

·信号与信息处理·

结构光条纹中心线的鲁棒提取

郭玲¹, 朱茂之²

(1.广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635; 2.广州复旦奥特科技股份有限公司, 广东 广州 510660)

摘要: 结构光条纹中心位置的精确检测是影响结构光系统精度的关键问题之一。提出一种多步骤的鲁棒性提取方法, 首先采用自适应阈值法剔除噪声点, 然后采用光条膨胀和细化方法, 得到初始的中心点, 并利用此初始中心点的梯度, 得到光条法线方向。最后, 在法线方向求取灰度重心, 得到光条亚像素中心线。该方法应用在基于线结构光检测原理的隧道轮廓变形监测装置中, 实验结果表明, 能准确提取光条纹中心。

关键词: 线结构光; 光条中心; 隧道轮廓; 变形监测

中图分类号: TN247, TP751

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-04-0030-04

Robust Method of Linear Structured Light Center Line Extracting

GUO Ling¹, ZHU Mao-zhi²

(1. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China; 2. Guangzhou Fudan Auto Science & Technology Inc., Guangzhou 510660, China)

Abstract: Detecting light stripe center position accurately has critical consequences for the accuracy of the structured light measurement system. A robust method which extracts the light stripe center by multi step is proposed. Firstly, the noise points are moved by adaptive thresholds. Then, the initial centers of light stripes are obtained using expansion and thinning algorithm. After that, those initial centers' normal direction can be gained with their gradient. At last, the sub-pixel center line of structured light is obtained by computing the gray-gravity along the stripe's normal direction. The method applied to a tunnel contour deformation detection system which measuring principle is linear structured light. The test results showed that the method can accurately extract the center line.

Key words: linear structured light; light stripe center; tunnel contour; deformation detection

线结构光(通常是激光)平面与物体表面相交, 会得到一条轮廓线光带, 理论上该光条应是无限薄的相贯线, 但实际上光平面有一定的宽度, 使得光条也有一定的宽度。另外, 因物体表面形状不规则和反射特性不一致, 图像传感器拍摄到的含有结构光条的图像, 其光条灰度和宽度也不均匀。这些给光条图像的条纹中心提取带来很大困难, 因此有必要专门研究激光条纹中心的提取方法, 是研制结构光三维视觉测量软件的核心问题^[1-2]。

常见的光条纹中心线提取方法有灰度阈值法、

极值法、梯度阈值法等^[3-5], 这些方法实现简单, 适用于曲率变化不大的直线条光纹。胡斌^[6]等提出了基于方向模板的结构光条纹中心检测方法: 使用多个方向模板来检测法线方向变化较大的光条纹中心的亚像素位置。该方法抗噪声能力强, 具有一定的断线修补能力, 但计算比较复杂。图像中的光条可以理解为曲线结构, Steger^[7]利用 Hessian 矩阵得到图像中光条纹的法线方向, 然后求法线方向上的极值点, 得到条纹中心线的亚像素位置。胡坤^[8]等对 Steger 方法计算效率进行了改进。其中, 胡斌等的方向

收稿日期: 2014-04-26

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAG01B04)

作者简介: 郭玲(1974-), 女, 宁夏银川人, 博士, 主要研究方向为机器视觉、模式识别、智能仪器仪表设计等。

模板法获取的方向固定,但精度不高;Steger方法具有精度高、鲁棒性好等有点,但是计算复杂,不适于工业测量。

隧道是城市地铁重要的基础设施,地理环境的变化、人为活动都会给隧道带来破坏性影响,并通过断面变形反映出来,测量隧道轮廓尺寸,是检测隧道变形的有效途径。文中应用线激光投射器与摄像机组成视觉传感器进行城市轨道隧道轮廓变形检测。由于隧道轮廓基本上是盾形结构,结构光与隧道拱面相交成曲线,基于直线的光条中心提取法不再适用。因此提出一种多步骤鲁棒提取方法,首先采用自适应阈值法剔除噪声点,然后采用光条膨胀和细化得到初始光条中心,求取该点的梯度,计算光条点的法线方向,最后,在法线方向通过计算灰度重心提取条纹亚像素图像坐标。仿真隧道如图1所示。



图1 1:1仿真隧道

1 结构光条纹的分布特征

一般激光器输出的激光束,既不是均匀平面光波,也不是均匀球面光波,而是一种结构比较特殊的高斯光束,如图2所示^[9]。沿 z 轴传播的高斯光束的电矢量表达式 E 是三维坐标 x, y, z 的函数,高斯光束的横截面光斑中心最亮,向外逐渐减弱。激光束经柱面镜反射得到一光平面,该光平面实际是有一定厚度的,它与被测物体表面的交线是有一定宽度的光亮的线条,称之为光条^[10]。该光条的横截面光强分布不是均匀的,而是近似服从高斯分布,而且亮度梯度变化较大,如图3所示。

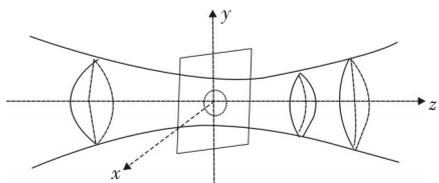


图2 高斯光束

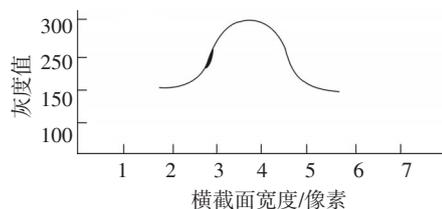


图3 光条横截面光强分布示意

2 光条中心提取算法

由图1和图3可以看出,光带是条曲线,且亮度分布不均匀,如果按照常规行列法提取中心,最后得到的结果会带来很大误差。文中采用多步骤法提取光条中心。

2.1 自适应阈值法提取光带

由于阈值法具有速度快特点,因此基于阈值法以及极值法、重心法,提出了自适应阈值提取法。算法步骤如下:

首先在光条图像的每列像素上找取本列光强最大值点,先判断这个最大值是否是光条上的数据点。用一个阈值来判断,如果小于此阈值,认为它是噪声点,而不是光条上的点,进行下一列的处理,若满足阈值要求,初步断定此极值点为光条中心点,以此极值点的灰度值为依据,算出本列的光强阈值。设最大值点灰度为 g_{max} ,阈值为 t ,则 $t = g_{max} - k$,其中 k 为经验值。所以阈值 t 就是本列光条光强最大值下浮几个灰度级得到的。这样得到的光条图像每列的阈值都是不一样的,它随各列的漫反射光强变化而变化。

2.2 膨胀和细化

为了避免光条的断线和过细,进行光条膨胀,由于测量得到光条图像的宽度一般为6个像素左右,所以选取 3×3 的模块对光条进行膨胀。将2.1节得到的光条图像进行二值化, 3×3 模块的取值与光条二值化后的值相同,进行膨胀。

2.3 骨骼细化

将膨胀后的光条进行骨骼细化,方法是固定行,求取每一列中膨胀后光条的中心点,以这个中心点作为初始光心。

2.4 求取光条的法线方向

求取2.3节初始光心的法线方向。设 $f(x_0, y_0)$ 是初始光心原始图像的灰度值,采用 sobel算子计算该点在 x 方向和 y 方向的梯度 G_x, G_y 。

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

图4 sobel算子

根据 Bazen 等^[11]方法,梯度方向角度 φ ($-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$)是

$$\varphi = \frac{1}{2} \angle(G_{xx} - G_{yy}, 2G_{xy}) \quad (1)$$

式(1)中, $G_{xx} - G_{yy}, 2G_{xy}$ 是点 (x_0, y_0) 为中心相邻窗口 W 的一阶导数运算和。

$$G_{xx} - G_{yy} = \sum_W (G_x^2 - G_y^2) \quad (2)$$

$$2G_{xy} = \sum_W 2G_x G_y \quad (3)$$

得到光条中心点 (x_0, y_0) 法线方向角为

$$\theta = \varphi + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

2.5 重心法提取光条中心坐标

设初始中心点 (x_0, y_0) 的光条宽度为 λ ,则沿着法线方向,重新计算光条灰度重心。计算公式如下

$$x_0 = \frac{\sum_{i=x_0-\frac{\lambda}{2}}^{x_0+\frac{\lambda}{2}} i \times f(i)}{\sum_{i=x_0-\frac{\lambda}{2}}^{x_0+\frac{\lambda}{2}} f(i)} \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{j=y_0-\frac{\lambda}{2}}^{y_0+\frac{\lambda}{2}} j \times f(j)}{\sum_{j=y_0-\frac{\lambda}{2}}^{y_0+\frac{\lambda}{2}} f(j)} \quad (6)$$

从而得到亚像素精度的光条中心图像坐标。

3 实验验证

在图1所示的1:1仿真隧道拱面上投射射线结构

光,多摄像机分段拍摄光条团,摄像机分辨率是 1280×1024 ,激光光源为 200 mW,线宽 2 mm。镜头前装有滤光片。应用 PC Pentium2.8,内存 1 G 主机, Matlab 上运行文中算法。图5~图8分别是原始图、采用自适应阈值后的图像、膨胀、及细化后的图像。



图5 原始图

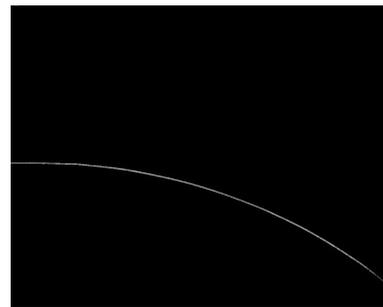


图6 阈值比较后图像

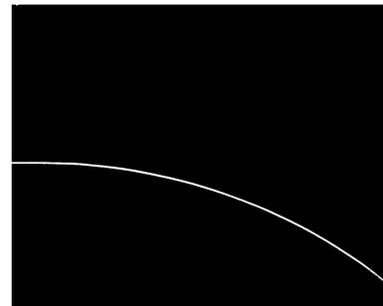


图7 光带粗化

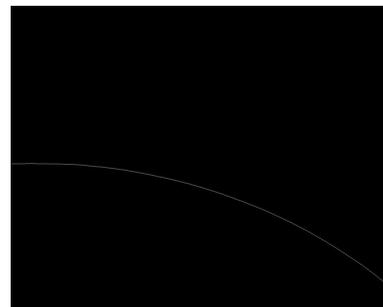


图8 细化后图像

在仿真隧道断面上任意取5个点,在拍摄图像中,通过文中提出的方法提取中心线获取这5个点的坐标(仿真隧道左下角为坐标原点)。同时,利用激光测距仪和激光投线仪反复测量这5个点的实际坐标。将通过图像反求得的坐标与实际坐标比对,

得到系统测量误差。测量结果如表1。

为了验证文中提出方法的优越性,采用传统膨胀细化后的初始中心点获取测量点坐标(为了简化,称其为简单图像法),测量结果如表2。

表1 文中方法测量结果

	x方向/mm			y方向/mm		
	文中图像法测量值	人工测量值	误差	文中图像法测量值	人工测量值	误差
测点1	1 206	1 206	0	1 733	1 733	0
测点2	1 719	1 718.5	0.5	3 105	3 104.6	0.4
测点3	3 897	3 896.7	0.3	4 223	4 222.3	0.7
测点4	5 871	5 870.6	0.4	3 444	3 443	1
测点5	6 668	6 668	0	1 759	1 759.3	-0.3
平均值			0.24			0.48

表2 简单图像法测量结果

	x方向/mm			y方向/mm		
	简单图像法测量值	人工测量值	误差	简单图像法测量值	人工测量值	误差
测点1	1 206.4	1 206	0.4	1 733.5	1 733	0.5
测点2	1 719	1 718.5	0.5	3 105.5	3 104.6	0.9
测点3	3 896	3 896.7	-0.7	4 222	4 222.3	-0.3
测点4	5 871	5 870.6	0.4	3 442.5	3 443	-0.5
测点5	6 667	6 668	-1	1 760	1 759.3	0.7
平均值			0.6			0.58

从表1和表2可以看出,采用文中提出的方法提取曲线结构光条中心点,比传统处理方式的精度高。

4 结 论

采取多步骤提取结构光中心图像坐标,有效地弥补了传统方法处理方式单一的不足。实验结果表明,该方法能快速且准确地获取光条中心,其像素精度达到亚像素级,鲁棒性高,满足线结构光三维测量的高精度要求。

参考文献

[1] 范生宏,刘昌儒,亓晓彤,等.结构光三维测量系统精度分析及验证[J].光电工程,2014,5:52-56.
 [2] 王顺,徐静珠,张益昕,等.结构光光条中心点信度评价

方法与应用[J].光学学报,2011,11:203-209.
 [3] 崔希军,杨川,刘保华,等.线性结构光心的自适应迭代提取法[J].西安交通大学学报,2007,41(1):73-76.
 [4] 王荣一.摄像机标定及关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011:30-50.
 [5] 杨建华,杨雪荣,成思源,等.线结构光三维视觉测量中光条纹中心提取综述[J].广东工业大学学报,2014,1:74-78.
 [6] 胡斌,李德华,金刚,等.基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J].计算机工程与应用,2002,11:59-60.
 [7] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
 [8] 胡坤,周富强.一种条纹中心线快速亚像素提取方法[J].光电技术应用,2005,20(6):59-63.
 [9] 孙长库,叶声华.激光测量技术[M].天津:天津大学出版社,2001:12-14.

- surement of dynamic deformations using a path-unbalance Michelson-interferometer-based optical fiber sensing device [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(3):662.
- [10] Osami Sasaki, Chikao Togashi, Takamasa Suzuki. Two-dimensional rotation angle measurement using a sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4):1132.
- [11] Takamasa Suzuki, Takanori Endo. Two-dimensional small rotation angle measurement using an imaging method [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(4):043604.
- [12] 黄银国.激光自准直微小角度测量基础技术研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [13] 所睿, 范志军, 李岩, 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. *激光与红外*, 2004(4).
- [14] 刘庆纲, 叶声华, 清慧. 光学内反射型精密角度传感器[J]. *仪器仪表学报*, 1998(2).
- [15] Plosker Effie, Bykhovsky Dima, Shlomi Arnon. Evaluation of the estimation accuracy of polarization-based roll angle measurement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(21):5158-5164.
- [16] 吴易明, 高立民, 陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3):525-529.
- [17] WANG Wen-liang, TAN Ji-chun, DENG Li-xin, et al. Three-dimensional angular measurement based on moiré fringe [C]// *Proc. of Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation*, 2010, 7544.
- [18] 李向荣, 乔彦峰, 刘微, 等. 船体三维角度变形的自准直干涉测量方法[J]. *光学技术*, 2005, 31(5):761-763.
- [19] 韩军海, 陈家斌, 葛远声, 等. 一种双 CCD 交汇测定载船艏艉线与飞机收尾线相对方位的实用方法[J]. *光学技术*, 2003, 29(5):581-586.
- [20] 翟玉生. 多自由度误差同时测量中滚转角高精度测量方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [21] Igor A, Konyakhin, Tatyana V Kopylov, et al. Optic-electronic systems for measurement the three-dimension angular deformation of axles at the millimeter wave range radio-telescope [C]// *Proc. of Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation*, 2012, 8759.
- [22] Konyakhin I A, Turgalieva T V. Three-coordinate digital autocollimator [J]. *Journal of Optical Technology*, 2013, 80(12):772-777.
- [23] Tatiana V Turgalieva, Igor A Konyakhin. Research of autocollimating angular deformation measurement system for large-size objects control [J]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, 8788:878832-1.
- [24] 周永兴. 飞行试验机翼变形测量的一种方法[J]. *测控技术*, 2013, 32(4):15-19.
- [25] 于起峰, 孙祥一, 姜广文, 等. 基于传递像机摄像测量的不稳定平台的静态基准转换方法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011(5).
- [26] YU Qi-feng, JIANG Guang-wen, FU Si-hua, et al. Fold-ray videometrics method for the deformation measurement of nonintervisible large structures [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(24):4683-4687.
- [27] Yu Q, Jiang G. Measuring deformation of large vessels with innovative broken-ray videometrics [C]// *22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Australia: 2008.

~~~~~

(上接第 23 页)

- [11] HUA You-jie, MA Hong-ping. Synthesis and packaging performance of regular spherical YAG Ce<sup>3+</sup> phosphors for white LEDs [J]. *Chin J Lumin*, 2013, 34(4):427-432.
- [12] Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308(5726):1274-1278.
- [13] 华有杰, 马红萍, 张驰, 等. 用于白光 LED 的规则球形 YAG Ce<sup>3+</sup> 荧光粉制备及封装性能研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(4):427-432.

~~~~~

(上接第 33 页)

- [10] 韦争亮. 基于彩色编码的结构光动态三维测量及重构技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [11] Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7):905-918.