

文章编号 1004-924X(2018)03-0680-09

结合斜率差和动态融合的自适应轮廓分段

赵 辉, 丰懿阳, 尹小恰, 陶 卫*

(上海交通大学 仪器科学与工程学系, 上海 200240)

摘要: 为了使用圆弧和直线重建数字轮廓曲线, 提出了一种融合了基于斜率差判断断点方法和区段动态融合的数字轮廓曲线自适应分段的方法。首先, 利用直线拟合计算轮廓曲线上每点的前后方向的斜率差, 求取斜率差的过程使用了自适应长度拟合窗口来平衡精度和速度的关系。然后, 将自适应平滑方法应用在方向斜率差曲线上。基于平滑后的斜率差曲线, 提取其中间断点作为待选区段分段点。最后, 使用基于可视化误差判定的区段动态融合, 来从待选分段点中选出一个可视化误差最小的分段方案作为最后分段结果。仿真测试的结果显示这种分段方法的断点定位误差小于 1%。以轴承油沟轮廓为实际测试用例的实验结果证实了这种自适应轮廓分段方法在实际应用中的可行性。

关键词: 自适应轮廓分段; 斜率差; 自适应平滑; 动态融合

中图分类号: TP391.4; TH692.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0680

A self-adaptive curve-segment method combining slope difference and dynamic merge

ZHAO Hui, FENG Yi-yang, YIN Xiao-qia, TAO Wei*

(Dept. of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn

Abstract: In order to reconstruct the digital contour curve with arc and straight line, a method was proposed to integrate the segmentation of digital contour curve based on the slope difference judgement method and the dynamic segment merge method. First, the slope difference between the front and back directions of each point on the contour curve was calculated using straight line fitting. The process of obtaining the slope difference used the adaptive length fitting window to balance the relationship between the precision and the velocity. Then the adaptive smoothing method was applied to the direction slope difference curve. Based on the smooth slope of the slope curve, the intermittent point was extracted as the selected section segmentation point. Finally, a dynamic merge algorithm based on the perceptual error was used to select a segmentation scheme with the smallest perceptual error from the selected segments as the final result. The simulation results show that the error of this segmentation method is less than 1%. The experimental results of the contours of bearing oil groove as the actual test cases show the feasibility of this adaptive contour segmentation method in practical

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-12-07.

基金项目: 上海市闵行区科委资助项目 (No. 2014MH116)

application.

Key words: self-adaptive curve-segment; slope difference; self-adaptive smooth; dynamic merge

1 引言

线结构光扫描技术由于其具有非接触、高精度和高速性的优点,被广泛地应用在工业应用中,比如3D建模和轮廓测量。利用线结构光扫描系统,可以得到的被测物体的轮廓数据。在工业应用中,被测物体轮廓通常是由多段规则的几何形状曲线组成,例如最常见的为直线与圆弧。为了进一步精确测量被测物轮廓,需要对轮廓数据进行函数拟合。比如为了对齿轮不同部位进行精确测量,需要对齿顶、齿廓和齿根的轮廓数据进行分段拟合^[1]。而在拟合之前,需要把轮廓分成多个区段,之后对多个区段进行分别拟合来得出解析函数。因此数字轮廓曲线分段的关键在于区段段点的寻找,区段段点是数字轮廓上规则几何曲线的交点。

对于数字曲线上的区段段点(角点)的寻找已经有大量的研究。按原理不同可以将这些方法分成两种类型:搜索式方法和最优化方法。搜索式方法通过计算数字轮廓上每一点的几何或者视觉特征值来搜寻出符合某种标准的点作为区段段点。Rosenfeld和Azriel在1974年就提出了计算角点强度来提取角点^[2],该方法计算简单,但是容易受到噪声干扰。为了抑制噪声,Ngo等人提出了自适应切线覆盖值^[3]这一特征值来评估带噪声的数字轮廓线。Horng计算轮廓每点曲率值并将自适应平滑应用在曲率曲线上提取间断点作为段点^[4]。搜索式方法计算复杂度不高,但是由于依赖计算得到的每点特征值筛选段点,易受到噪声干扰,提取不够精确,而且受筛选标准影响,容易提取到点过多或过少。最优化方法通过找寻设定的目标方程的最优值来从给定的数据点中定位段点,通常是找寻使得特征误差值最小的分段段点的方案。Horng和Li提出利用基于视觉误差的动态编程方法来找寻视觉误差最小的分段段点^[5]。Sarkar等人提出利用遗传算法来拟合数字轮廓^[6]。王露等人通过设定误差阈值对数据点进行依次分段最小二乘拟合,找寻满足阈值的分

段以确定断点^[7]。张冉等人先利用曲率估计出断点所在区间,在区间内再利用B样条拟合求取误差最小控制点作为断点^[8]。最优化方法通常能给出更精确的分段段点,但由于其计算复杂,在轮廓数据点较多时非常耗时。

本文综合考虑搜索式方法和最优化方法的特点,提出基于斜率差和动态融合的自适应轮廓分段方法。为了提取出区段段点,先利用轮廓每点的前后斜率差作为特征值搜寻初始区段段点,而后再在搜寻出的段点上运用动态算法选取可视误差最小的分段段点方案作为最终结果。这种方法前半部分利用搜索式方法计算方便的特点来初步提取区段段点,而后针对其分段段点可能过多的缺陷,后半部分再利用最优化方法在前面提取到的段点上选取最优化的分段方案。由于是在前一步提取的基础上运用最优化方法,计算复杂度大大降低。

2 原理介绍

2.1 基于斜率差的分段方法

为了拟合圆弧和直线所寻找的区段段点,通常可以通过检测数据点的曲率获得,因为在圆弧或者直线上的数据点曲率恒定,而在段点处的曲率会出现间断跳变。Rattarangsi等人在他们提出的角点检测方法^[9]中就提出了数字曲线的曲率表达式,该表达式应用数字曲线上每点以及其前后两点来计算每点的曲率。该曲率求取分段的方法对于无噪声的理想曲线适用,但是对于从实际图片中得到的带有噪声畸变的数字曲线,该方法得到的曲率会淹没在噪声中。乔宇等人提出的基于自适应直线拟合的角点检测方法^[10]利用曲线数据点上前后方向直线拟合求取每点前后方向斜率差来代表曲率近似值,以此来探测角点。由于每个数据点的斜率差求取利用的是前后一段多个点的数据,因此对于噪声不敏感。本文借鉴这种方法思路,利用数据点前后方向斜率差来探测角点,兼具速度和精度。

2.1.1 方向斜率差的求取

乔宇等人在文献^[10]中应用自适应直线拟合

来计算曲率近似表示。本文应用这种思路方法进行角点的探测。为了评估曲线切线方向的变化率,应该计算出参考点的向前和向前切线方向的变化。近似地,可以通过使用直线拟合近似来计算点的前向和后向方向之间的差异。在图 1 中, P_1 和 P_2 表示点 O 的向前和向前线近似方向。 P_1 和 P_2 之间的夹角差值越大,意味着点 O 的曲率越大。

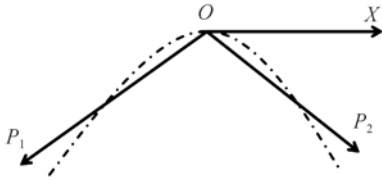


图 1 前后方向差角示意图

Fig. 1 Difference angle between front and back directions

本文采用最小二乘法求取直线近似方向。应用线性方程 $y = kx + b$,

$$k = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (2)$$

其中, (x_i, y_i) 为一组, 它们是点 O 之前或之后的参与拟合的 N 点, 它们与拟合直线的偏差为:

$$E = \sum_{i=1}^N (kx_i + b - y_i)^2. \quad (3)$$

在线性方程 $y = kx + b$, $k = \tan \theta$ 中, θ 是直线和 x 轴之间的夹角。使用 $\Delta k = k_2 - k_1$ 作为点 O 的斜率差的表示, 其中 k_1 和 k_2 是方向 OP_1 和 OP_2 的 k 值。 Δk 与曲率正相关; $\Delta k = 0$ 表示 OP_1 和 OP_2 位于同一行, 即点 O 的曲率为零; Δk 越大, 点 O 的曲率越大。

对于求出的方向斜率差曲线, 其中既有原轮廓上噪声造成的波动, 也有分段的段点造成的跳变。而我们需要提取其中的间断点作为分段的段点, 这时就需要使用自适应平滑的方法。

2.1.2 自适应平滑

自适应平滑是由 Saint-Marc 等人在文献^[11]中提出的一种对数字信号的平滑处理方法。其功能是平滑一段数字信号的同时还能保留信号中原有的间断点。

在一般情况下, 对于数字信号的滤波平滑通常采用高斯滤波方法。高斯滤波可以通过下面公式实现。 $S^{(0)}(x)$ 是处理前的数字信号, $S^{(t)}(x)$ 是经过 t 次迭代处理后的信号。

$$S^{(t+1)}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=-1}^{+1} S^{(t)}(x+i) \omega^{(t)}(x+i), \quad (4)$$

$$N = \sum_{i=-1}^{+1} \omega^{(t)}(x+i), \quad (5)$$

其中权重函数:

$$\omega^{(t)}(x) = 1. \quad (6)$$

但是高斯滤波会对初始数字信号的每一处都进行相同程度的平滑, 包括在原来间断点处, 因为在每一点处计算的权重函数都是相同的。为了在平滑数字信号的同时还能保留原信号中存在的间断点, Saint-Marc 等人提出了自适应平滑方法, 将式(6)中的权重函数改为:

$$\omega^{(t)}(x) = \exp\left[-\frac{|S'^{(t)}(x)|^2}{2k^2}\right], \quad (7)$$

其中: $S'^{(t)}(x)$ 是 $S^{(t)}(x)$ 的导数, k 是常量参数。权重函数 $\omega^{(t)}(x)$ 是关于 $S'^{(t)}(x)$ 的减函数: $S'^{(t)}(x) = 0$ 时, $\omega^{(t)}(x) = 1$; $S'^{(t)}(x) \rightarrow \infty$ 时, $\omega^{(t)}(x) \rightarrow 0$ 。此权重函数对信号的特征有很好的自适应效果, 在信号连续段 $S'^{(t)}(x)$ 较小平滑效果类似高斯滤波, 而在间断点处 $S'^{(t)}(x)$ 较大因而能保留间断。经过多次迭代运算后原数字信号被平滑并能保留间断。

2.1.3 实现步骤

在方向斜率差的求取中, 为了拟合线 OP_1 和 OP_2 , 应确定拟合窗口的大小, 即 P 点前后待拟合的点数。使用固定大小的窗口是一种简单的方法。然而, 该方法容易受到局部误差的干扰, 并且具有不令人满意的效果。因此, 本文应用了基于误差阈值的自适应窗口。

通过式(3)可以计算拟合点和拟合直线的误差 E , 通过提前设定合适的误差阈值 E_{th} , 本文后面的实验中的误差阈值设为曲线总长的 $1/100$ 。确定不超过误差阈值的最大点数为最终的拟合窗口大小。当点 O 处于具有小曲率值的近似直线时, 拟合窗口的大小可以被设置为较大的值。相反, 当点 O 处于具有大曲率值的曲线中时, 拟合窗口的大小应该被设置得很小。但窗口的大小不能太小, 否则最小二乘拟合不能达到预期的效果。

因此,首先应将窗口的初始大小和误差阈值设置为合适的值。自适应窗口拟合算法如图2。

2.2 基于可视误差的区段动态融合

从基于自适应平滑的自适应的斜率差曲线中提取的断点是会多于预期效果的,主要是由于原轮廓数据点的波动畸变造成上面方法把小波动转折处也处理成了断点。本文利用 Horng 和 Li 提出的利用基于视觉误差的动态编程方法来从给定的点中找到视觉误差最小的分段断点方案^[5]。该方法应用可视误差和动态融合来融合前面提取出的区段,使得最终提取的分段更加符合视觉感知。

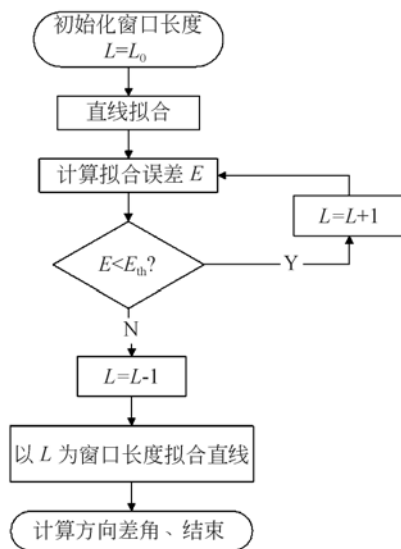


图2 自适应窗口拟合流程图

Fig.2 Flow chart of adaptive window fitting

2.2.1 可视误差

Horng J H 在关于数字曲线拟合的文献^[5]中基于两条视觉感知准则:

- (1) 偏爱直线段;
- (2) 偏爱更长的直线段。

对于拟合区段提出了可视误差的计算公式:

$$e_p = \eta \left[e + \frac{C}{L} \right], \quad (8)$$

其中: e_p 为可视误差, η 为几何类型权重(对于不同的几何图形取值不同), e 是几何拟合误差, C 是常量, L 是区段的长度。本文实验中对于直线 η 取为 1,对于圆弧 η 取为 1.5; C 取为整个轮廓的长度。

对于一段待拟合区段,拟合为圆弧比直线的可视误差更大,拟合成一段比拟合成多段可视误差更小。

提出可视误差计算公式的目的是为了在拟合数字曲线分段的时候,能更加贴近视觉感知的判断,不至于只考虑几何误差造成分段过多和过拟合的结果。

2.2.2 动态融合方法

利用上面的区段可视误差计算公式,要对基于斜率差提取的区段断点进行融合,从中挑选找到可视误差最小的分段方案。

现在要解决的问题是从 (s_1, s_2, \dots, s_N) 共 N 点中(s_1 是轮廓首点, s_N 是轮廓末尾点, $s_2 \sim (N-1)$ 是基于斜率差提取的区段断点),选出合适的区段分段的断点,使得各个区段的可视误差和最小。记 $E_p[N, M]$ 为从 N 点中取最多 M 点作为分段点的方案中最小的可视误差,记 $E_p(n, m)$ 为从 N 点的前 n 点中选 m 点作为分段点方案中最小的可视误差, $e_p(s_j, s_n)$ 表示 s_j, s_n 断点组成的区段的可视误差,可以得出如下的演算递推公式:

$$E_p(n, m) = \min_{m-1 \leq j \leq n-1} [E_p(j, m-1) + e_p(s_j, s_n)], \quad (9)$$

$$E_p[N, M] = \min_{2 \leq m \leq M} E_p(N, m). \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)的递推关系,最后可以得到需要的 $E_p[N, M]$ 和其对应的分段方案。

3 仿真测试

图3是仿真的轮廓曲线,由两段直线和一段圆弧构成,其分界点横坐标值为100和200。1~99和101~199处直线段的点曲率为零,201~400处圆弧段的点曲率为恒定值,且在100和200处分界点的曲率会出现突然变化。这段数字轮廓曲线在原始的理想曲线上加入了0.5 dB的高斯白噪声,图3是经过高斯滤波后的待处理的仿真轮廓曲线。

利用自适应窗口直线拟合对图3曲线进行前后方向斜率差的求取,所得曲线如图4。

为了从斜率差曲线中提取出间断点,对其应用自适应平滑方法处理。对于自适应平滑方法式(7)中的参数 k 的取值,取多个值进行比较,不同 k 值的处理后效果如图5所示。

可以看出 k 值的增大使得自适应平滑方法对于原始数字曲线里的间断的平滑效果越大,较小

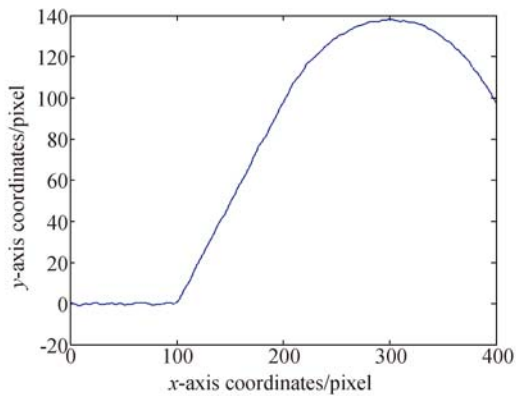


图 3 带噪声的仿真轮廓曲线

Fig. 3 Flow chart of adaptive window fitting

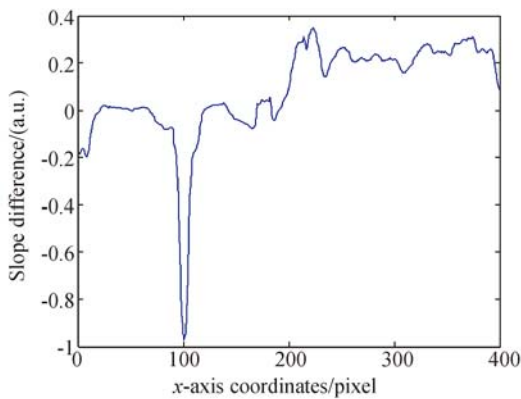


图 4 仿真曲线的前后方向斜率差曲线

Fig. 4 Slope difference curve of simulation curve

的 k 值处理后能保留更多的间断。图 4 中在 k 为 $1/10$ 和 $1/30$ 时,横坐标 200 左右处并未处理出间断;在 k 为 $1/40$ 和 $1/50$ 时,200 处左右才出现间断。

对于自适应平滑处理后的斜率差曲线,我们将其中的间断点提取出来作为分段的断点。 k 值取值过大会使得预期的间断无法提取出,我们要选用过小的 k 值,这样提取出的间断点是会多于预期的,究其原因将原始曲线上的噪声波动引起斜率差的变化也处理成了间断。本实验中用自适应参数 $k=1/50$ 处理后的效果曲线来提取后面的间断点。

对自适应平滑后的斜率差曲线计算每点斜率来提取间断点,间断点处的斜率远大于零。提取到一共 7 个断点,如表 1 示。仿真曲线实际是 3 段轮廓,提取出过多的断点主要是由于将原始轮廓上的噪声波动也分为了小区段。为了从这 7 个

断点中,选取合适的点最为最终的分段方案,要运用分段动态融合。

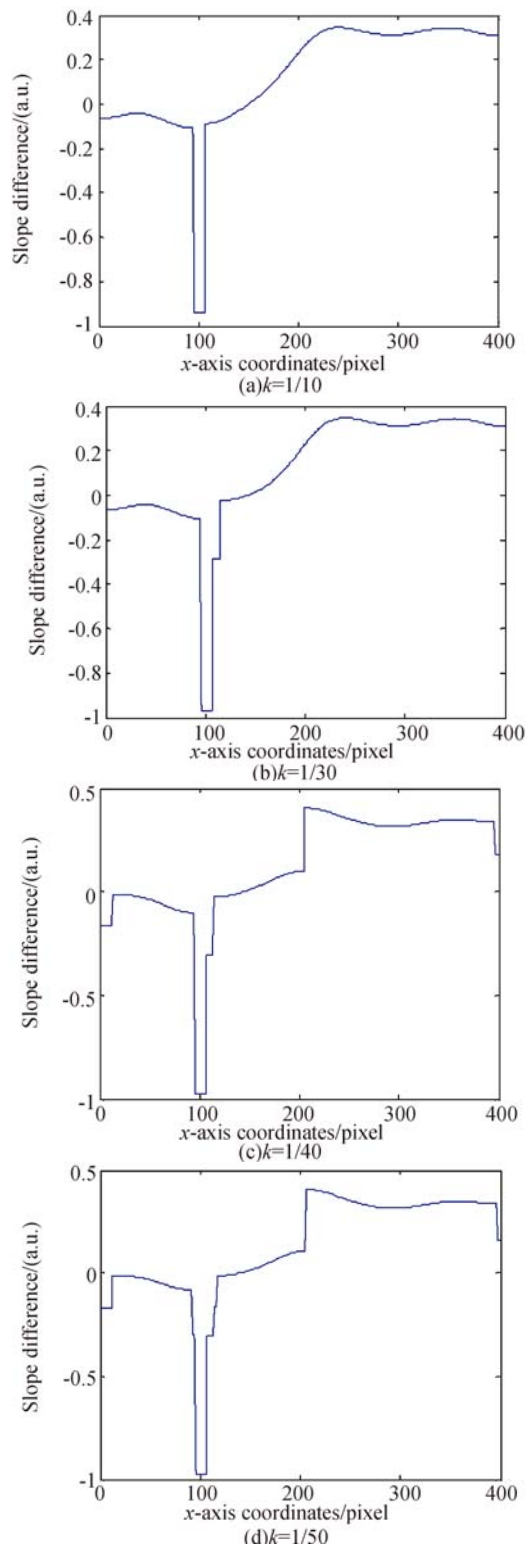


图 5 自适应平滑方法 k 参数不同情况下处理后的斜率差曲线

Fig. 5 Slope difference curve processed by adaptive smoothing method with different k value

对于从表 1 提取出的断点,加上轮廓首点和末尾点一共 8 个段点,利用基于可视误差的动态融合计算可视误差 $E_p(8, m)$ 。

表 1 间断点提取结果

Tab. 1 Breakpoint extraction results

序号	间断点横坐标
1	11
2	96
3	104
4	115
5	201
6	396

表 2 不同分段点数的最小可视误差

Tab. 2 Minimum perceptual error of different segments

m	$E_p(8, m)$
2	467.48
3	212.537 6
4	27.243 67
5	48.945 84
6	85.949 64
7	142.402
8	222.438 7

得到的可视误差最小是 $E_p(8,4)$,其对应的分段断点的横坐标(1,104,201,400)。而仿真数据轮廓线的中间区段的 2 个断点横坐标是 100 和 200,轮廓线全长 400,提取出的两个断点的误差 1%和 0.25%。

为了将本文提出的方法与已有的方法对比,用现有的搜索式方法和最优化方法对相同的仿真轮廓线进行处理。对于与搜索式方法的对比,可以直接参照表 1 的提取断点与本文方法最后提取的断点。因为表 1 的断点的提取方法完全是基于前后方向斜率差的搜索式方法。可以看出如果只利用搜索式方法,提取出的断点由于波动噪声的存在而比实际偏多。所以本文提出的方法在后续还要对这些进行动态融合。对于与最优化方法的对比,直接利用 Horng 和 Li 的基于可视误差的动态编程方法^[5]对图 3 的仿真轮廓线进行处理。表 3 显示了本文提出方法和动态编程方法结果的

对比。本文的方法由于是在表 1 的提取少量断点上进行动态编程融合,相比于直接在 400 个全轮廓点上进行动态编程找寻最佳断点,计算量更小,运行时间更短。而提取到的断点两种方法都是 2 点,且动态编程方法的误差结果略好于本文方法。

综合与现有的两大类分段方法对比,本文提出的方法综合了两种方法的优点,既能得出符合期望点数的断点,而且运算量不大,可以达到应用的目的。

表 3 提出方法与动态编程方法结果对比

Tab. 3 Comparative results for present algorithm and dynamic programming algorithm

	提出方法	动态编程方法
处理点数	400	400
运行时间/s	11.69	499.75
断点 1	104	100
断点 2	201	201
断点 1 相对误差/%	1	0
断点 2 相对误差/%	0.25	0.25

4 实验测试

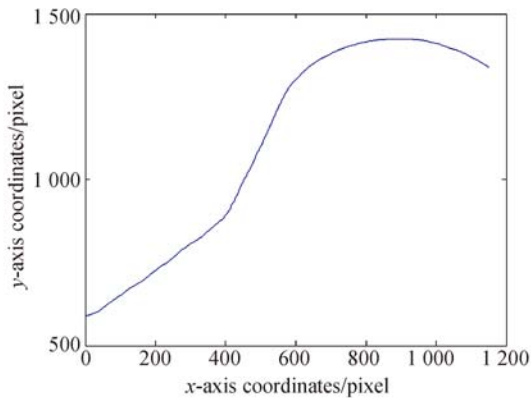
以轴承油沟为实验测试对象,用文献^[12]中激光条纹提取方法处理原始激光条纹图像,可获得轴承槽轮廓的数字曲线。图 6(a)是拍摄得到的 $1\ 150 \times 1\ 536$ pixel 灰度图像,利用文献^[12]的激光条纹提取方法得到亚像素级的中心轮廓线坐标,包含 1 150 个数据点,如图 6(b)示。

图 7 显示了应用自适应平滑处理后的各点前后斜率差表示值曲线。在计算前后斜率过程中,



(a)原始图片

(a) Origin image



(b) 提取后的中心线曲线
(b) Centerline curve after extraction

图 6 待处理的数据曲线

Fig. 6 Data curve to be processed

自适应窗口误差阈值取为 12, 初始窗口长度取为 20。在自适应平滑过程中, 为了分段更加细致, 取用 k 值较小的结果, 对 k 为 1/100 的斜率差曲线提取断点。

对于图 7 中的曲线提取间断点, 加上轮廓首尾共 27 个点。对它们进行区段动态融合, 可视误差计算结果如表 4。

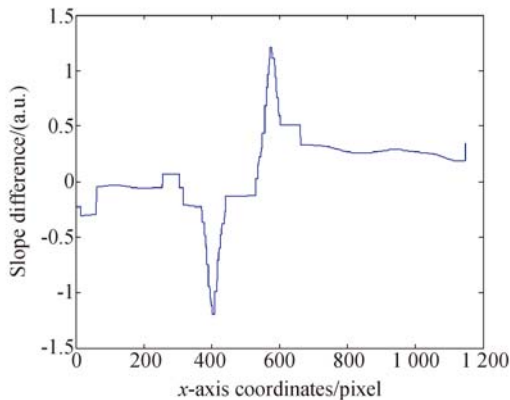


图 7 自适应平滑后的前后方向斜率差曲线

Fig. 7 Slope difference curve processed by adaptive smoothing method

表 4 中其可视误差最小是 $E_p(27, 4)$, 提取出的 4 个分段断点是 1, 401, 585, 1 150。最终的分段断点效果如图 8 所, 叉型标记为断点。

为了与已有方法的比较, 与仿真测试一样用现有的搜索式方法和最优化方法对此轮廓线进行处理。基于前后方向斜率差的搜索式方法的提取角点效果如图 9, 由于实际噪声的存在, 这种方法

表 4 不同分段方案下的区段可视误差

Tab. 4 Minimum perceptual error of different segments

m	$E_p(27, 4)$	m	$E_p(27, 4)$
2	3 636.39	8	197.467 7
3	481.447 4	9	224.264 6
4	165.487 5	10	254.342 3
5	165.989 7	11	300.674 3
6	169.342 7	12	349.843 2
7	183.245 8	13	411.353 2

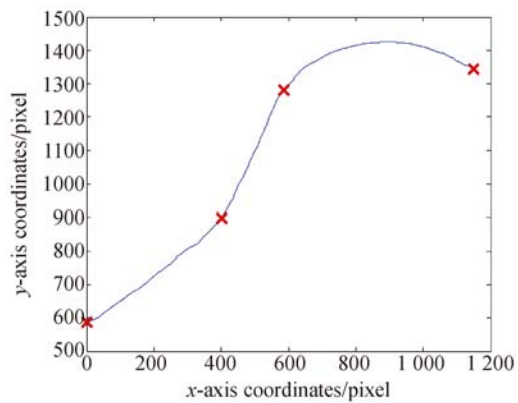


图 8 实验测试轮廓分段断点结果

Fig. 8 Experimental test profile segment results

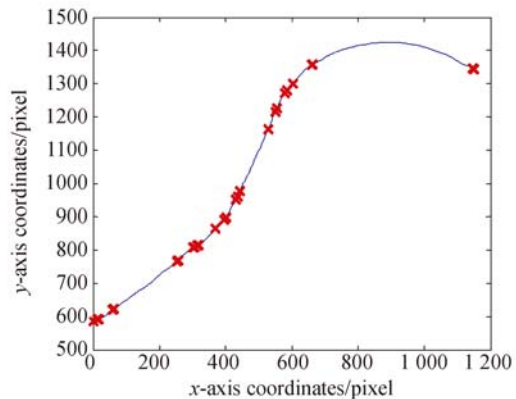


图 9 基于前后方向斜率差的搜索式方法分段效果

Fig. 9 Experimental test profile segment results

提取点过多。基于可视误差的动态编程方法提取的分段角点横坐标为 (1, 405, 585, 1 150), 与本文方法提取结果基本接近。但由于这种方法要对 1 150 个轮廓点全部计算处理, 整个运行时间

5 128.70 s,而本文方法用 91.83 s,相比之下其耗时巨大。综合比较下,本文提出的方法在准确性和耗时上对实际轮廓更具有实用性。

5 结 论

本文应用了基于点斜率差判断断点方法来提

取轮廓线上的潜在的段点,由于实际情况中轮廓线上噪声波动的存在,提取出的段点多于预期。针对前面方法提出的段点,本文采用了基于可视误差的动态融合方法,融合前面方法提取出的过多分段,最终得到优化的分段断点。仿真测试验证本方法误差小于 1%,而对于油沟轮廓的实验测试显示了本文提出方法的可行性。

参考文献:

- [1] 王宁,段振云,赵文辉,等. 视觉检测中齿轮外轮廓分段方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 117-120.
WANG N, DUAN ZH Y, ZHAO W H, *et al.*. Research on method of gear outer contour segmentation in vision measurement[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2016 (4): 117-120. (in Chinese).
- [2] ROSENFELD A, JOHNSTON E. Angle detection on digital curves[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1973, 22(9): 875-878.
- [3] NGO P, NASSER H, DEBLED-RENNESON I, *et al.*. Adaptive tangential cover for noisy digital contours[C]. *Proceedings of the 19th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, Springer, 2016: 439-451.
- [4] HORNG J H. An adaptive smoothing approach for fitting digital planar curves with line segments and circular arcs [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(1-3): 565-577.
- [5] HORNG J H, LI J T. A dynamic programming approach for fitting digital planar curves with line segments and circular arcs [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(2): 183-197.
- [6] SARKAR B, SINGH L K, SARKAR D. Approximation of digital curves with line segments and circular arcs using genetic algorithms[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(15): 2585-2595.
- [7] 王露,邢宗义,陈双,等. 基于自动提取分段点的车轮外形轮廓拟合方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(2): 618-626.
WANG L, XING Z Y, CHEN SH, *et al.*. A wheel profile fitting method based on automatically extracting subsection points[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(2): 618-626. (in Chinese)
- [8] 张冉,张旭,章海波. 截面数据精确分段方法研究[J]. 轻工机械, 2014, 32(6): 70-73, 77.
ZHANG R, ZHANG X, ZHANG H B. Research on accurate segmentation method of sectional data [J]. *Light Industry Machinery*, 2014, 32(6): 70-73, 77. (in Chinese)
- [9] RATTARANGSI A, CHIN R T. Scale-based detection of corners of planar curves[C]. *Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, 1990: 923-930.
- [10] 乔宇,黄席樾,柴毅,等. 基于自适应直线拟合的角点检测[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(2): 29-31.
QIAO Y, HUANG X Y, CHAI Y, *et al.*. Corner point detection based on adaptive line approximation[J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(2): 29-31. (in Chinese)
- [11] SAINT-MARC P, CHEN J S, MEDIONI G. Adaptive smoothing: a general tool for early vision [C]. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 1989: 618-624.
- [12] YIN X Q, TAO W, FENG Y Y, *et al.*. Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2653-2660.

作者简介:



赵 辉(1965—),男,辽宁阜新人,博士,教授,博士生导师,分别于1986年、1989年、1994年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士、博士学位。主要从事现代传感器、机器视觉、光电检测技术等方面的研究。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn



丰懿阳(1994—),男,江西丰城人,硕士研究生,2015年于浙江大学电子信息技术及仪器专业获得学士学位,主要从事光电传感器和图像处理等方面的研究。E-mail: fengyiyang613@163.com



尹小恰(1989—),女,河南郑州人,博士研究生,2011年于河南大学获得学士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的工作。E-mail: xiaoq1216@sjtu.edu.cn