4+n)$ 个法向夹角值划分到第一个小组,然后移到序列的第 2 位,将第 $2\sim(5+n)$ 个数划分到第二个小组,以此类推,则第 i 个小组包含序列的第 $i\sim(i+n+3)$ 个数。第 i 小组的元素表示为 $(V_i, V_{i+1}, \dots, V_{i+n+2}, V_{i+n+3})$ 。计算每个小组与模式向量的欧氏距离 $D_i (1 < i < N-n-3)$,计算方法如式(2)所示,即将对应元素的差方求和,认为差方最小的小组为与模式向量相似度最大的位置。

$$D_i = V_i^2 + V_{i+1}^2 + \left(V_{i+2} - \frac{\theta}{n}\right)^2 + \dots + \left(V_{i+n+1} - \frac{\theta}{n}\right)^2 + V_{i+n+2}^2 + V_{i+n+3}^2. \quad (2)$$

在相似度最大的位置上提取线轮廓点。设 $D_j = \min(D_1, D_2, \dots, D_{N-n-3})$,则第 j 组为相似度最大的位置。则对于折线型边缘的截面线数据,认为第 $j+3$ 个点为线轮廓点;对于屋脊型边缘的截面线数据,认为第 $j+2+\frac{n}{2}$ 个点为线轮廓点,其中当 n 为奇数时,则以该组数据的第 $j+2+\frac{n-1}{2}$ 个点和第 $j+2+\frac{n+1}{2}$ 个点的中间插值点作为线轮廓点。

模式向量法是在截面线数据上进行线轮廓点识别的一种方法,该方法可应用于折线型边缘和屋脊型边缘,具有广泛的适用性及计算简单的特点。

3 线轮廓点提取实验

为验证模式向量法提取线轮廓点的有效性和准确度,本文对分别对折线型边缘和屋脊型边缘进行提取,其中折线型边缘的提取包括一条直线轮廓和一条曲线轮廓,屋脊型边缘的圆弧长度为 0.5 mm ,提取的对象为公称直径为 6 mm 的 4 个圆形轮廓,预提取的线轮廓如图 3 所示。图 3(a) 为折线型边缘的直线轮廓和曲线轮廓,图 4(b) 表示预提取的 4 个圆形轮廓,文献[11]中也提取了该 4 个圆形轮廓。

实验采用德国 GOM 公司的 ATOSII 蓝光扫描仪获取样件表面点云数据。ATOSII 通过两个高分辨率 CCD 获取经样件表面调制的光栅条纹图像,通过相位信息匹配两幅图像,并根据三角测量原理计算样件表面点的空间位置,点间距在微米级别。

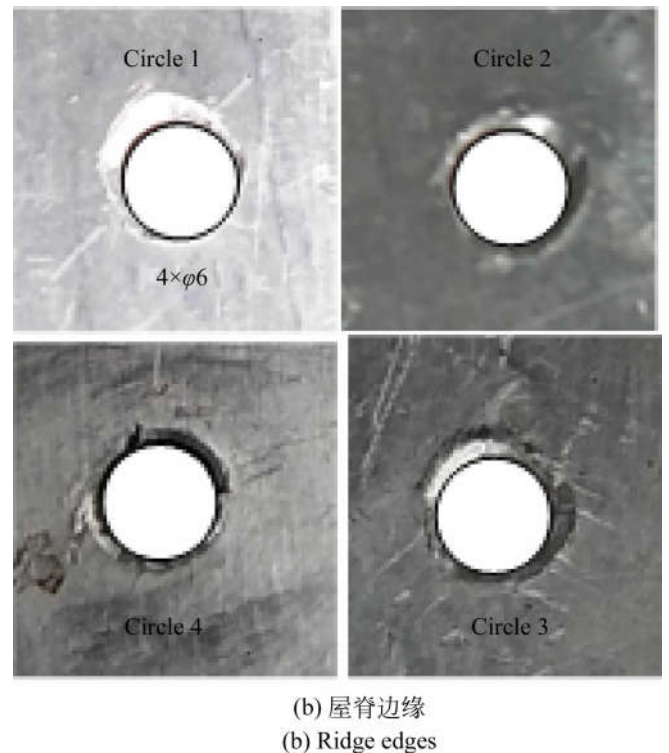
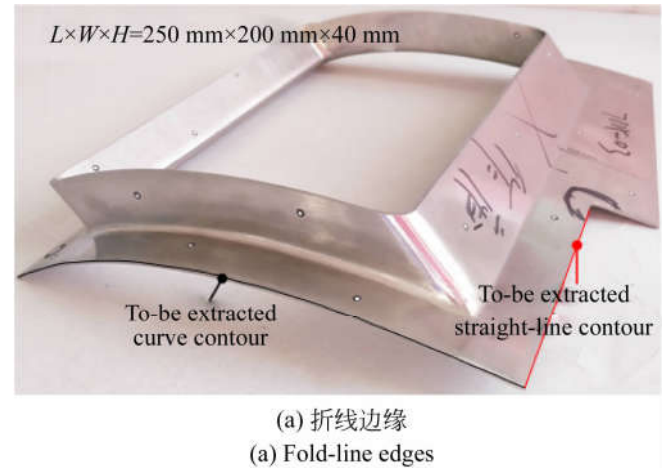


图 3 预提取的线轮廓
Fig. 3 Experimental edges

3.1 线轮廓点提取方案

为获取包含线轮廓点的截面线数据,本文通过构造万向切片,并将万向切片与三角网格化数据相交的方式实现。万向切片表示以等间隔分布在点云数据边界曲线上的一组圆形平面,各平面的法向随边界曲线切向的变化而变化,切片间距

和圆平面的半径根据提取边缘的几何尺寸确定。三角网格化点云数据指根据一定原则,如最小角最大化、空外接球等^[12],通过三角形将扫描的离散点云数据连接起来而形成的一个连续表面。

方向切片与三角网格化点云数据相交的过程即为法向变化的多组圆形平面与扫描得到的连续表面相交的过程,相交过程及获得的截面线数据如图 4 所示。

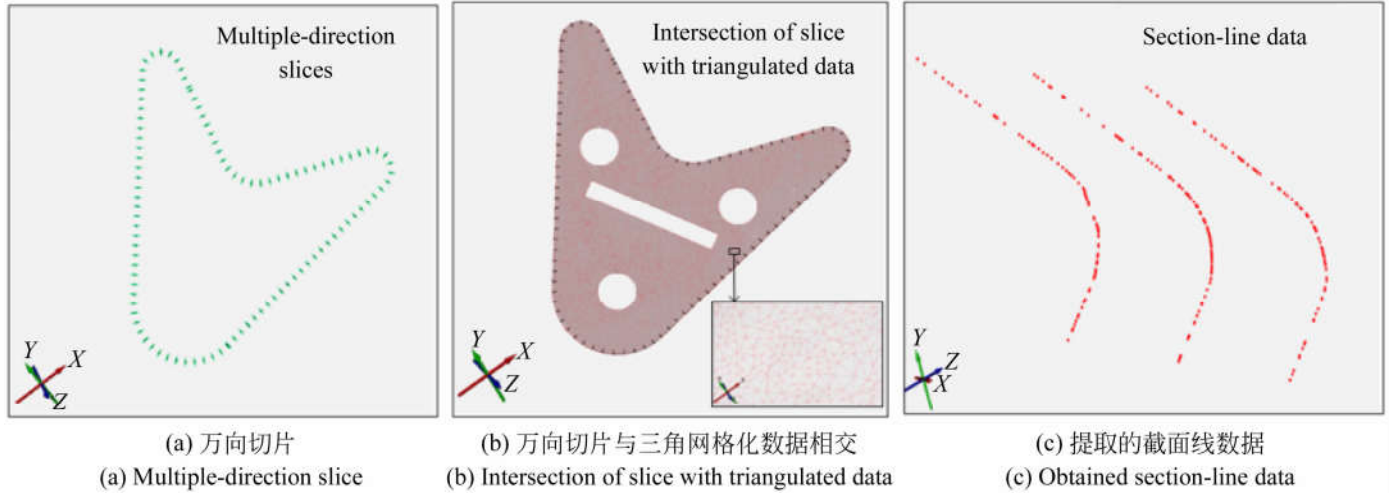


图 4 构造方向切片提取截面线数据

Fig. 4 Extraction section-line data by constructing multiple-direction slice

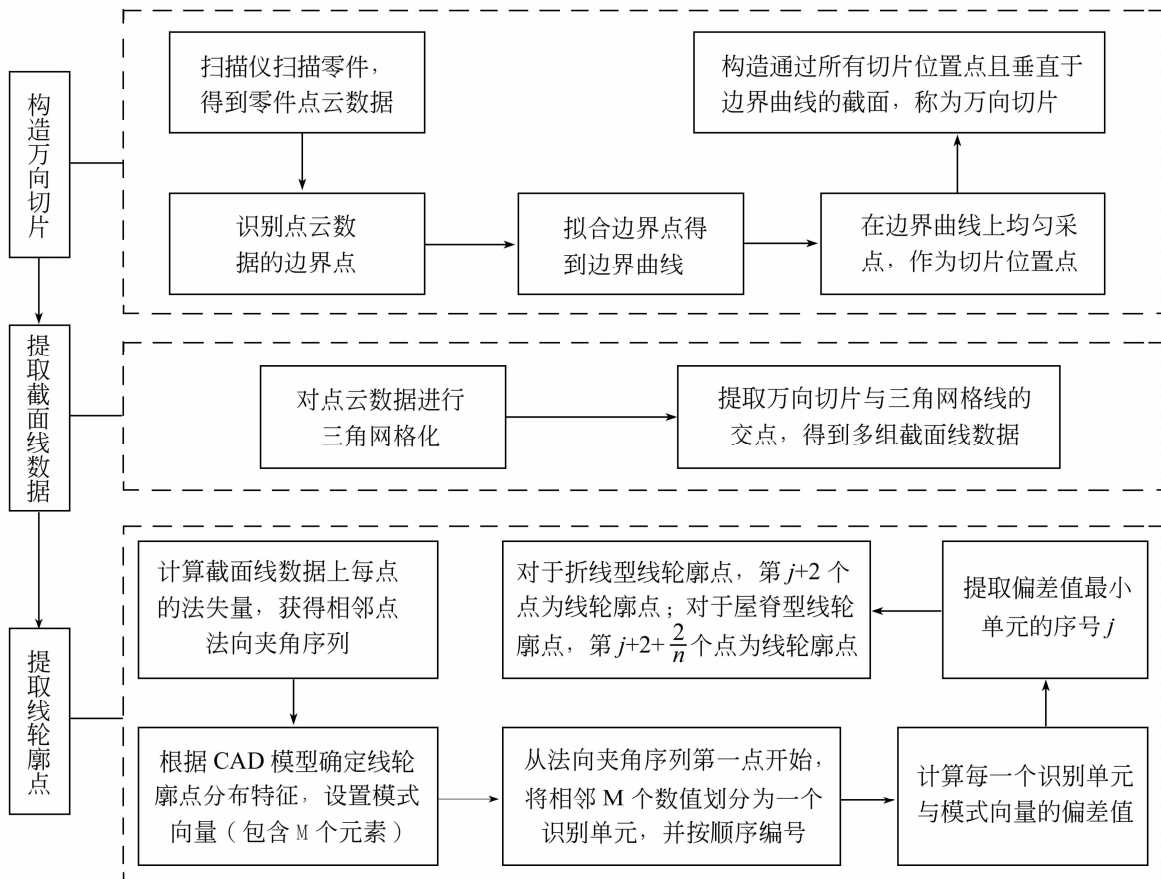


图 5 模式向量法提取线轮廓点的方案

Fig. 5 Strategy of extracting line contour points using pattern vector method

通过结构光面扫描仪获得的点云数据分布不均匀,使得邻近点的点间距在较大范围内变化。当截面线数据中的点间距较大时,使得在提取的线轮廓点与理论位置仅偏离一个点位的情况下,提取的线轮廓产生较大偏差。为此,在提取线轮廓点前需对截面线数据进行是否需要插值的判断。在截面线数据的基础上,采用 2 小节所述的模式向量法提取其上的线轮廓点,提取方案如图 5 所示。

3.2 线轮廓点提取结果

在扫描点云数据的基础上,采用本文的模式向量法提取上述 6 个边缘的线轮廓点。对于线长 112 mm 的直线型折线边缘,构造万向切片的间距为 1 mm,切片半径 2 mm。对于 181 mm 长曲线折线边缘,构造万向切片的间距为 1 mm,切片半径为 1.6 mm。因为该两种折线型边缘截面线上线轮廓点两侧直线的夹角为 90°,所示设置的模式向量为: $[0, 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, 0, 0]$ 。对应的提取结果分别如图 6(a)、图 6(b)所示,其中的蓝色点为

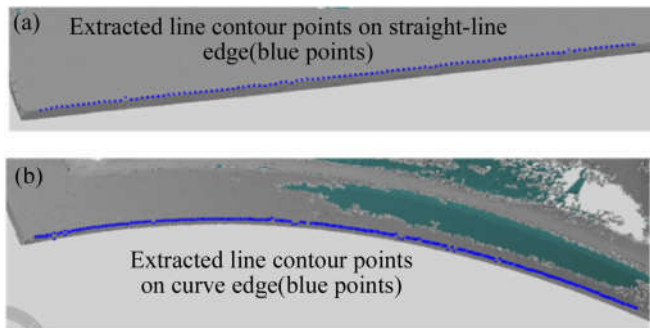


图 6 折线型边缘的线轮廓点提取结果

Fig. 6 Extracted line contour points of fold-line edges

提取出的线轮廓点(彩图见期刊电子版)。沿标称直径为 6 mm 的四圆形边缘构造万向切片,间距为 1 mm,切片半径为 2 mm,小圆弧长度为 0.5 mm,线轮廓两侧直线段夹角为 90°,所以设置的模式向量为: $[0, 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}, 0, 0]$,对应的提取结果为图 7 所示,图中的蓝色点为提取的线轮廓点(彩图见期刊电子版)。

3.3 线轮廓点提取结果的评价

将提取的线轮廓点进行最小二乘拟合,计算线轮廓点到拟合直线或曲线的偏差,统计所有线轮廓点偏差的最大值,最小值,标准差和残差等数值。

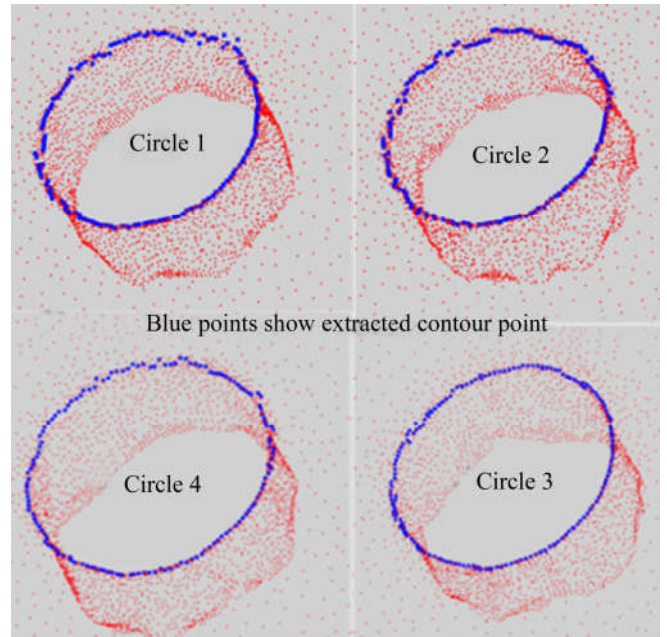


图 7 0.5 mm 圆弧屋脊型边缘的线轮廓点提取结果

Fig. 7 Extracted line contour points of ridge edges with 0.5mm chamfer

3.3.1 折线型边缘提取结果

将提取的直线轮廓点进行最小二乘直线拟合,计算线轮廓点到拟合直线的偏差,偏差如图 8 所示,其中偏差最大值为 0.456 mm,最小值为 0.004 mm,标准差为 0.076 mm,残差为 0.056 mm。根据各参数的含义可知:提取的线轮廓点中存在较大误差点;拟合的直线与真实直线符合度高;且线轮廓点的离散程度低。从图中的分布直方图可看出绝大部分的偏差值在 0.1 mm 以内。将曲线轮廓点进行三次曲线的最小二乘拟合,拟合结果如图 9(a)所示(彩图见期刊电子版),其中蓝色点为提取的线轮廓点,红色线表示线轮廓点拟合的三次曲线,表达式为: $y = -4 \times 10^{-6}x^3 + 0.002x^2 + 0.030x - 15.23, R^2 = 0.999$;计算线轮廓点到拟合曲线的偏差,偏差分布如图 9(b)所示,其中最小偏差为: -0.102 mm,最大偏差为: 0.176 mm,标准差为 0.047 mm。

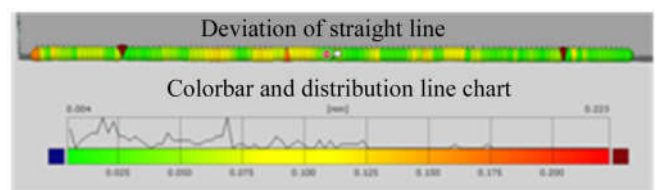
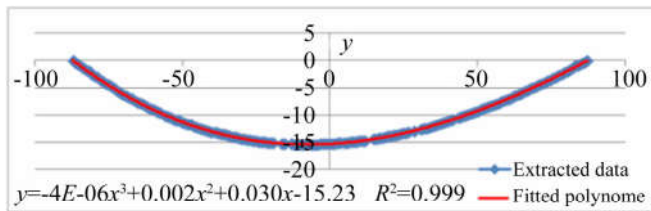


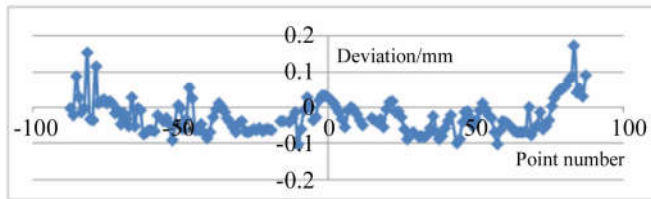
图 8 直线轮廓点相对于拟合直线的偏差

Fig. 8 Deviation of straight-line contour points to its fitted line



(a) 曲线轮廓点提取结果和拟合曲线

(a) Extracted curve contour points and its fitted curve



(b) 线轮廓点相对拟合曲线的偏差

(b) Deviations of line contour points

图 9 曲线轮廓点的提取结果

Fig. 9 Extracted curve line points

3.3.2 屋脊型边缘提取结果

将提取的圆形线轮廓点进行最小二乘圆拟合,计算 4 个圆的拟合半径。用三坐标测量机测量 4 个圆孔内表面同一高度上的数据,每个圆孔采集均匀分布的 8 个点,将圆孔数据进行圆拟合,得到 4 个圆的参考半径值。比较模式向量法和文献[11]中的最大曲率法的提取结果,见表 1。

表 1 圆轮廓点拟合半径的比较

Tab.1 Radius comparison of fitted circles (mm)

序号	三坐标数据	模式向量法	最大曲率法
1	3.117 6	3.185 6	3.218 4
2	3.118 1	3.223 0	3.209 4
3	3.115 3	3.187 2	3.219 4
4	3.090 2	3.172 2	3.206 3

参考文献:

- [1] 郑守国. 基于激光扫描数据的机翼壁板孔位修正及切边技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZHENG SH G. *Research on hole position correction and trimming technology of wing panel based on laser scanning data*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [2] 肖振中. 基于工业摄影和机器视觉的三维形貌与变

由表 1 可知:模式向量法提取数据的拟合圆半径相对于三坐标测量数据的偏差在 0.1 mm 量级,准确度高于最大曲率法。

4 结 论

本文提出了一种针对折线型边缘和小圆弧屋脊型边缘的线轮廓点提取方法。该方法基于截面上线轮廓点的分布特征设置模式向量,通过计算模式向量与截面线数据法向夹角序列间的欧氏距离,确定最小欧氏距离所处位置,并在该位置处提取线轮廓点。

为验证模式向量法的有效性和准确度,开展了折线型边缘和屋脊型边缘的线轮廓提取试验,并与文献[11]中的最大曲率法进行比较。对于折线型边缘,首先通过最小二乘法拟合线轮廓点,计算线轮廓点相对拟合曲线的偏差,并以此评价提取结果的准确度。实验结果表明提取的直线轮廓点相对于拟合直线的最大偏差为 0.456 mm,最小偏差为 0.004 mm,标准差为 0.076 mm,残差为 0.056 mm;提取的曲线轮廓点相对于拟合曲线的最小偏差为: -0.102 mm,最大偏差为: 0.176 mm,标准差为 0.047 mm;对于屋脊型边缘,将提取的线轮廓点进行圆拟合,得到拟合圆的半径值,以三坐标测量数据为参考数据,模式向量法的提取准确度高于 0.1 mm,相比于最大曲率法有一定的提升。

模式向量法具有计算简单,适用性强、准确度较高的特点,有助于实际工程问题中线轮廓点的快速提取。

形测量关键技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010.

XIAO ZH ZH. *Study on the key technologies of 3D shape and deformation measurement based on industrial photogrammetry and computer vision*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

- [3] 王琼, 王海燕, 孙保群, 等. 车辆曲面重构中点云精简算法的研究与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1693-1701.

- WANG Q, WANG H Y, SUN B Q, *et al.*. Research and improvement of point cloud simplification algorithm in vehicle surface reconstruction [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1693-1701. (in Chinese)
- [4] 杨国威. 激光高速扫描频闪成像三维尺寸测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- YANG G W. *Study on Key Techniques of High-speed Laser Scanning and Stroboscopic Imaging for 3D Size Precision Measurement* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [5] CHEN J, WU X J, YU WANG M, *et al.*. 3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 414-423.
- [6] 张名芳, 刘新雨, 付锐, 等. 一种用于道路障碍物识别的激光点云聚类算法[J]. *激光与红外*, 2017, 47(9): 1186-1192.
- ZHANG M F, LIU X Y, FU R, *et al.*. Clustering algorithm of laser point cloud for road barriers detection[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(9): 1186-1192. (in Chinese)
- [7] 赵泉华, 张洪云, 李玉. 采用非规则标识点过程的LiDAR点云数据目标提取[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1201-1210.
- ZHAO Q H, ZHANG H Y, LI Y. Target extraction from LiDAR point cloud data using irregular geometry marked point process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1201-1210. (in Chinese)
- [8] 陈玲玲, 杨玲, 谯舟三, 等. 牙颌点云数据的显著性特征提取[J]. *计算机系统应用*, 2016, 25(12): 193-198.
- CHEN L L, YANG L, QIAO Z S, *et al.*. Significant feature extraction for the dental point cloud data[J]. *Computer Systems & Applications*, 2016, 25(12): 193-198. (in Chinese)
- [9] 李明磊, 李广云, 王力. 回转型体点云的旋转轴线自动提取[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1219-1230.
- LI M L, LI G Y, WANG L. Automatic extraction of rotation axis line from 3D scanned point cloud of rotational symmetric object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1219-1230. (in Chinese)
- [10] 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): 144-154.
- 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): 144-154. (in Chinese)
- [11] MA L Q, FAN J J, ZHOU Z L, *et al.* Form and position measurement of sheet metal parts by boundary outlines extracting strategy [C]. *Proceedings of the SPIE*, v 10373, *Applied Optical Metrology II*, 2017, 1037306.
- [12] 项晨. 三维点云预处理与网格模型多分辨率实时绘制技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- XIANG CH. *Study of 3D Point-Cloud Pre-Processing and Grid-Model Real-Time Multiresolution Rendering* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [13] 张杰. 飞机蒙皮边缘特征的提取方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- ZHANG J. *Research on Method for Extracting Edge Feature of Aircraft Skin* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [14] 庞旭芳, 庞明勇, 肖春霞. 点云模型谷脊特征的提取与增强算法[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1073-1083.
- PANG X F, PANG M Y, XIAO CH X. An algorithm for extracting and enhancing valley-ridge features from point sets[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1073-1083. (in Chinese)
- [15] 葛闪. 飞机钣金零件点云测量数据处理与分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- GE SH. *Reserch on Processing and Analysing of Point Cloud Data of Aircraft Sheet Metal Parts* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [16] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 尖锐特征曲面散乱点云法向估计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2581-2588.

YUAN X C, WU L S, CHEN H W. Normal estimation of scattered point cloud with sharp feature

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2581-2588. (in Chinese)

作者简介:



樊晶晶 (1989—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 2014 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2016 年于西北工业大学获得硕士学位, 主要从事光学扫描仪误差源分析及点云数据处理算法研究。
E-mail: jingjingfan@buaa.edu.cn

导师简介:



马骊群 (1965—), 女, 吉林吉林人, 研究员, 1999 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 2007 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事大尺寸计量与测试方面的研究。E-mail: maliqun2003@163.com