

# 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法

蔡怀宇 冯召东 黄战华

天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 条纹中心提取是线结构光表面形貌测量的关键问题,提出一种基于主成分分析方法实现结构光条纹中心提取的方法。利用大津阈值法提取图像的感兴趣区域(ROI),在经两次高斯卷积得到条纹的梯度分布的基础上确定条纹中心的初始位置,利用主成分分析来确定这些点上法线方向;以初始位置为基准点,对条纹的灰度分布函数在法线方向进行二阶泰勒展开求得条纹中心的精确位置。实验结果表明,该算法具有速度快、精度高等特点,相对Steger算法,均方误差(MSE)小于0.003 pixel,速度提高了近3倍。该方法能够实现结构光条纹中心线的快速高精度提取,为结构光视觉检测的实时应用奠定了基础。

**关键词** 测量;形貌检测;线结构光;中心提取;主成分分析

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0308006

## Centerline Extraction of Structured Light Stripe Based on Principal Component Analysis

Cai Huaiyu Feng Zhaodong Huang Zhanhua

*Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** Centerline extraction of structured light stripe is the key step of topography measurement. The centerline extraction of structured light stripe based on the principal component analysis is proposed. Otsu's method is used to extract the region of interest (ROI) area of image. After twice Gaussian convolution, the gradient distribution of the ROI area is got, then the rough position of the stripe center is obtained based on the gradient distribution. Using principal component analysis the normal vector is obtained. Based on the rough position of the stripe center, the center of structured light stripe can be found in normal directions with second order Taylor series expansion of grayscale distribution function. The experimental results show that the algorithm has higher speed and precision characteristics. Compared with Steger algorithm, the mean square error (MSE) is less than 0.003 pixel, and it is nearly three times as fast as Steger algorithm. This method can realize the rapid and high precision extraction of structured light stripe, and lays a foundation of real-time application for structure light vision detecting.

**Key words** measurement; morphology detection; structured light; centerline extraction; principal component analysis

**OCIS codes** 120.6650; 150.0155; 140.3295; 100.3008

## 1 引言

线结构光表面形貌测量技术作为一种有效的光学测量方法,由于其速度快、精度高的优点在工业形貌测量<sup>[1]</sup>、逆向工程和文物数字化<sup>[2]</sup>等领域中应用广泛。线结构光表面形貌测量原理是根据投影结构光成像在CCD像元的位置,通过系统的参数反演计算出物体在物空间的三维坐标。主要包括两步:一是标定系统的

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAF14B03)

作者简介: 蔡怀宇(1965—),女,博士,教授,主要从事光电检测技术与仪器等方面的研究。E-mail: hycail@tju.edu.cn

各个坐标系的相互转换关系,包括相机参数的标定和激光平面与相机的位置关系的标定;二是激光条纹中心线的提取。条纹中心提取是非常关键的一步,它决定了图像在 CCD 像元中的位置坐标是否准确,从而也就决定了反算出的物空间的三维坐标。条纹中心线的精确快速提取是保证测量系统稳定性、实时性、精准性的前提。其中,稳健、快速、精确的图像条纹中心提取算法是实现高效测量的关键。

考虑到测量用的结构光条纹具有一定的宽度,测量环境和待测物体表面的光学性质都会对条纹中心的提取产生较大的影响<sup>[3]</sup>。近年来,国内外学者对条纹中心提取这一问题进行了大量的研究。其中比较传统的条纹中心提取方法有极值法、几何中心法、灰度重心法、方向模板法等<sup>[4]</sup>,特点是简单、快速,但精度不高,只能达到像素级别,难以满足工业测量对精度的要求。此后在传统方法的基础上提出了一些改进算法。胡斌等<sup>[5]</sup>提出了一种利用可变方向模板检测结构光条纹中心的方法,有一定的抗噪能力,但计算量较大;Lukas 等<sup>[6]</sup>提出了确定条纹中心的大致位置后取其位置附近相邻的若干像素进行高斯拟合来求取激光条纹中心的方法,但存在激光条纹形变不宜过大的限制,且高斯曲线拟合的计算量也较大;吴庆阳等<sup>[7]</sup>改进了方向模板法,对激光条纹先细化所获得条纹的骨架,应用方向模板确定条纹法线的方向,利用灰度重心法求条纹在法向的中心,由于只采用了四个方向的模板,法向计算误差较大;熊会元等<sup>[8]</sup>提出了应用灰度梯度计算条纹法线方向,在法线方向上应用灰度重心法来精确提取条纹中心的方法,该方法采用的 Sobel 算子求解条纹梯度的方法对噪声敏感。另外,Steger<sup>[9]</sup>利用 Hessian 矩阵得到图像中条纹的法线方向,对结构光条纹横截面上的灰度分布函数进行二阶泰勒展开得到亚像素中心,能达到亚像素的提取精度,但计算复杂度高,很难满足工业在线检测的要求。

本文在 Steger 算法的基础上,将 Steger 算法中利用 Hessian 矩阵求条纹法线过程用主成分分析(PCA)的方法代替,该方法在保证精度的基础上,避免了对图像进行多次二维高斯卷积,提高了提取的速度,满足系统在线测量的需求。

## 2 算法描述

从现有的中心提取算法来看,提取算法大体上可以分为两种:一是单纯考虑条纹的灰度分布,这种方法精度不高而且稳健性差;另一种就是基于条纹的微分几何属性,关键是如何快速有效地得到条纹的法线方向<sup>[10]</sup>。在第二种方法中比较具有代表性的是 Steger 算法。

Steger 算法通过求解图像的 Hessian 矩阵,利用 Hessian 矩阵绝对值最大的特征值对应的特征向量给出各点的法线方向,对条纹各点像素的灰度分布函数沿着法线方向进行二阶泰勒展开得到条纹的中心。Steger 算法具有很高的精度和稳健性<sup>[11]</sup>,缺点是需要对图像进行 5 次二维高斯卷积,计算量很大,难以满足实时要求。

激光条纹在条纹方向上梯度较小(理想情况为零),法线方向梯度最大,在较小区域内,每个像素点的法向量的方向变化很小,故可以选择一个大小合适的区域,在这个区域利用平均梯度值来求条纹的法线方向<sup>[12]</sup>。这为利用 PCA 方法来求激光条纹在局部区域的法向提供了依据。

PCA 最初由 Pearsan<sup>[13]</sup>于 1901 年提出,用于分析数据及建立数理模型,是一种分析、简化数据集的技术。它常用于减少数据集的维数,同时保持数据集中的对方差贡献最大的特征。其方法主要是通过对协方差矩阵进行特征分解<sup>[14]</sup>,以得出数据的主成分以及它们的权重,主成分对应协方差矩阵的特征向量,相应的权重就是协方差矩阵的特征值。利用 PCA 对图像梯度向量的协方差矩阵进行特征分解,得到的绝对值最大的特征值对应的特征向量就是条纹的法向。

相比 Steger 算法中利用图像的 Hessian 矩阵求解条纹法向量的方法,PCA 无需多次进行二维高斯卷积,显著地减少了计算量<sup>[15-16]</sup>,节约了条纹中心提取的时间。

### 2.1 条纹感兴趣区域的提取

结构光条纹图像具有较高的对比度,这里采用基于大津法的阈值提取方法把感兴趣区域(ROI)从背景中提取出来。不仅能有效减少背景噪声对后续条纹中心提取的影响,而且能较大地提高条纹中心提出的速度,以满足测量系统对实时性的要求。

大津阈值法能很好地区分出条纹和背景,而且不需要人工的干预,具有较强的自适应性。

## 2.2 初始点的提取

噪声较小时,常利用提取条纹的几何中心作为查找光条中心的初始点,几何中心对噪声敏感,轻微的噪声都会对初始点的提取造成较大的影响。考虑到实际测量过程中采集的图像具有较大的不确定性,噪声往往较大,图像的梯度使用图像与二维高斯的微分模板的卷积来代替<sup>[7]</sup>,这可以降低噪声对条纹中心提取的影响,起到较好的去噪效果。原图中的最大值点转换为卷积后图像的零点,并将最值点转换为零点,如图1所示,具体描述为

$$G = f(x,y) \otimes g(x,y), \quad (1)$$

式中高斯卷积核为

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

根据 Steger 的结论,  $\sigma$  的大小应满足  $\sigma \geq \frac{D}{2\sqrt{3}}$ ,  $D$  是条纹宽度。

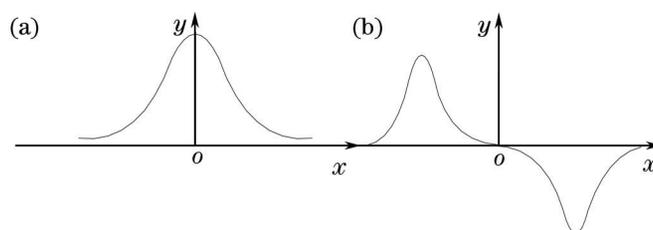


图1 高斯卷积对图像的作用。(a) 卷积前; (b) 卷积后

Fig.1 Role of Gaussian convolution of the image. (a) Before convolution; (b) after convolution

得到条纹图像的梯度分布图后,考虑到条纹中心提取的精度,选取那些梯度绝对值最小的2~3个点作为提取条纹中心的初始点。

## 2.3 条纹中心提取

图像的梯度向量为  $[G_x \ G_y]^T$ ,  $[G_x \ G_y]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial I(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix}$ ,  $I(x,y)$  代表图像的灰度值,建立梯度向量的协方差矩阵

$$C = \begin{bmatrix} \text{Cov}(G_x, G_x) & \text{Cov}(G_x, G_y) \\ \text{Cov}(G_y, G_x) & \text{Cov}(G_y, G_y) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\text{Cov}(\cdot)$  表示做卷积运算。选取的区域  $W$  以上述提取的初始点为中心。初始点两侧的像素基本是呈现对称分布的,故近似有  $E(G_x) = 0$ ,  $E(G_y) = 0$  成立,即  $G_x$  和  $G_y$  的期望值为零。有

$$C = \begin{bmatrix} \text{Cov}(G_x, G_x) & \text{Cov}(G_x, G_y) \\ \text{Cov}(G_y, G_x) & \text{Cov}(G_y, G_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(G_x^2) - [E(G_x)]^2 & E\{[G_x - E(G_x)][G_y - E(G_y)]\} \\ E\{[G_x - E(G_x)][G_y - E(G_y)]\} & E(G_y^2) - [E(G_y)]^2 \end{bmatrix} = \sum_W \begin{bmatrix} G_x^2 & G_x G_y \\ G_x G_y & G_y^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

可得特征值和相应的特征向量为

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left( \sum_W G_x^2 + \sum_W G_y^2 \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right)^2 + 4 \left( \sum_W G_x G_y \right)^2}, \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left( \sum_W G_x^2 + \sum_W G_y^2 \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right)^2 + 4 \left( \sum_W G_x G_y \right)^2}, \quad (6)$$

$$v_1 = \left[ \frac{1}{2} \left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right)^2 + 4 \left( \sum_W G_x G_y \right)^2} \quad \sum_W G_x G_y \right]^T, \quad (7)$$

$$v_2 = \left[ \frac{1}{2} \left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 \right)^2 + 4 \left( \sum_W G_x G_y \right)^2} \quad \sum_W G_x G_y \right]^T, \quad (8)$$

式中T为转置运算符,  $v_1$  和  $v_2$  分别为特征值  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  对应的特征向量。根据梯度向量的协方差矩阵的物理意义,有绝对值最大的特征值对应的特征向量为条纹的法线方向。由(5)式和(6)式可知  $\lambda_1 > \lambda_2$ , 故  $\lambda_1$  对应的特征向量  $v_1$  为条纹法线方向,对  $v_1$  进行归一化处理得到条纹法线方向的单位向量  $\mathbf{n} = [n_x \ n_y]^T$ 。

得到条纹的法线方向后,以条纹梯度绝对值的极小值点  $(x_0, y_0)$  为初始点,沿着法线方向将初始点的灰度值函数进行二阶泰勒展开得

$$I(x_0 + tn_x, y_0 + tn_y) = I(x_0, y_0) + tn^T \cdot \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} + \frac{t^2}{2!} n^T \cdot \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{n}, \quad (9)$$

式中条纹中心满足的条件为  $[tn_x, tn_y] \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \times [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ , 以确保在一个像素内,对应条纹中心有  $\frac{\partial I}{\partial t} = 0$  成立,

可得  $t = -\frac{n_x G_x + n_y G_y}{n_x^2 G_{xx} + 2n_x n_y G_{xy} + n_y^2 G_{yy}}$ , 从而可得条纹中心的精确位置  $(x_0 + tn_x, y_0 + tn_y)$ 。

综上所述,条纹中心提取的混合图像处理算法的主要步骤为:

- 1) 通过大津阈值提取图像的 ROI 区域,得到较为清晰的条纹轮廓线;
- 2) 将得到的 ROI 分别进行 2 次高斯卷积后得到条纹的梯度分布,在此基础上确定条纹中心的初始位置;
- 3) 应用 PCA 方法求出初始点的法线方向;
- 4) 对条纹横截面上的灰度分布函数在法线方向进行二阶泰勒展开,如(9)式,求得条纹中心的精确位置。

### 3 实验和结果分析

在 CPU 为 Pentium G640, 内存为 2G 的主机上,利用 Visual Studio 2010 开发环境,采用所提方法对大小为 1280 pixel×960 pixel 的图像进行处理。一幅图像的处理时间约为 69 ms,能够满足工业在线检测的要求。利用 Steger 算法处理相同图像的时间约为 200 ms,可见处理的速度提高了近 3 倍。

图 2 是利用所提算法提取条纹中心的过程和结果,图 2(a)和(b)分别给出了采集的原始图像和经阈值提取后 ROI 图像。为了更直观地显示条纹的梯度和法线,图 2(e)、(f)分别给出了条纹的局部的梯度和法线。

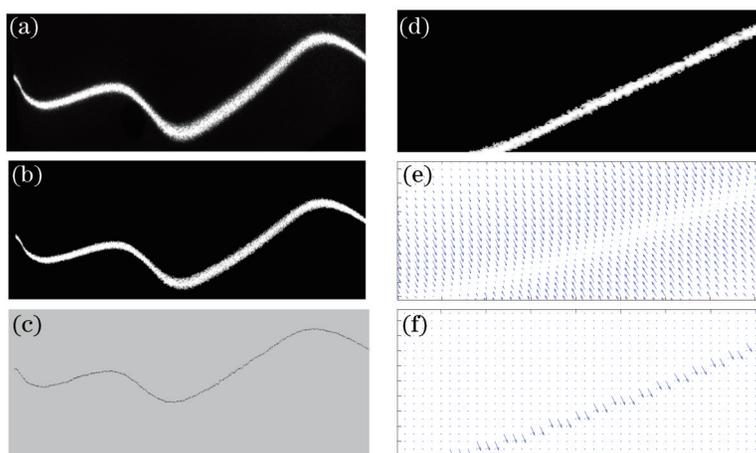


图 2 利用所得算法提取条纹中心的过程。(a) 条纹原始图像; (b) ROI 图像; (c) 提取结果; (d) 条纹的局部及此局部的(e)梯度和(f)法线

Fig.2 Process of centerline extraction with the proposed approach. (a) Original image of structured light stripe; (b) ROI of sbuctured light stripe; (c) extraction result; (d) part of the stripe; (e) gradient of (d), (f) normal vector of (d)

为了验证所提取算法的提取精度,将提取结果与 Steger 算法的提取结果进行比较,两种算法的提取结果的差异如图 3 所示,99%的数据点落在半径为 0.08 pixel 的范围内,两种算法的均方误差(MES)小于 0.003 pixel。

为了进一步验证算法对环境的适应性,将表面反光率较小的轮胎作为待测物体,对轮胎表面的结构光条纹进行中心提取,结果如图 4 所示,结果表明对于反光率较小的物体表面的条纹所提方法仍具有较好的提取效果。

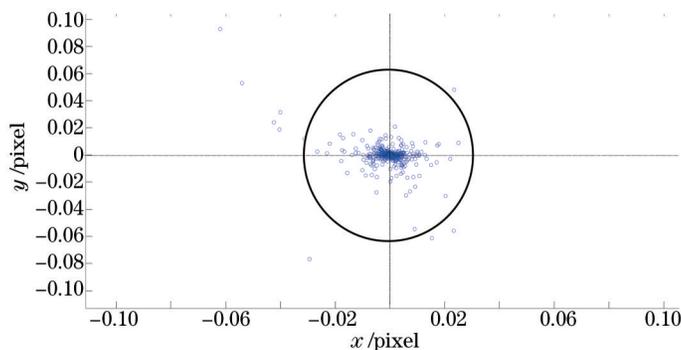


图3 所提方法与Steger算法的结果差异

Fig.3 Difference of extraction between Steger algorithm and the proposed algorithm

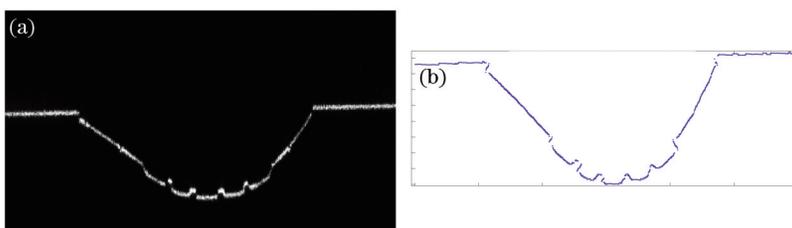


图4 轮胎表面条纹图像的中心提取。(a) 轮胎表面条纹图像;(b) 提取结果

Fig.4 Centerline extraction of stripe on tyre surface. (a) Original image of stripe on tyre; (b) extraction result

## 4 结 论

本文利用二维高斯卷积得到条纹图像的梯度分布,用极值法得到条纹中心的初始位置,将PCA方法用来求解条纹法线方向,对条纹横截面上的灰度分布函数在法线方向进行二阶泰勒展开求得条纹中心的精确位置。相比使用图像的Hessian矩阵来求取图像法向的方法,所提方法只有2次高斯卷积,具有较低的计算复杂度。实验证明,该方法在保证较高精度的同时,提取的速度提高了近3倍,能较好满足工业在线检测的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Y Zhang, S Wang, X Zhang, *et al.*. Freight train gauge-exceeding detection based on three-dimensional stereo vision measurement [J]. *Mach Vis Appl*, 2012, 24(3): 461-475.
- 2 L Marc, K Pulli, B Curless, *et al.*. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues[C]. *Proc Acm Siggraph*, 2000.
- 3 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Constructing feature points used for calibrating a structured light vision sensor by viewing a plane from unknown orientations[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2005, 43(10): 1056-1070.
- 4 Li Yingying, Zhang Zhiyi, Yuan Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100002.  
李莹莹, 张志毅, 袁 林. 线结构光光条中心提取综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100002.
- 5 Hu Bin, Li Dehua, Jin Gang, *et al.*. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(11): 42-45.  
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, 38(11): 42-45.
- 6 Lukas J, Fridrich J, Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise[C]. *SPIE*, 2006, 6072: 60720Y.
- 7 Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(4): 151-155.  
吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, 39(4): 151-155.
- 8 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Chen Chenghe. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1057-1062.  
熊会元, 宗志坚, 陈承鹏. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(5): 1057-1062.
- 9 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998,

- 20(2): 113–125.
- 10 Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508004.  
刘 振, 李 声, 冯 常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508004.
- 11 K T Diedrich, J A Roberts, R H Schmidt, *et al.*. Comparing performance of centerline algorithms for quantitative assessment of brain vascular anatomy[J]. Anat Rec, 2012, 295(12): 2179–2190.
- 12 Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of finger prints[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 905–918.
- 13 Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J]. Philosophical Magazine, 1901, 2(6): 559–572.
- 14 Abdi H, Williams L J. Principal component analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4): 433–459.
- 15 Lu Huimin, Xu Ming, Li Xun. Image deblurring with adaptive signal-noise ratio estimation for computational imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810002.  
卢惠民, 徐 明, 李 迅. 用于计算成像系统的基于信噪比自适应的图像去模糊研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810002.
- 16 Di Chengliang, Yan Wei, Hu Song, *et al.*. Research on adaptive width measuring method of cut tobacco and its application[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0708004.  
邸成良, 严 伟, 胡 松, 等. 自适应烟丝宽度测量方法及其应用研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0708004.
- 17 Gao Yan, Shao Shuangyun, Feng Qibo. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning [J]. Chinese J Lasers, 2014, 40(7): 0708005.  
高 岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法[J]. 中国激光, 2014, 40(7): 0708005.

栏目编辑: 何卓铭