

基于多项式拟合的激光线分段光顺处理方法的研究

王纪武^{**}, 鱼鹏飞^{*}, 罗海保, 李晨阳

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

摘要 基于线激光的空间曲面轮廓非接触测量是目前工业产品在线尺寸精确检测应用的有效方法。为了提高非接触三角测量系统的精度,需要准确表达被测轮廓的截面特征线。针对凹凸不平的被测工业零件表面,采用单一光滑处理的拟合算法很难精确表达截面轮廓特征,因此提出了以曲面轮廓特征点为边界点进行分段的多项式曲线拟合,然后再进行叠加来产生一条连续轮廓曲线的方法。通过比较采集的被测物体数据点集与拟合产生的对应曲线可知,所提方法不仅可以有效消除线激光提取过程中产生的锯齿问题,提高了测量精度,而且该拟合曲线能够真实地表达被测表面的轮廓特征,具有重要的实际应用价值。

关键词 测量; 线激光; 多项式曲线拟合; 三角测量; 多项式拟合

中图分类号 TH164

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091204

Smoothing Processing Method of Laser Line Segmental Light Based on Polynomial Fitting

Wang Jiwu^{**}, Yu Pengfei^{*}, Luo Haibao, Li Chenyang

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The non-contact measurement of space surface profile based on line laser is an effective method for the accurate on-line dimension detection of present industrial parts. In order to improve the non-contact triangulation accuracy, we need extract the section characteristic line of measured contour accurately. However, for the surface of industrial parts with irregular surface, it is difficult to express the contour feature accurately with a simple smoothing processing method. Therefore, a polynomial curve fitting method is proposed, which takes the contour feature points as the boundary points and then puts all the points together to produce a continuous contour curve. By comparing the collected data set of tested objects and corresponding fitted curves, we find that the proposed method can not only solve the jagged problem generated in the laser line extraction process, but also can improve the measurement accuracy. The fitted curve can truly express contour features of tested surface, which has important practical value.

Key words measurement; line laser; polynomial curve fitting; triangulation; polynomial fitting

OCIS codes 140.2020; 150.1135; 100.4992

1 引言

随着测量技术的不断发展,在线测量需求日益增加。与接触式测量不同,非接触测量^[1-2]可以更快地实现在线测量,因此在工程应用中越来越受到人们的重视。基于线激光的非接触测量主要采用三角测量图像处理技术,在高精密的在线检测中得到了广泛应用^[3-4]。

该测量方法的主要原理是激光器发射出的激光线投射在被测物体表面,利用激光线的线型形状来代表被测物体表面轮廓的几何特征^[5-6]。由于激光线本身具有一定的宽度,因此通常采用激光线中心像素来代表被测物体的几何形状^[7]。由于采用图像处理提取出的激光线有不平滑和锯齿现象,会影响到测量精度,因此很多学者对此展开了深入研究,提出了针对激光线的各种拟合处理方法:Farin等^[8]提

收稿日期: 2017-12-13; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-05

基金项目: 红果园国家级纵向项目(M14GY200061)

* E-mail: 16121256@bjtu.edu.cn; ** E-mail: jwwang@bjtu.edu.cn

出了通过节点消去与插入的 B 样条曲线光顺方法, 该方法的实质是利用曲线的曲率图进行人工交互修改, 使曲线的曲率变化均匀, 最终达到曲线光顺的目的; 李凤娇等^[9]提出了基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法, 实现了光条中心像素的提取; 秦亚光等^[10]提出了曲率-弦长比复合判据过滤激光光线噪声点, 并通过分段低次插值实现模型曲线的光顺处理; 王可等^[11]提出了基于拉格朗日乘数法对曲线点云数据进行光顺处理的方法, 光顺后的曲线及曲线的一阶导数在全域下均连续, 拟合精度较高; 孙彬等^[12]根据点云采用端点一阶导矢连续法拟合出光顺曲线, 并将其用于航天叶片型面激光点云的三维重构。在实际应用中, 常常会遇到曲率不连续的特征表面, 激光照射该表面后, 会产生一条不规则的曲线。如果采用上述光顺处理方法, 就可能会由于弱化特征节点的数据信息而造成较大的误差, 最终导致拟合曲线可能偏离实测物体表面的真实轮廓特征。

针对这个问题, 本文首先采用基于 Canny 的曲线细化算法对线激光轮廓进行有效提取, 得到所需截面轮廓的几何特征线; 之后提出了以特征节点为边界的分段多项式曲线拟合方法。实验结果表明, 该方法不仅能保证拟合精度, 还能有效地表达物体原有的表面特征信息, 提高了测量精度。

2 基本原理

2.1 激光线提取

采用线激光三角测量技术进行表面轮廓测量时, 需要提取表示轮廓特征的激光线的中心线^[13]。这需要包括以下步骤: 1) 将激光线从抓拍的图像中提取出来; 2) 将提取的激光线进行细化处理, 得到表示轮廓特征的单像素线条; 3) 光顺单像素线条, 去掉影响特征的噪点。

基于采集到的带有线激光的被测物体轮廓的图像, 快速地提取出线激光的点云数据信息^[14], 接着采用基于 Canny 算法的图像处理方式进行激光线细化, 保留激光条中心线的像素信息。图 1 为激光线细化流程图。图 2 为简单背景下激光线照射水杯并提取出光线的过程。

2.2 曲线光顺数学模型

对于普通的单一光滑凸表面, 线激光的成像是一条比较规则的连续曲线。当被测物体的表面具有凹凸特征时, 激光线就会变为一条分段光滑的曲线, 各段曲线的分界点就是物体实测表面形状发生突

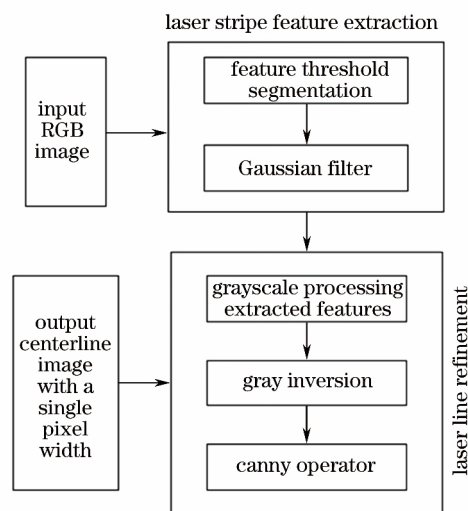


图 1 激光线细化流程图

Fig. 1 Flow chart of laser line refinement

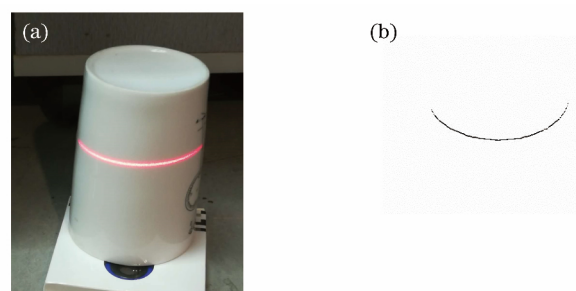


图 2 激光线提取过程。

(a) 激光线原始图; (b) 单像素宽中心线提取

Fig. 2 Illustration of laser line extraction process.

(a) Original image of laser line;

(b) center line extraction with one pixel width

的点。如果直接进行光滑处理, 就会导致物体实际轮廓拟合的失真, 形成较大误差。本研究将这样的转折点定义为特征节点。

根据被测零件物体表面曲率的变化, 物体表面可以分为单一光滑曲面和不规则曲面两种。单一光滑曲面如图 3(a) 所示, A 、 B 是激光线的起点和终点, 没有特征节点; 不规则曲面如图 3(b) 所示, A 、 D 是激光线的起点和终点, B 、 C 就是特征节点。如果对特征节点进行光滑逼近处理, 就会产生很大的测量误差。

2.3 误差约束确定特征节点

在特征节点附近, 即相邻线段的转角处, 由于曲线轨迹的切线方向会发生突变, 曲率也不连续, 所以曲线的规律会发生明显变化。

在实际测量中, 被测零件表面的特征点数量不多, 而且易判断, 对提取出的曲线进行拟合前, 先用



图 3 含有不同特征节点的激光线示意图。(a)不含特征节点;(b)含两个特征节点

Fig. 3 Schematics of laser line with different feature nodes. (a) Without feature nodes; (b) with two feature nodes

人眼指定零件表面每个特征点所在的大致区间。考虑到人眼观察的误差,为了获取精确的特征节点位置,需要对特征节点存在的区段进行检验,检验其是否满足转角误差 θ_{static} 和弓高误差 δ_{static} 的约束。

1) 转角约束

如图 4 所示,设所选特征点区间为 $[X_1, X_n]$,采集曲线上靠近区段起始端点的两点分别为 $X_{k-1} = (x_{k-1}, y_{k-1})$ 和 $X_{k+1} = (x_{k+1}, y_{k+1})$, $X'_k = (x'_k, y'_k)$

为区间段内的一个检验点,则相邻线段 $\overrightarrow{d_{k-1}d_k}$ 和 $\overrightarrow{d_kd_{k+1}}$ 的转角为

$$\theta' = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{d_{k-1}d_k} \cdot \overrightarrow{d_kd_{k+1}}}{|\overrightarrow{d_{k-1}d_k}| |\overrightarrow{d_kd_{k+1}}|}\right). \quad (1)$$

由图 4 可以看出,在区间段 $[X_1, X_n]$ 内, θ' 先减小后增大,在特征节点 X_k 处 θ 达到最小值。在实际工作中,为了避免噪声的影响,必须满足

$$\theta > \theta_{\text{static}}. \quad (2)$$

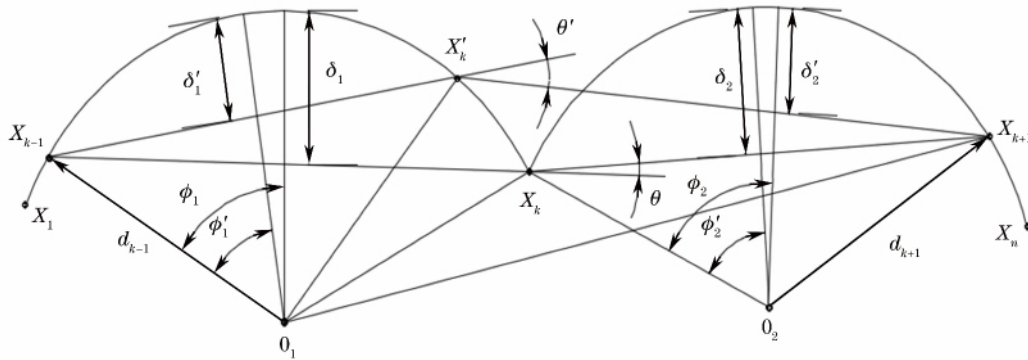


图 4 转角和弓高误差的计算

Fig. 4 Calculation of angle and chord errors

2) 弓高约束

如图 4 所示,双边弓高误差分别为 δ_1 和 δ_2 ,且

$$\delta'_1 = d_{k-1}(1 - \cos \phi'_1), \quad (3)$$

$$\delta'_2 = d_{k+1}(1 - \cos \phi'_2). \quad (4)$$

显而易见,在点 X'_k 运动到特征节点 X_k 的过程中, δ_1 和 δ_2 分别为双边弓高误差的极大值。为了剔除噪声点,必须要求

$$\delta_1 < \delta_{1\text{static}}, \quad (5)$$

$$\delta_2 < \delta_{2\text{static}}. \quad (6)$$

通过这两个约束条件,就能很精确地找到特征节点。

2.4 基于特征节点的分段多项式曲线拟合方法

分段多项式曲线拟合是在以特征节点为分界点的每一段曲线上进行拟合,得到相应的有界拟合多项式方程,方程的自变量区间以特征节点为界,同时相邻的分段曲线在特征节点处连续,叠加各段拟合曲线后得到一条完整的截面特征曲线。

设激光线数据集的起点坐标为 (a_0, b_0) , 终点坐标为 (a_N, b_N) , 光线数据集中含有 $N-1$ 个特征节

点,特征节点的坐标为 (a_i, b_i) , $i=1, 2, \dots, N-1$, 各分段曲线上的方程为 $\varphi_i(t)$, $i=1, 2, \dots, N$, 则拟合出的整条曲线方程组为

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t), (a_0 \Delta t \Delta a_1) \\ \varphi_2(t), (a_1 \Delta t \Delta a_2) \\ \vdots \\ \varphi_N(t), (a_{N-1} \Delta t \Delta a_N) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: Δ 为新定义的定位符号,表示数据点之间从左至右的顺序关系,不表示数据点之间的大小关系。如 $a_0 \Delta / a_1$ 表示变量 t 位于左起端点为 a_0 、右止端点为 a_N 的数据范围区间,并不表示它们之间存在实际的大小关系。

设在第 k ($k=1, 2, \dots, N$) 个分段曲线上要拟合的曲线的方程为

$$\varphi_k(t) = \sum_{i=1}^n x_i t^{i-1}, (n \leq N, a_{k-1} \Delta t \Delta a_k), \quad (8)$$

式中: i 为拟合多项式的阶数,取正整数; x_i 为多项式待定参数。通过传统的最小二乘法多项式拟合^[15]就可以求出多项式方程。

为保证曲线在 a_k 处过渡到 $\varphi_{k+1}(t)$ 时的曲线连续,要求前后两端曲线在特征节点 a_k 处的函数值相同,且加入的端点约束条件为

$$\varphi_k(a_k) = \varphi_{k+1}(a_{k+1}). \quad (9)$$

3 实验分析

针对提取的激光线,在分段处采用多项式拟合,计算中心像素的最大偏差和标准差(标准差可以反映拟合点和实际点之间的误差程度^[16])。

首先选择简单表面进行实验测试。图 5 是 4 种不同表面形状物体的线激光照射图,图 6 是对图 5 中提取出的线激光进行测量得到的多项式拟合阶数和拟合偏差均方根之间的关系图。可以看出:在拟合多项式的阶数从 3 变化到 10 的过程中,拟合曲线和原曲线偏差均方根误差的变化较大;10 阶之后,阶数变化对偏差均方根的影响明显变小,对拟合精度的影响不超过 3%。为了平衡计算量和拟合精度,选择 10 阶多项式进行拟合光顺处理。

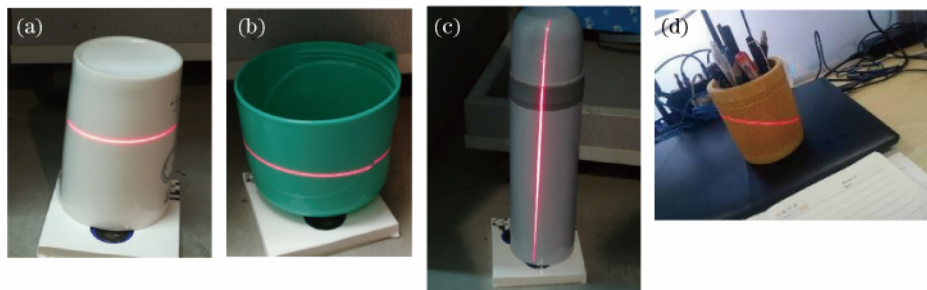


图 5 4 种不同表面物体线激光照射图。(a)样品 1;(b)样品 2;(c)样品 3;(d)样品 4

Fig. 5 Line laser irradiation figures of four different surface objects. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4

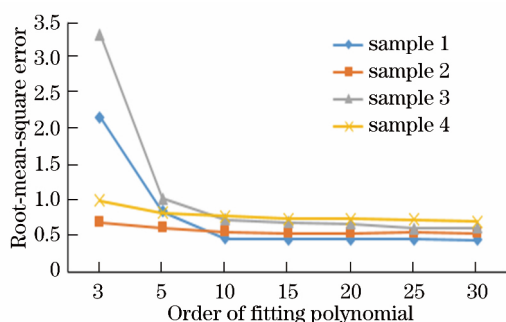


图 6 多项式阶数和拟合均方根偏差的关系

Fig. 6 Relationship of polynomial order and fitting root-mean-square error

为了进一步说明拟合曲线与实际测量值的偏差,图 7 给出了图 2 激光线的前 80 个像素点进行局部拟合的放大图。

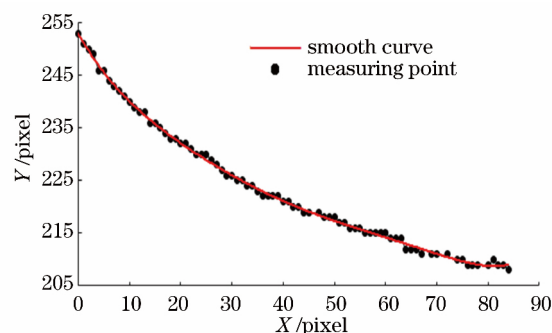


图 7 测量值和光顺值的对比

g. 7 Comparison between measured values and fitted values

接下来对含有更多特征节点的物体表面进行实验。图 8 是线激光照射含有非单一特征工业零件表面的光线图像提取细化过程。图 9 是采用两种光顺方法的拟合效果对比图。

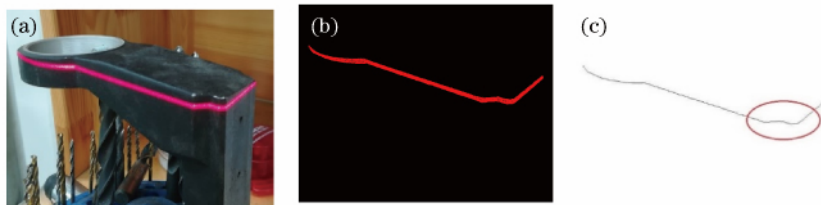


图 8 多特征节点激光线提取。(a)激光线原始图;(b)激光线特征提取;(c)单像素宽中心线提取

Fig. 8 Illustration of laser line extraction with multiple feature nodes.

(a) Original image with laser line; (b) feature extraction of laser line; (c) centerline extraction with one pixel width

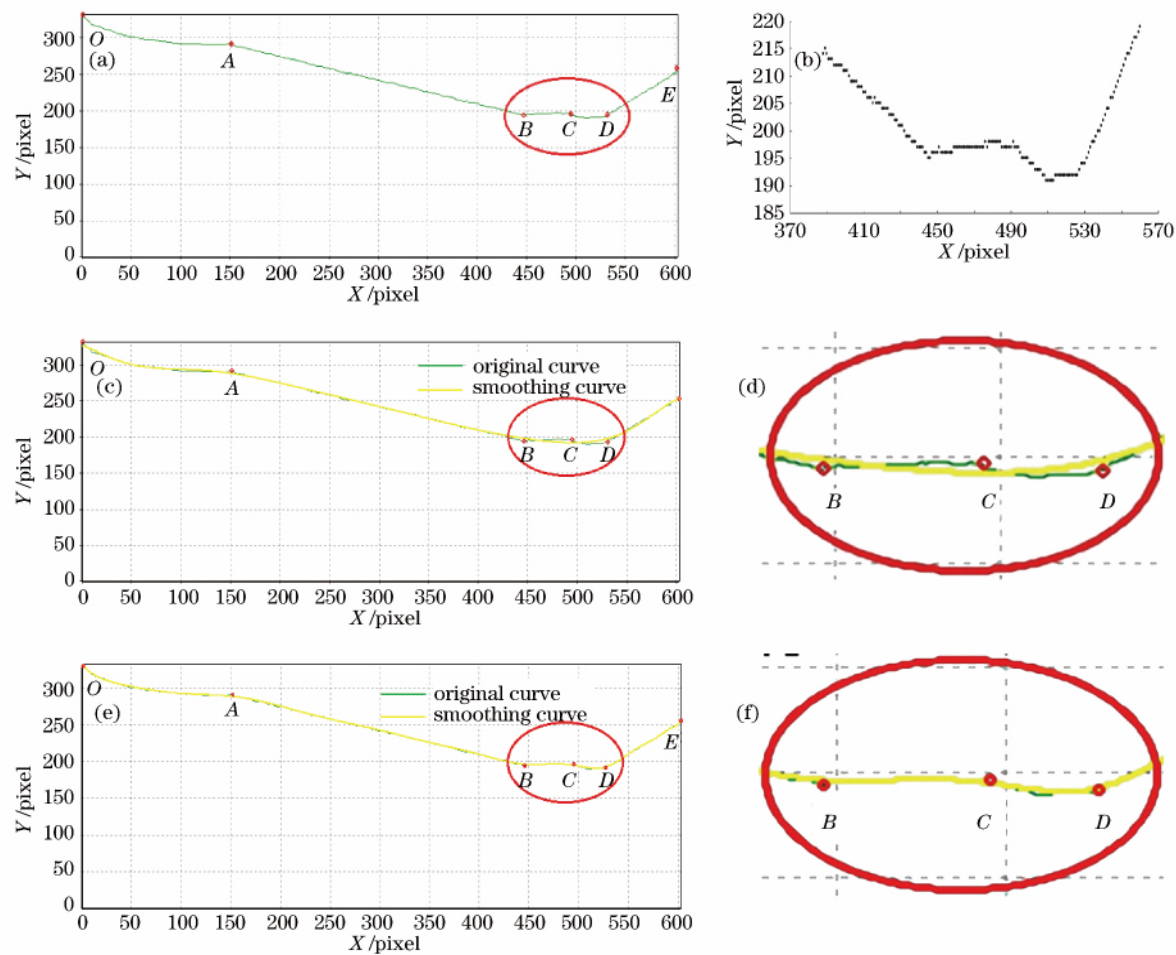


图 9 两种光顺方法效果的对比。(a)原曲线;(b)原曲线标记区域局部放大散点图;(c)采用最小二乘法时的光顺效果图;
(d)采用最小二乘法时标记区域的局部放大散点图;(e)采用所提方法时的光顺效果图;
(f)采用所提方法时标记区域的局部放大散点图

Fig. 9 Effect comparison of two smoothing methods. (a) Original curve; (b) local zoomed scatter diagram of area marked with circle in original curve; (c) smoothing effect diagram with least square method; (d) scatter diagram of local zoomed area marked with circle by least square method; (e) smoothing effect diagram with proposed method; (f) scatter diagram of local zoomed area marked with circle by proposed method

分别采用所提光顺方法和全域上的最小二乘 (Δy 为前后纵坐标偏差值)。可见,所提方法相对偏差不超过 0.28%,显著优于传统的最小二乘光顺方法。

表 1 两种光顺方法测量值和拟合值的对比

Table 1 Comparison between measured values and fitted values of two smoothing methods

Measured value (x, y)	Least square method		Proposed method	
	Fitted value (x', y')	Δy	Fitted value (x', y')	Δy
(388, 214)	(388, 213.4209)	0.5791	(388, 213.9283)	0.0717
(390, 214)	(390, 212.8269)	1.1731	(390, 213.3236)	0.6764
(391, 213)	(391, 212.5318)	0.4682	(391, 213.0245)	-0.0245
(392, 213)	(392, 212.2379)	0.7621	(392, 212.7275)	0.2725
(393, 213)	(393, 211.9454)	1.0546	(393, 212.4324)	0.5676
(444, 196)	(444, 199.0419)	-3.0419	(444, 196.2870)	-0.287
(445, 195)	(445, 198.8357)	-3.8357	(445, 196.1860)	-1.186

续表 1

Measured value (<i>x</i> , <i>y</i>)	Least square method		Proposed method	
	Fitted value (<i>x'</i> , <i>y'</i>)	Δ <i>y</i>	Fitted value (<i>x'</i> , <i>y'</i>)	Δ <i>y</i>
(446, 195)	(446, 198. 6318)	−3. 6318	(446, 196. 1386)	−1. 1386
(447, 196)	(447, 198. 43)	−2. 43	(447, 196. 1517)	−0. 1517
(448, 196)	(448, 198. 2306)	−2. 2306	(448, 196. 233)	−0. 233
(449, 196)	(449, 198. 0335)	−2. 0335	(449, 195. 2522)	0. 7477
(450, 196)	(450, 197. 8388)	−1. 8388	(450, 195. 3157)	0. 6842
(481, 198)	(485, 193. 3269)	4. 6731	(485, 197. 7208)	0. 2792
(482, 198)	(485, 193. 2456)	4. 7544	(485, 197. 8099)	0. 1901
(483, 198)	(485, 193. 1697)	4. 8303	(485, 197. 8427)	0. 1572
(484, 198)	(485, 193. 0991)	4. 9009	(485, 197. 8254)	0. 1746
(485, 197)	(485, 193. 034)	3. 966	(485, 197. 7772)	−0. 7772
(486, 197)	(486, 192. 9746)	4. 025	(486, 197. 7383)	−0. 7383
(487, 197)	(487, 192. 9211)	4. 0789	(487, 197. 7805)	−0. 7805
(488, 197)	(488, 192. 8735)	4. 1265	(488, 198. 0222)	−1. 0223
Relative deviation <i>e</i>		0. 0223	0. 0043	

其中相对偏差 *e* 的计算公式为

$$e = \sqrt{\frac{\sum (\Delta y - \overline{\Delta y})^2}{n}}, \quad (10)$$

式中: $\overline{\Delta y}$ 为样本纵坐标偏差算数平均值; *n* 为数据样本的容量; $y_{\max} - y_{\min}$ 为整体光线曲线纵坐标的最大跨度。

接着又做了大量实验,从中抽取一部分的实验结果进行分析。图 10 是抽取的其中三幅激光照射图像,表 2 列出了采用传统最小二乘法 and 所提方法进行光顺处理含特征节点的较复杂表面时的相对偏移误差。实验结果表明,所提出的在特征节点处分段的多项式曲线拟合方法得到的结果更精确。

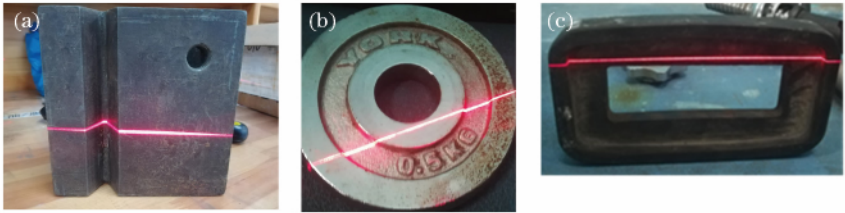


图 10 抽取的三种不同表面的激光照射图。(a)样本 1;(b)样本 2;(c)样本 3

Fig. 10 Irradiation extraction figures of three different surface objects. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

表 2 两种光顺方法相对偏差的对比试验数据

Table 2 Test comparison data of relative deviations of two smoothing methods

Sample number	Least square method	Proposed method
1	0. 0255	0. 004552
2	0. 0148	0. 005135
3	0. 0278	0. 005723

4 结 论

针对线激光进行较复杂表面零件非接触测量的精度问题,根据实际工程应用,提出了激光线细化和以特征节点进行分段的多项式曲线光顺方法,并对该方法进行了试验验证。测试结果表明:对于简单

的光滑表面和有曲率突变的表面,只要找到特征节点,采用所提方法就可以准确地表达被测物体的真实轮廓特征。所提方法不仅保证了各段的拟合精度,还能精确地表现出被测物体的真实轮廓,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

[1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54 (7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54 (7): 070003.

- [2] Ou P, Wang T, Li R X. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011102.
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 011102.
- [3] He P P, Wan Y C, Yang W, *et al.* Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0528001.
何培培, 万幼川, 杨威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0528001.
- [4] Sudatham W, Matsumoto H, Takahashi S, *et al.* Non-contact measurement technique for dimensional metrology using optical comb[J]. *Measurement*, 2016, 78: 381-387.
- [5] Chen F, Chen W Y, Chen Z T. Laser triangulation based measurement about the surface 3D topography of a cup CBN grinding wheel[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(10): 1321-1325.
陈锋, 陈五一, 陈志同. 基于激光三角法的CBN杯形砂轮表面形貌检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(10): 1321-1325.
- [6] Li X J, Zhao K, Zheng X M. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 116-121.
李晓洁, 赵凯, 郑兴明. 基于激光三角法的地表粗糙度测试仪的研制[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 116-121.
- [7] Shi H M, Zhang J K. Study on track gauge measurement system based on laser triangulation principle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(9): 1934-1940.
史红梅, 张继科. 基于激光三角测量原理的轨距检测系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(9): 1934-1940.
- [8] Farin G, Rein G, Sapidis N, *et al.* Fairing cubic B-spline curves[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 1987, 4(1/2): 91-103.
- [9] Li F J, Li X J, Liu Z. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110002.
李凤娇, 李小菁, 刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1110002.
- [10] Qin Y G, Luo Z Q, Wang W, *et al.* Cavity three-dimensional laser scanning point cloud data processing technology[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(11): 1635-1639.
秦亚光, 罗周全, 汪伟, 等. 采空区三维激光扫描点云数据处理技术[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(11): 1635-1639.
- [11] Wang K, Tang Z H, Sun X W. Fairing processing of curve point cloud data based on Lagrange multiplier method[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2013, 35(3): 309-313.
王可, 唐忠辉, 孙兴伟. 基于拉格朗日乘法对曲线点云数据的光顺处理[J]. *沈阳工业大学学报*, 2013, 35(3): 309-313.
- [12] Sun B, Du H B, Wang J H, *et al.* Analysis of aero-engine blade surface laser point cloud 3D reconstruction error[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0512002.
孙彬, 杜虎兵, 王建华, 等. 航发叶片型面激光点云三维重构误差分析[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0512002.
- [13] Dong J, Yang X, Yu Q F. Fast line segment detection based on edge connecting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315003.
董晶, 杨夏, 于起峰. 基于边缘连接的快速直线段检测算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315003.
- [14] Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1104003.
李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1104003.
- [15] Li Q Y, Wang N C, Yi D Y. Numerical analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [16] Zhao F, Peng Y K. Measurement of iodine value of pork's subcutaneous adipose tissue by interval partial least square and Raman spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1111001.
赵芳, 彭彦昆. 区间偏最小二乘法结合拉曼光谱测定猪肉皮下脂肪的碘值[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1111001.