

# 基于傅里叶-极坐标变换的光带图像局部弯曲检测

白福忠<sup>1\*</sup>, 张铁英<sup>2</sup>, 高晓娟<sup>1</sup>, 徐永祥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

<sup>2</sup>赤峰市产品质量计量检测所, 内蒙古 赤峰 024005

**摘要** 针对激光三角测量系统得到的含局部弯曲的光带图像, 提出了一种基于傅里叶-极坐标变换算法检测局部弯曲的方法。通过计算得到光带的法线方向, 将空域图像在法线方向上进行灰度投影, 直接得到了局部弯曲量。该方法计算过程简捷, 对随机噪声与光带强度的不一致分布具有较好的免疫力。理论分析与实验测试证实了该方法的有效性。

**关键词** 机器视觉; 局部弯曲检测; 傅里叶-极坐标变换; 光带图像

**中图分类号** TP391.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0815019

## Local Bending Measurement of Laser Stripe Images Based on Fourier-Polar Transformation

Bai Fuzhong<sup>1\*</sup>, Zhang Tieying<sup>2</sup>, Gao Xiaojuan<sup>1</sup>, Xu Yongxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China;

<sup>2</sup>Chifeng Product Quality and Measurement Inspect Institute, Chifeng, Inner Mongolia 024005, China

**Abstract** Aiming at the laser stripe images with the local bending obtained by the laser triangulation measurement system, a method based on the Fourier-polar transformation algorithm to measure the local bending is proposed. Through the computing, the normal direction of laser stripe is obtained. The gray projection of the spatial-domain image along the normal direction is conducted, and the magnitude of the local bending is obtained directly. This method has advantages of a simple computing process and high immunity to random noises and the non-uniform intensity distribution of laser stripe. The theoretical analysis and experimental test verify the effectiveness of this method.

**Key words** machine vision; local bending measurement; Fourier-polar transformation; laser stripe image

**OCIS codes** 150.0155; 120.4630; 120.6650

## 1 引 言

在基于激光三角测量原理的线结构光测量系统中, 激光器发射出的一字线结构光投射至被测物体(如工件、印刷电路板等)表面, 经物体表面高度信息调制后的激光光带含有物体的三维轮廓信息。通过分析光带图像可以获得被测物体的三维(3D)几何尺寸<sup>[1-4]</sup>, 该方法可用于质量检验、逆向工程、产品建模等领域中。这种结构光视觉测量技术具有非接触、快速、灵活性强等优势, 已发展成为最为有效的3D测量技术之一<sup>[5]</sup>。

在工程实际中, 有一类细长型、板条状产品, 如雪糕棒、木地板等, 其材质较软、外形结构特殊, 容易发生弯曲变形。其中有一类弯曲在工程上称作死弯, 即局部弯曲。局部弯曲的特点是在产品表面出现局部小面积的凹陷或凸起, 较大区域仍为平面。对这类产品进行质量检测时, 对局部弯曲程度有着严格的规定。含有局部弯曲信息的光带图像, 绝大部分光带均保持直线特征, 只是局部区域出现一定程度的弯曲变形。对于这类含有局部弯曲光带图像, 一般可以通过传统直线检测技术进行分析处理, 如光带中心提取<sup>[6-7]</sup>结合最小二乘拟合法、Hough

收稿日期: 2018-03-27; 收到修改稿日期: 2018-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(51765054)、内蒙古自然科学基金(2015MS0616, 2016MS0620)、内蒙古工业大学科研项目(X201703)

\* E-mail: fzbaiim@163.com

变换<sup>[8]</sup>、Radon 变换<sup>[9]</sup>、边缘跟踪算法<sup>[10]</sup>等。目前, 这些处理算法一般需要对目标图像进行阈值分割、轮廓提取或其他预处理操作, 处理过程繁琐, 当图像信噪比偏低、光带强度不均匀、光带强度较低或光带宽度较宽时, 它们的适应能力和检测精度将明显降低。

光带图像边缘沿法线方向的灰度具有最大的变化率, 即灰度梯度最大, 在频域中主要表现为高频成分, 因此幅度谱能量分布总会沿光带的法线方向伸展。傅里叶变换具有平移不变性, 光带目标位于图像中任意位置时, 其幅度谱始终以频谱图像的中心(即零频位置)为原点。极坐标变换可将笛卡儿坐标下的旋转成分转化为平移成分。本文将这两者结合起来, 对光带图像进行傅里叶变换, 再以幅度谱中心为原点进行极坐标变换, 由此得到光带目标的法线方向, 进而对光带图像在法线方向上进行灰度投影, 得到光带目标的局部弯曲量。

文献[11-12]提到的算法是对经极坐标变换后的空域图像进行傅里叶变换, 严格意义上应称为极坐标-傅里叶变换, 主要用到旋转不变特征, 用于两幅图像间的配准或图像检索。本文采用傅里叶-极坐标变换算法检测光带的局部弯曲, 该方法无需对图像进行滤波、阈值分割等预处理操作, 利用图像频域的整体信息, 对噪声、降质图像具有很好的适应性, 检测步骤简捷, 检测结果更为准确。

## 2 傅里叶-极坐标变换

### 2.1 二维傅里叶变换的平移与旋转特性

假设图像  $f_2(x, y)$  相对于图像  $f_1(x, y)$  而言, 存在平移与旋转变换, 表示为

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \phi + y \sin \phi - x_0, -x \sin \phi + y \cos \phi - y_0), \quad (1)$$

式中  $x, y$  为空域坐标,  $x_0, y_0$  为平移量坐标,  $\phi$  为旋转角度。

设  $F_1(u, v)$  与  $F_2(u, v)$  分别为  $f_1(x, y)$  与  $f_2(x, y)$  的傅里叶变换, 二者之间的关系为

$$F_2(u, v) = F_1(u \cos \phi + v \sin \phi, -u \sin \phi + v \cos \phi) \cdot \exp[-j2\pi(x_0 u + y_0 v)], \quad (2)$$

式中  $u, v$  为频域坐标。

设  $M_1(u, v)$  与  $M_2(u, v)$  分别为  $F_1(u, v)$  与  $F_2(u, v)$  的幅度谱, 则有

$$M_2(u, v) = M_1(u \cos \phi + v \sin \phi, -u \sin \phi + v \cos \phi). \quad (3)$$

(3)式显示, 幅度谱与平移( $x_0, y_0$ )无关, 且与

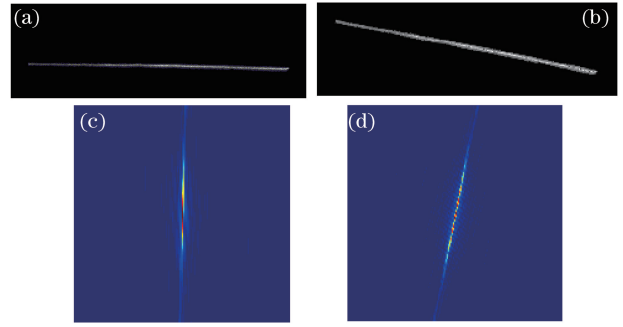


图 1 二维傅里叶变换的平移和旋转特性。

(a)  $f_1$ ; (b)  $f_2$ ; (c)  $M_1$ ; (d)  $M_2$

Fig. 1 Translation and rotation characteristics of 2D Fourier transformation. (a)  $f_1$ ; (b)  $f_2$ ; (c)  $M_1$ ; (d)  $M_2$  空间域图像具有相同的旋转角度  $\phi$ 。

二维傅里叶变换的平移与旋转特性可用图 1 所示的空间域图像(原始图像  $f_1$ , 含有平移和旋转变换的图像  $f_2$ )及其对应的幅度谱来直观反映。可以看出, 幅度谱  $M_1$  和  $M_2$  并不依赖于目标的平移量, 因为空域中的平移仅影响傅里叶变换的相位值。其次, 空域图像旋转某一角度  $\phi$  (给定角度为  $-10.2^\circ$ ) 时, 其幅度谱相应地旋转相同的角度。

幅度谱的能量分布总是沿目标图像灰度变化的最大梯度方向, 对于图 1 所示的两个直线目标, 其幅度谱能量的分布与直线目标的法线方向相对应。空域目标位于图像中任何位置时, 其幅度谱能量分布总是以频谱中心(零频)为原点。故可通过估计幅度谱中能量沿角度的分布情况来估计空域中含有类似直线边缘目标的法线方向或目标伸展方向。

计算幅度谱  $M$  中能量随角度的变化关系时, 以幅度谱中心为原点  $O$ , 如图 2 所示, 对每一小扇形区域  $\Delta\alpha$  内的能量值进行累加, 得到区域内总能量与角度之间的关系曲线  $h(\phi)$ , 曲线中峰值对应的角度即为目标的法线方向。通过沿轮辐线积分可得到角度为  $\phi_k$  时扇形区内能量累积值为

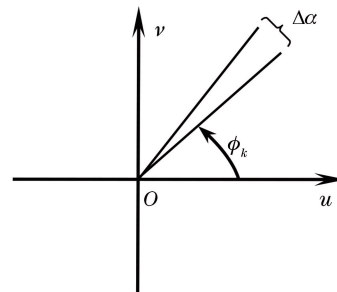


图 2 用于估计幅度谱中能量随角度变化关系时的扇形区域

Fig. 2 Fan-shaped area used to evaluate relationship between energy and angle in magnitude spectrum

$$h(\phi_k) = \int_{\phi_k - \Delta\alpha/2}^{\phi_k + \Delta\alpha/2} \int_0^\rho M(r, \phi) dr d\phi, \quad (4)$$

式中  $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\rho$  为最大半径。 $\phi_k$  变化一周后可得到能量与角度间的关系曲线  $h(\phi)$ 。

### 2.2 极坐标变换

事实上,幅度谱为离散信号,(4)式中的  $h(\phi_k)$  可通过对角度满足  $(\phi_k - \Delta\alpha/2) < \phi < (\phi_k + \Delta\alpha/2)$  的矩形网格里的幅度值进行累加得到。将笛卡儿坐标系下的幅度谱转化至极坐标系中再计算  $h(\phi)$ , 过程更为有效便捷。

笛卡儿坐标系中幅度谱的某一像素  $(u, v)$ , 表示为极坐标系中  $(r, \phi)$ , 转化公式<sup>[13-14]</sup>为

$$\begin{cases} r = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \phi = \tan^{-1}(v/u) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $r$  表示笛卡儿坐标系下某一像素  $(u, v)$  对应矢量(相对于原点)的幅值; $\phi$  为该矢量的幅角,取逆时针方向为正。

极坐标变换的示意图如图 3 所示,笛卡儿坐标系中的一点映射为极坐标系中对应点的关系式由(5)式确定。根据极坐标变换原理可知,笛卡儿坐标系中以原点为圆心的圆环线映射为极坐标系中平行于  $\phi$  轴的横向线;笛卡儿坐标系中过原点的辐线映射为极坐标系中平行于  $r$  轴的纵向线,故极坐标系下沿  $r$  方向进行累加便可得到  $h(\phi)$ 。

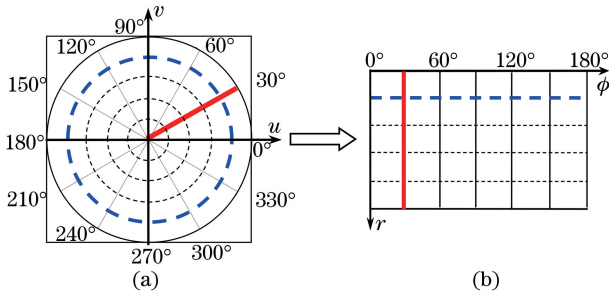


图 3 极坐标变换示意图。(a)笛卡儿坐标系;(b)极坐标系  
Fig. 3 Schematic of polar transformation. (a) Cartesian coordinate; (b) polar coordinate

为了得到更准确的  $h(\phi)$ , 对幅度谱进行极坐标变换时,仅分析图 4 所示的环形区域,即  $\epsilon\rho' < r < \rho'$ , 其中  $\rho'$  为幅度谱图像的半径或图像尺寸(长或宽的最小值)的一半。一般情况下低频值很大,在实际处理时选择系数  $\epsilon = 0.1$ , 因此半径范围为  $0.1\rho' < r < \rho'$ 。由于二维傅里叶变换具有原点对称性,故只需针对幅度谱上半部分进行极坐标变换即可计算幅度谱的能量分布方向,故角度范围为  $0^\circ \leq \phi < 180^\circ$ 。

图 1 所示的幅度谱  $M_1$  和  $M_2$  经极坐标变换后

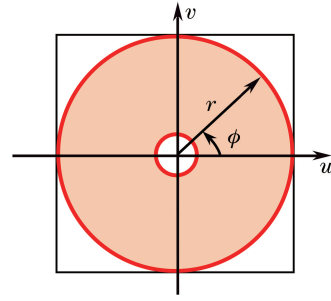


图 4 极坐标变换时的环形区域

Fig. 4 Ring-shaped area used for polar transformation

的结果如图 5 所示,可以看出,幅度谱中相对于原点的旋转成分被转化为极坐标系中沿  $\phi$  方向的平移。

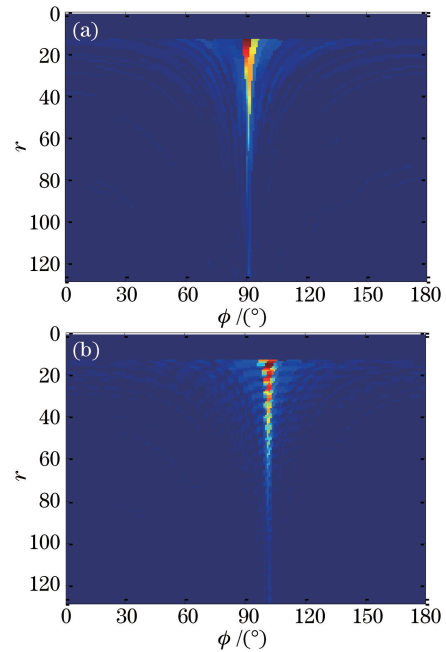


图 5 图 1 所示幅度谱的极坐标变换。(a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$

Fig. 5 Polar transformation of magnitude spectra shown in Fig. 1. (a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$

### 2.3 光带法线方向的计算

通过傅里叶-极坐标变换,可将(4)式表示的幅度谱扇形区域的积分转化为极坐标系中沿  $r$  方向的累加和,即

$$h(\phi_k) = \sum_{r=0.1\rho'}^{\rho'} M(r, \phi_k). \quad (6)$$

当  $\phi_k$  在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内变化时计算出  $h(\phi)$ 。

根据图 5 所示的极坐标变换结果计算出的  $h(\phi)$  曲线如图 6 所示。两条曲线的峰值位置分别为  $\phi_1 = 90.87^\circ$ ,  $\phi_2 = 101.16^\circ$ , 该角度即为图 1 所示两幅图像中光带目标的法线方向。直线目标的伸展方向为  $\theta = 90^\circ - \phi$ , 其中  $\theta$  表示直线目标与  $x$  轴正方向之间的夹角,逆时针为正。因此两幅图像中光带

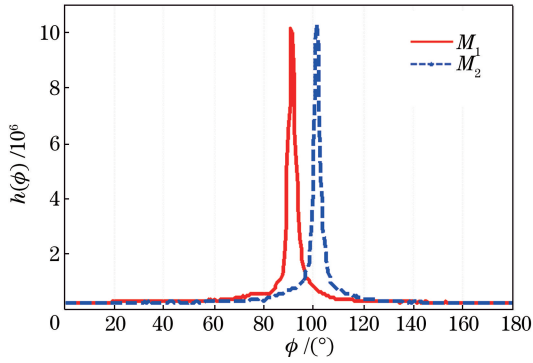


图 6 能量与角度间的函数关系

Fig. 6 Energy as a function of angle

目标的伸展角分别为  $\theta_1 = -0.87^\circ$ 、 $\theta_2 = -11.16^\circ$ ，二者之差为  $-10.29^\circ$ ，与给定角度相符。

### 3 基于方向投影的光带位置检测

一幅图像在给定角度  $\varphi$  上的方向投影表示为

$$R(x') = \int f(x' \cos \varphi - y' \sin \varphi, x' \sin \varphi + y' \cos \varphi) dy', \quad (7)$$

式中  $\varphi$  为投影坐标轴  $x'$  与图像坐标  $x$  轴的夹角。投影坐标  $(x', y')$  与原图像坐标之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$\varphi = 90^\circ, 0^\circ$  分别表示水平、垂直投影。对于给定角度  $\varphi$ ，(7) 式表示沿这一方向上的线积分或灰度累加<sup>[15]</sup>，如图 7 所示，若沿矩形目标长边缘的法线方向进行投影，由此计算出的方向投影曲线  $R(x')$  中方波信号的边界将对应于矩形目标的长边缘轮廓。

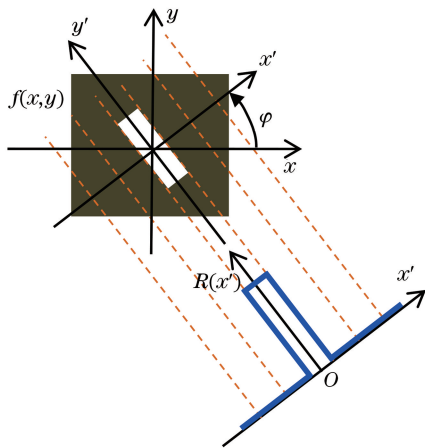


图 7 方向投影示意图

Fig. 7 Schematic of directional projection

根据计算出的法线角度 ( $\phi_1 = 90.87^\circ$ ， $\phi_2 = 101.16^\circ$ )，对图 1 中两幅图像  $f_1$  与  $f_2$  分别进行方

向投影，结果如图 8 所示，曲线脉冲相对于峰值左右对称、接近高斯分布，脉冲宽度均为 14 pixel，该数值对应于光带宽度，说明光带目标近似为直线，不存在局部弯曲起伏。图 8 中横坐标  $x'$  的原点对应于原图像 ( $f_1$  与  $f_2$ ) 的中心位置，曲线峰值位置相当于光带中心线在图像坐标  $y$  轴上的截距。通过上述分析，可获得光带中心线的拟合直线参数 (斜率与截距)。

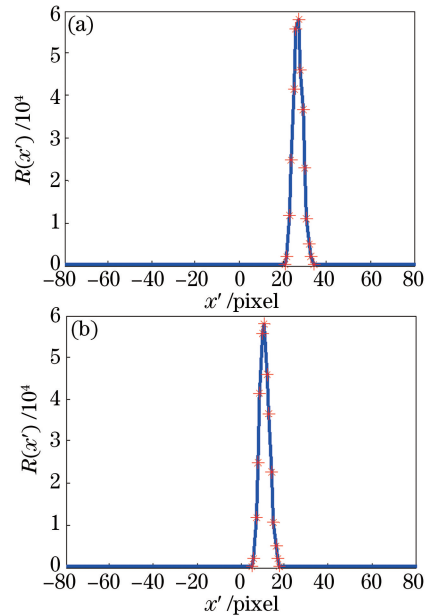


图 8 图 1 中图像在目标法线方向上的投影曲线。(a)  $f_1$ ；(b)  $f_2$

Fig. 8 Projection curves along normal direction of images shown in Fig.1. (a)  $f_1$ ；(b)  $f_2$

### 4 光带图像局部弯曲的工程测量实验

针对长度为 114 mm 的细长平面木制品建立了形状误差检测的激光三角测量系统，激光器发出线结构光投射在产品表面。若表面出现局部凸起或凹陷时，光带图像将发生变形。

实验中采集到的两幅大小为  $1250 \text{ pixel} \times 280 \text{ pixel}$  的光带图像如图 9(a)、(b) 所示。利用傅里叶-极坐标变换算法得到幅度谱能量与角度的关系曲线  $h(\varphi)$  如图 9(c)、(d) 所示，计算出光带法线方向角分别为  $88.18^\circ$  和  $89.97^\circ$ 。实验图像在各自法线方向上的投影结果如图 9(e)、(f) 所示，曲线上除了明显的峰值外，还有一个距离峰值位置最远的拐点，如图 9 中小矩形框所示，二者位置之差即为局部弯曲量。由此得到两幅实验图像的局部弯曲量分别为 30 pixel 和 24 pixel。

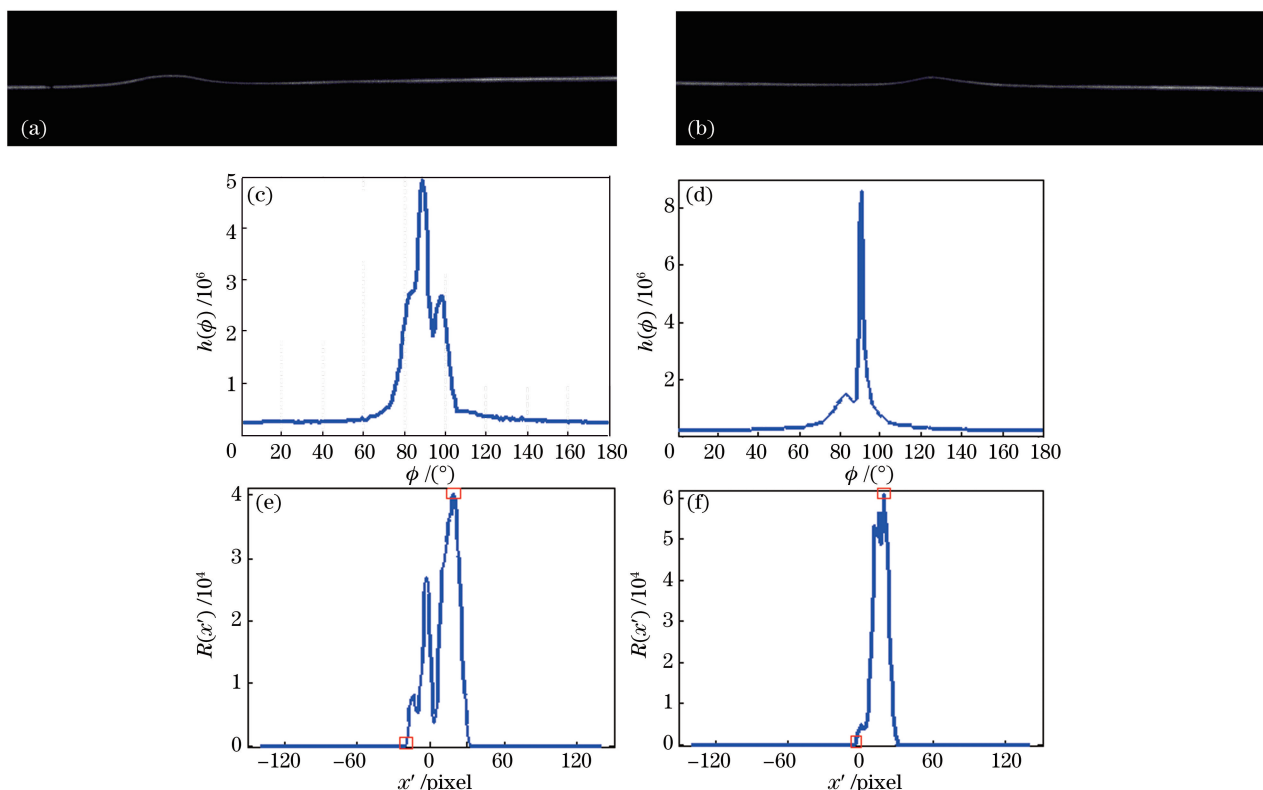


图 9 光带图像局部弯曲的实验检测结果。(a)(b) 实验采集的光带图像；(c)(d) 经傅里叶-极坐标变换后得到的  $h(\phi)$ ；(e)(f) 光带图像在法线方向上的投影曲线

Fig. 9 Experimental detecting results of local bending of laser stripe images. (a) (b) laser stripe images recorded in experiment; (c) (d)  $h(\phi)$  obtained after Fourier-polar transformation; (e) (f) projection curves of laser stripe images along normal direction

## 5 方法的性能测试及讨论

为了进一步验证所提方法的性能,在图 9(b) 对应的被测木制品表面人为添加局部污染,使物体表面的反射率发生较大起伏变化,此时光带目标将出现宽度不均匀与强度不均匀特征。同时,通过数值方法在该光带图像中加入均值为 0.1、方差为 0.005 的高斯随机噪声,实验图像如图 10(a) 所示,其中两个矩形区域即为污染区域的光带。经傅里叶-极坐标变换后的结果及  $h(\phi)$  曲线如图 10(b) 所示,得到光带法线方向角为  $89.97^\circ$ ,与由图 9(d) 计算出的角度值相等。实验图像在该法线方向上投影后的结果如图 10(c) 所示,投影前通过将图像各像素的灰度值减去背景灰度后可以消除投影曲线中  $R(x')$  值的整体偏移。比较图 10(c) 与图 9(f) 发现,两条曲线相似度极高,且由图 10(c) 计算出的局部弯曲量与图 9(f) 的计算结果吻合。

传统方法一般需要提取光带中心线,采用直线拟合算法(如最小二乘法或者 Hough 变换法)得到直线参数,进而计算拟合直线与中心线上最远点之

间的距离,由此得到弯曲量。光带中心线提取与直线拟合过程均会引入计算误差,尤其是光带目标偏低的信噪比会对中心线提取算法的稳健性提出更高要求。图 11 所示为利用文献[16]提出的灰度重心法对图 10(a) 进行中心线提取后的结果,在光带亮度偏暗区,中心坐标提取错误的概率显著上升,由此计算出的局部弯曲量也是不准确的,甚至是错误值。光带中心提取时还应考虑光带的方向,否则在光带曲率变化较大位置处必将产生较大的计算误差<sup>[17]</sup>,如图 11 放大显示区域所示。而阈值化的检测算法往往需要阈值分割、骨架化处理等预处理操作,过程繁琐且精度不可控。

上述分析表明,当光带目标的宽度及强度出现不均匀分布、图像中存在较大随机噪声时,所提方法仍能实现准确检测;而一些传统方法既不能直接获得被测结果,还容易受光带图像质量的影响。

## 6 结 论

利用基于一字单线结构光的三角测量技术测量平板的局部起伏时,关键技术是对采集到的光带图

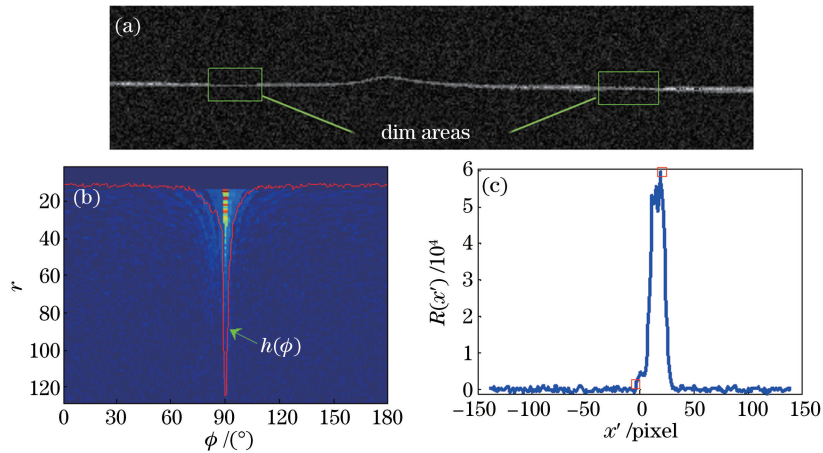


图 10 含有局部污染并加入高斯噪声的光带图像的实验结果。(a)光带图像；(b)傅里叶-极坐标变换结果与  $h(\phi)$ ；  
(c) 光带图像在法线方向上的投影曲线

Fig. 10 Experimental results of laser stripe images with local contamination and Gaussian noises. (a) Laser stripe image; (b) Fourier-polar transformation result and  $h(\phi)$ ; (c) projection curve of laser stripe image along normal direction

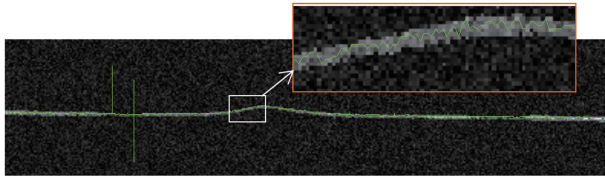


图 11 灰度重心法对图 10(a)中心线的提取结果  
Fig. 11 Extracting result of center-line in Fig. 10(a)  
by gray level gravity algorithm

像进行局部弯曲检测,重点对光带图像的处理方法进行了研究。采用傅里叶-极坐标变换算法估计光带目标的法线方向,对光带图像进行了灰度方向投影以实现光带目标检测,由投影曲线直接计算得到了光带局部弯曲量。检测算法只包括傅里叶变换、极坐标变换与灰度投影三个处理过程,无需对原始图像进行预处理操作,无需人工参与,算法简捷。通过三个实际光带图像的检测实验,证实了该方法应用于光带局部弯曲检测及直线类目标检测的有效性,该方法对随机噪声、光带强度不一致分布等情况具有较好的免疫力。

### 参 考 文 献

[1] Liu B, Wang P, Zeng Y, *et al.* Measuring method for micro-diameter based on structured-light vision technology[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(7): 666-669.  
[2] Zhou X M, Liu H B, Ge J M. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512001.  
周兴敏, 刘恒彪, 葛剑敏. 激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正[J]. 光学学报, 2015, 35(5):

0512001.

[3] Li G N, Tan Q C, Kou Y, *et al.* A new method for calibrating line structure-light 3D measurement model[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1334-1339.  
李冠楠, 谭庆昌, 寇莹, 等. 一字线结构光三维测量模型的新型标定方法[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1334-1339.  
[4] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.  
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.  
[5] Zhang X, Zhang J. Summary on calibration method of line-structure light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001.  
张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020001.  
[6] Hu K, Zhou F Q, Zhang G J. Fast extraction method for sub-pixel center of structural light stripe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1326-1327.  
胡坤, 周富强, 张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1326-1327.  
[7] Wu Q Y, Su X Y, Li J Z, *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] Fernandes L A F, Oliveira M. Real-time line

- detection through an improved Hough transform voting scheme[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(1): 299-314.
- [9] Zhang S P, Zhang C T. Shoreline detection method in video images based on Radon transform and gradient tracking algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(3): 57-62.  
张锁平, 张春田. 基于 Radon 变换和梯度跟踪的海岸线提取算法[J]. *光电工程*, 2009, 36(3): 57-62.
- [10] Qu B, W J X, Zheng C Q, *et al.* A fast boundary tracking method based on the rule of region-growth[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2002, 34(2): 100-103.  
屈彬, 王景熙, 郑昌琼, 等. 一种基于区域生长规则的快速边缘跟踪算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2002, 34(2): 100-103.
- [11] Fan C N, Chen J K, Fu D S. 2-dimensional polar Fourier descriptor applying in image retrieval[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(24): 77-79.  
范春年, 陈建坤, 傅德胜. 一种二维极坐标傅里叶描述子在图像检索中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(24): 77-79.
- [12] Gan H J, Hua W S. Post processing technique for correction results based on Fourier-polar transformation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 42(8): 939-943.  
甘厚吉, 华文深. 基于傅里叶-极坐标变换的相关结果后处理技术[J]. *应用光学*, 2010, 42(8): 939-943.
- [13] Wang Q, Ronneberger O, Burkhardt H. Rotational invariance based on Fourier analysis in polar and spherical coordinates[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(9): 1715-1722.
- [14] Guo Y C, He W H. A frequency-domain image registration algorithm using the improved polar transform[J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 32(2): 98-104.  
郭永彩, 何卫华. 改进极坐标的频域图像配准算法[J]. *重庆大学学报*, 2012, 32(2): 98-104.
- [15] Gong L X, Hu H P, Bai Y P, *et al.* Vehicle license plate slant correction based on mathematical morphology and Radon transformation[J]. *Proceedings of 6th International Conference on Natural Computation*, 2010: 3457-3463.
- [16] Van Assen H C, Egmont-Petersen M, Reiber J H C. Accurate object location in gray level images using the center of gravity measure: Accuracy versus precision[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(12): 1379-2384.
- [17] Liu B, Shen K, Wei Z C, *et al.* High-precision measurement system for micro-diameter based on structured-light vision technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(12): 126-129.  
刘斌, 沈康, 魏兆超, 等. 基于线结构光视觉技术的微小直径高精度测量系统[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(12): 126-129.