

光栅条纹图像方向自适应滤波方法

郭厚焜¹ 罗 晖¹ Kevin Xi² 吴 峰¹

(¹华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013
²Kyoritsu Electric Corporation (Canada), Richmond Hill, Ontario, L4B 2N6, Canada)

摘要 对基于投影条纹图像的三维轮廓成像术中的图像预处理方法进行了分析和研究。针对条纹图像在条纹方向数据同性、对滤波窗口形状、大小和方向比较敏感的特点,提出了方向自适应滤波方法。该方法首先运用重心法计算条纹的方向,并根据直线拟合的线性相关度调整滤波窗口的大小,以取得更为准确的条纹方向。然后调整滤波窗口的方向,使之与光栅条纹的方向一致,最后再根据滤波效果优化窗口在长宽方向的参数,使之充分利用光栅条纹图像在条纹方向上的数据同性的特点,有效避免了条纹法线方向的数据变化对滤波带来的影响。实验结果表明,该方法比其他常规的单一方向的矩形、圆形窗等滤波方法具有更好的滤波效果。

关键词 图像处理; 方向自适应滤波; 线性拟合; 条纹图像; 三维光学测量

中图分类号 TP911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.011004

Method of Directional Adaptive Filter for Fringe Image

Guo Houkun¹ Luo Hui¹ Kevin Xi² Wu Feng¹

(¹School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Jiangxi, Nanchang 330013, China
²Kyoritsu Electric Corporation (Canada), Richmond Hill, Ontario, L4B 2N6, Canada)

Abstract A novel method of directional adaptive filter for fringe image is proposed based on the investigation of pretreatment method of fringe image on three-dimensional pattern profilometry technique. For a fringe image filter, the direction and the size of filter window are quite sensitive characteristics. The gray values of the stripe image change periodically in the normal direction, and keep almost the same values in the stripe direction. The fringe direction is calculated by gravity method. The size of data window is automatically adjusted according to the linear dependency to get the correct direction. The length and the width of the filter window are optimized based on the filtering result checking. By this algorithm, it can get the correct stripe direction and the right size parameters of the filter windows, as a result to get the qualified filtered image. This method is verified by the experiments.

Key words image processing; directional filtering; linear fitting; fringe pattern; three-dimensional measurement

OCIS codes 100.2000; 030.4280; 120.2440

1 引言

在投影光栅三维轮廓成像技术中,人们通过投影光栅条纹图像到被测物体的表面,利用经过被测物体表面调制后的干涉条纹图像解调出调制图像的相位变化,根据条纹图像的相位变化和物体表面高度的几何关系得到物体表面的高度信息,实现物体三维表面的测量^[1~3]。在基于光栅投影的三维轮廓的测量过程中,光栅图像的预处理是该方法实施的重要环节之一。常规的滤波方法^[4~9]均没有考虑条纹图像光强/灰度分布具有方向性的特点,即:图像灰度值沿条纹方向变化缓慢,而沿条纹的垂直方向按接近正弦周期变化。因此,用这些方法对干涉条纹图进行滤波时受到沿条纹的垂直方向灰度值周期变化的影响。频域滤波^[7,8]方法,对于一些表面梯度较小被测对象有较好的效果。但是,对于一些含有高噪声、密度较大的条纹图,当条纹的空间频率与噪声频率较为接近、出现频率混叠的时候,傅里叶变换法的滤波方法也无法完成滤波的任务。

文献[10,11]中提到的旋滤波方法考虑了条纹图的特征,选择在条纹的切线方向上进行滤波,在切线方

收稿日期: 2010-07-20; 收到修改稿日期: 2010-10-18

作者简介: 郭厚焜(1965—),男,硕士,教授,主要从事图像处理与识别、三维轮廓检测、状态监测等方面的研究。

E-mail: guohoukun@yahoo.com.cn

向上滤波只需保留均值部分,其他的都是噪声成分,可以滤掉。这种方法能较大限度地消除噪声而不损害条纹特征,因此它对散斑干涉条纹图的滤波效果较好。但是,旋滤波方法也存在一些缺点:一是旋滤波只选择了8个或16个离散的方向,因此切线方向不够准确;二是它仅通过所选取直线窗口内数据求均方差值并进行比较判别,因此它受噪声的影响较大;三是当图像的噪声水平较高时,必须取较大的窗口才能消除噪声,或者当条纹的曲率较大时,都可能引起对条纹特征的损害。基于对这种限制的考虑,文献[12,13]又提出了曲面大窗口滤波方法。该方法首先在减模式条纹图上用曲面拟合的方法得到条纹方向图,然后以当前点为中心,沿两个方向进行跟踪,得到条纹等值线,并以等值线为中心向两边扩展得到曲面大窗口,最终在曲面大窗口内进行均值滤波。使得曲面大窗口滤波的效果得到较大的改善。

本文对现有的常规的滤波方法进行了分析和探讨,并针对光栅条纹图像在条纹方向灰度值变化缓慢的特点,提出了基于重心法的方向自适应滤波方法。并对该方法进行了理论探讨和实验研究。

2 光栅条纹图像

光栅条纹图像可以由计算机程序编制,也可以用借助于光栅的干涉和衍射得到。如图1所示是一个典型的光栅投影系统。该由投影仪、摄像机和被测物体构成。 I_s 为光栅模式,即投影像素单元的灰度分布,由人为设置, I_p 为投影出的光栅条纹在空间中的光强分布, I_c 为拍摄得到的条纹图像的灰度分布。光栅在空间中应满足正弦分布。测量时,根据系统的空间结构关系,由条纹图像 I_c 重构出被测物体的表面形状。用计算机程序编制的正弦光栅如图2所示。该光栅模式可表示为

$$I_s(u, v) = a + b \cos[\theta^s(u, v)], \quad (1)$$

$$\theta^s(u, v) = \frac{2\pi}{T}u, \quad (2)$$

式中 (u, v) 为投影像素单元的坐标, $I_s(u, v)$ 为 (u, v) 点的灰度值, a 和 b 分别为正弦光栅的直流基波分量和振幅, $\theta^s(u, v)$ 为 $I_s(u, v)$ 对应的相位, T 为周期长度,即一个周期所包含的投影像素个数。

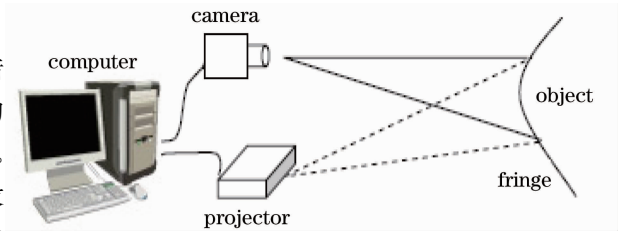


图1 光栅投影系统

Fig. 1 Grating projection system

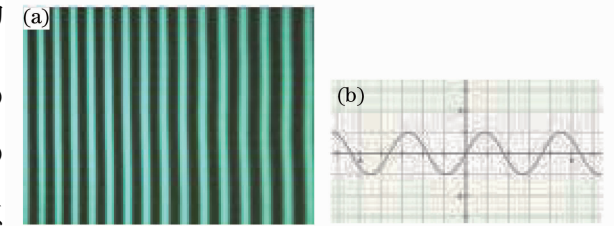


图2 (a)正弦光栅条纹图像,(b)条纹垂直方向光强分布

Fig. 2 (a) Sinusoidal grating image, (b) optical intensity distribution perpendicular to grating fringe

3 基于重心法的方向自适应滤波方法

3.1 条纹方向算法

- 1) 参数假设:图像 $I[M \times N]$ 的大小为 $M \times N$ 。其中, M, N 分别为图像在纵向和横向的像素值。
- 2) 选取初始窗口:取一任意大小 $m \times n$ 的矩形窗口 $W[m \times n]$,如 $3 \times 3, 5 \times 5$ 等;
- 3) 截取窗口数据:在图形中取任意点 $P(i, j)$,并以此点作为窗口中心 $P_0[x_0(i), y_0(j)]$,并截取窗口(如 3×3)数据为

$$W\{I(i, j), [m \times n]\} = \begin{bmatrix} I(i-1, j-1) & I(i-1, j) & I(i-1, j+1) \\ I(i, j-1) & I(i, j) & I(i, j+1) \\ I(i+1, j-1) & I(i+1, j) & I(i+1, j+1) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

- 4) 计算重心坐标:计算窗口数据中每一行(第 i 行)重心坐标:设图像的灰度表示为: $I(i, j)$,则窗口中各行(第 i 行)的中心坐标 $(x_0(i), y_0(i))$ 可表示为

$$x_0(i) = \frac{\sum_{j=1}^n [i * I(i, j)]}{\sum_{j=1}^n [I(i, j)]}, \quad y_0(i) = i, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

- 5) 线性拟合:用最小二乘法将各行 $(i = 1, 2, \dots, m)$ 重心坐标拟合成直线,并计算其斜率 $k(i, j)$ 和倾角 $\theta(i, j)$ 。

i) 线性相关性检查

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \right]}, \quad (5)$$

式中 $\bar{x} = \sum_{i=1}^m x_i/m$; $\bar{y} = \sum_{i=1}^m y_i/m$ 。若 $|r| \rightarrow 1$, x, y 之间线性关系好; $|r| \rightarrow 0$, x, y 之间无线性关系, 拟合没有意义。

ii) 线性拟合

假定该窗口区的条纹方向符合直线: $y = a + bx$, 其中 a, b 为求解参数。 b 为直线斜率。根据最小二乘法的基本原理, 即约束条件为 $s = \sum [y_i - f(x_i)]^2 = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 \rightarrow \min$ 因此有

$$\frac{\partial s}{\partial a} = -2 \sum [y_i - (a + bx_i)] = 0; \quad \frac{\partial s}{\partial b} = -2 \sum [y_i x_i - (a + bx_i)x_i] = 0 \quad (6)$$

解得

$$a = \left(\sum_{i=1}^m x_i y_i \sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2 \right) / \left[\left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2 \right], \quad (7)$$

$$b = \left(\sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i - m \sum_{i=1}^m x_i y_i \right) / \left[\left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2 \right],$$

iii) 计算斜率 $k(i, j)$ 和倾角 $\theta(i, j)$

$$k(i, j) = b, \quad (8)$$

$$\theta(i, j) = \arctan[k(i, j)]. \quad (9)$$

3.2 自适应滤波窗口的算法

1) 窗口方向: 窗口的方向由(7)式计算得到的倾角 $\theta(i, j)$ 决定。

2) 窗口大小:

i) 根据(5)式计算线性相关度 r ;

ii) 根据 r 的大小调整窗口尺寸 (m, n) 的大小。沿 r 增大的方向调整窗口参数 m, n 的大小, 使得 r 大于设定的阈值 r_0 , 并尽可能取得最大值(接近于 1)以确保条纹方向计算结果的正确性;

iii) 滤波效果检测。滤波效果的检测通过检查滤波前后强度函数的均方差实现。具体步骤为:

步骤 1: 将滤波前的原始图像 $I_0(i, j)$ 按正弦曲线以行为单位拟合各行数据, 得到拟合后的图像数据 $I_{f0}(i, j)$;

步骤 2: 计算原始图像的光强函数 $I_0(i, j)$ 与它的正弦拟合光强函数 $I_{f0}(i, j)$ 的均方差:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_0(i, j) - I_{f0}(i, j)]^2}; \quad (10)$$

步骤 3: 将滤波后的图像 $I_k(i, j), k = 1, 2, \dots, k$ 按正弦曲线以行为单位拟合各行数据, 得到拟合后的图像数据 $I_{fk}(i, j)$;

步骤 4: 计算滤波后图像的光强函数 $I_k(i, j)$ 与它的正弦拟合光强函数 $I_{fk}(i, j)$ 的方差:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_k(i, j) - I_{fk}(i, j)]^2}; \quad (11)$$

iv) 窗口参数 m, n 的优化。比较均方差 σ_k 和 σ_0 的大小, $\xi_k = \sigma_k - \sigma_{k-1} (k = 1, 2, \dots, K)$ 。按 ξ_k 不断减小的方向进行搜索, 调整窗口参数 m, n , 以达到最佳滤波效果。

4 实 验

实验硬件设备: 照相机: EPIX, Inc 的 SILICON VIDEO 5C10; 投影仪: NEC 公司的 NP 64; Telecentric Lenses; 意大利 Opto Engineering S. r. l. 的 TC 23 64; 软件开发平台: Matlab 7.0。图 3 是将一计算机程序编制的正弦光栅投影到圆钢垫片上的图像, 即被物体表面调制后的正弦光栅图像。图 4 为该调制光栅图像灰度值的三维图, 其中 z 轴为灰度值。图 5(a) 是用大小为 3×3 的常规矩形窗口的滤波效果, 图像为一灰度值为 z 轴的

三维灰度图像。从图像中可以看出滤波不明显。图 5(b)为按照本文中提出的方法的滤波效果。对照原图(图 4),发现滤波效果非常明显。通过比较图 5(a),(b),可以明显看出提到的方向自适应滤波的滤波效果。

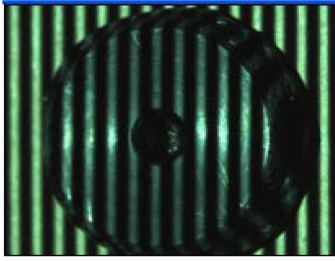


图 3 被测物体表面调制后的变形光栅条纹图像

Fig. 3 Modulated grating image of subject surface

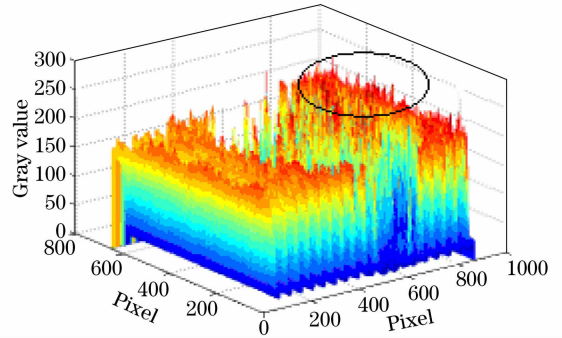


图 4 调制光栅条纹图原始图像三维效果

Fig. 4 3-D image of original modulated grating image

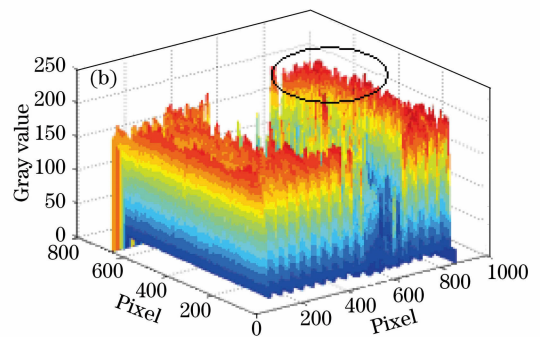
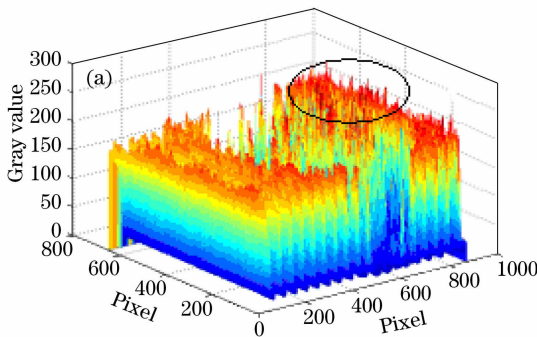


图 5 常规矩形窗口(a)和方向自适应(b)滤波的三维效果

Fig. 5 3-D image of modulated grating image filtered by regular filter window (a) and directional adaptive filter (b)

5 结 论

本文对现有的光栅条纹图像的滤波方法进行了分析和研究,提出了根据条纹图像方向调整滤波窗口的大小和方向的重心法方向自适应滤波方法。用该方法对叠栅条纹的椒盐噪声实施了滤波实验。然后用该方法对电脑程序编制的正弦光栅图像在铁片上的投影图实施了滤波实验。实验结果表明该方法是可行的,滤波效果是明显的。因此有:沿着光栅条纹方向取滤波窗口能取得较好的滤波效果;沿着光栅条纹方向取长条形窗口比正方形窗口能取得更好的滤波效果;条纹方向的方向自适应算法能有效帮助软件找到正确的条纹方向;滤波时窗口尺寸参数的优化较大地提高了滤波的效果。

参 考 文 献

- 1 Fu Yanjun, Yang Kuntao. Theory analyses of moiré stripe in 3D profilometry measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 63~66
伏燕军,杨坤涛. 三维形貌测量的莫尔条纹的理论分析[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7): 63~66
- 2 Kang Xin, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 75~79
康 新,何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 75~79
- 3 G. Houkun, X. Guoliang, G. Zhen. Development on surface defect holes inspection based on image recognition[C]. 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010, Toronto, Canada
- 4 Zhang Dongsheng, Tong Jingwei. Application of Fourier algorithm and phase shifting method in ESPI[J]. *J. Experimental Mechanics*, 1992, **7**(2): 166~170
张东升,佟景伟. 频域滤波及相移技术在 ESPI 中的应用[J]. *实验力学*, 1992, **7**(2): 166~170
- 5 Guan Xinping, Zhao Lixing, Tang yinggan. Mixed filter for image denoising[J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **10**(3):

332~337

关心平,赵立兴,唐英干. 图像去噪混合滤波方法[J]. 中国图像图形学报, 2005, **10**(3): 332~337

6 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 2-D object shape[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982

7 Huang Yu, Zhong Jingang. Improved algorithm to choose the window scale for windowed Fourier transform profilometry [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 378~385

黄宇,钟金钢. 窗口傅里叶变换轮廓术中窗口尺度选取的改进[J]. 光学技术, 2010, **36**(3): 378~385

8 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of Gabor transform to 3D shape analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996

翁嘉文,钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. 光子学报, 2003, **32**(8): 993~996

9 Zheng Suzhen, Chen Wenjing, Su Xianyu. 3D measurement techniques using adaptive window Fourier transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 51~54

郑素珍,陈文静,苏显渝. 自适应窗口傅里叶变换三维面形检测技术[J]. 光电工程, 2005, **32**(9): 51~54

10 Qifeng Yu, Xiaolin Liu, K. Andresen. New spin filters for interferometric fringe pattern and grating patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17): 3705~3711

11 Fu Sihua, Yu Qifeng. Filtering methods of the digital speckle fringe pattern[J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(4): 5~8
伏思华,于起峰. 数字散斑条纹图的滤波方法[J]. 应用光学, 2005, **26**(4): 5~8

12 Sun Xiangyi, Yu Qifeng. Method for smoothing speckle interferometry fringe-patterns in big curve window[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, **34**(3): 458~462

孙祥一,于起峰. 用曲线大窗口平滑散斑条纹图的方法研究[J]. 力学学报, 2002, **34**(3): 458~462