

文章编号:1004-4213(2011)01-0116-5

# 基于 Hough 变换的数字全息干涉条纹检测

郭俊,张婉怡,严飞,周岩,王文生

(长春理工大学 现代光学测试实验室, 长春 130022)

**摘 要:**提出了一种利用 Hough 变换在图像中检测模糊直线条纹的有效方法. 将 Hough 变换对随机噪声不敏感的特性与 Fourier 变换的性质相结合, 可实现对图形中有相同周期条纹的检测. 该方法不针对单一条纹, 只识别相同周期条纹的总体特征, 能有效避免条纹部分缺失对检测结果的影响, 并能快速检测条纹的准确数量. 将该方法应用于数字全息干涉图的自动判读, 成功实现全息干涉条纹的自动识别和准确计数, 不仅避免了图像中条纹灰度不均匀、严重模糊的影响, 而且提高了数字全息干涉术的测试准确度和效率.

**关键词:**Hough 变换; Fourier 变换; 全息干涉图; 微小位移

**中图分类号:**TH741

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114001.0116

## 0 引言

数字全息干涉术具有高精度、非破坏、非接触等优点, 可应用于非破坏检测与评估、流场分析<sup>[1-3]</sup>、燃烧分析<sup>[3-4]</sup>以及物体形变测量等方面. 目前, 在数字全息中已经普遍使用 CCD 记录全息图及全息干涉图, 实现全息术的数字化. 由于 CCD 的分辨率比全息干板等传统记录介质的分辨率低一个数量级. 因此, 在记录全息图时, 必须严格控制全息装置中参考光和物光的夹角, 使全息图中干涉条纹的最大空间频率必须小于 CCD 可分辨的最大空间频率. 为了记录更大空间频率的干涉条纹, 只能缩小 CCD 像元的尺寸以提高其分辨率. 然而, CCD 像元尺寸的减小, 会使其曝光性能、动态范围等受到限制, 其记录细节的能力往往会受到很大影响. 因此, 数字全息术中用 CCD 记录的全息干涉条纹经常存在对比度低、噪音大、条纹残缺、条纹严重模糊的现象.

Hough 变换是图像处理和分析的有效工具, 由于其对随机噪声和部分缺失不敏感的特性, 而且适用于并行处理, 因此被广泛地应用于直线和圆的检测. 但单一使用 Hough 变换, 只能提取图像中比较清晰的直线或圆等信息<sup>[5-6]</sup>, 并且不能对图像中的模糊直线或圆等信息进行有效计数.

本文提出一种利用 Hough 变换在模糊图像中检测直线条纹的有效方法. 将 Hough 变换与傅里

叶变换相结合使用, 充分利用 Hough 变换的抗噪音能力和傅里叶变换的性质, 能有效识别图像中有相同周期条纹的总体特征, 不识别单一条纹, 并可快速检测图像中模糊条纹的准确数量. 该方法进一步提高 Hough 变换作为图像识别工具的抗干扰能力, 扩大了其适用范围. 在全息干涉条纹检测中, 分两步使用该方法, 不仅避免了图像中不完整或者严重模糊的条纹对测量结果的干扰, 而且可快速、有效地检测条纹的准确数量, 大大提高了数字全息干涉术中位移测量的准确度和效率, 弥补了 CCD 等数字器件动态范围有限的影响.

## 1 数字全息干涉术

数字全息干涉术是用 CCD 记录同一物体的两个不同状态的两幅全息图. 全息再现时, 将叠加的全息图写入电寻址液晶 (Electrically Addressed Liquid Crystal Device, EALCD), 由于叠加全息图上记录的两个不同状态的物波同时重现并相干, 产生全息干涉条纹.

由于物体的微小位移或变形主要影响物波的位相, 所以设变形前、变形后的物波分别为:  $O(x, y)$ 、 $O'(x, y)$ , 参考光为  $R(x, y)$ . 当用 CCD 分别记录该物体变形前以及变形后的全息图时, 其曝光量为  $H_1(x, y)$ 、 $H_2(x, y)$ . 当用原参考光照明这样叠加的全息图时, 在全息像面上的光强分布为<sup>[7]</sup>

$$I(x, y) = k^2 t^2 r^4 (o + o') (o + o')^* =$$

**基金项目:**总装备部预研基金(No. 9140XXXX)资助

**第一作者:**郭俊(1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为数字全息干涉及光学系统设计. Email: great-peak-love@163.com

**导 师:**王文生(1944—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光学测试技术和光学系统设计. Email: : wwscom@163.com

**收稿日期:**2010-09-28; **修回日期:**2010-11-19

$$4k^2 t^2 r^4 o^4 \cos^2[(\phi_0 - \phi_1)/2] \quad (1)$$

式中,  $k$  为曝光曲线系数,  $t$  为曝光时间.

## 2 Hough 变换的基本原理

在图像识别中, Hough 变换能利用图像中线特征的投影不变性, 将直线上的特征点映射到参量空间, 提取直线信息, 并且能有效避免直线中出现间断点的干扰<sup>[8]</sup>. 另外, Hough 变换最基本的应用就是从灰度图像中检测直线<sup>[9]</sup>.

设已知灰度图像上一条直线, 要求出这条直线所在的位置. 将图像空间  $x-y$  中的直线用法线式表达

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho, \rho \geq 0, 0 \leq \theta \leq \pi \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为表示原点到直线  $l$  的垂直距离,  $\theta$  为该垂线与  $x$  轴的夹角. 根据式(2), 直线  $l$  上不同点经转换后, 在参量平面  $\rho\theta$  中被转换为对应的一点  $P$ , 即 Hough 变换的对偶性原理.

依据 Hough 变换的对偶性原理, 将 Hough 空间设计成一个基于  $\rho\theta$  参量平面、具有累加器阵列的三维空间, 当整幅图像(一般是经过边缘提取的灰度图)进行转换时, 让图像中符合式(2)的每个点在 Hough 空间中进行投票. 基于 Hough 变换的对偶性关系, 直线上的每一点都会在该直线的 Hough 空间的对应点上进行投票, 所有不经过该直线的点都不会影响该直线在 Hough 空间的对应点的投票. 最后, 该直线对应的 Hough 空间的点的累加器中的票数将会累加并形成峰值. 该峰值即表征在原空间  $x-y$  坐标系中对应直线的参量.

## 3 Fourier 变换与 Hough 变换结合的直线检测方法

当将  $x-y$  坐标系中一组平行的直线条纹(图 1)经过 Hough 变换转换到 Hough 空间中, 可以得到该组平行线在  $\rho\theta$  坐标系中空间分布如图 2.

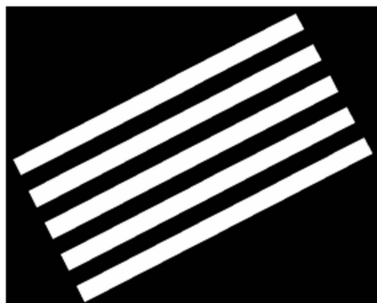


图 1 测试条纹  
Fig. 1 Tested fringes

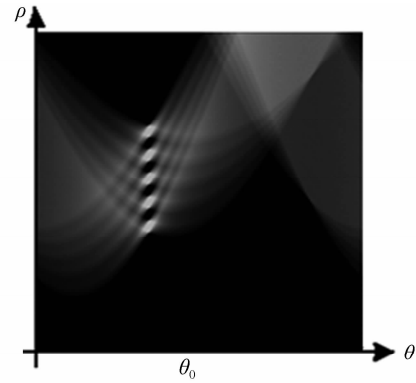


图 2 测试条纹在 Hough 空间中的分布  
Fig. 2 The distribution of tested fringes in Hough space

在 Hough 空间  $\rho\theta$  坐标系中,  $\rho$  为直线  $l$  到原点垂线的距离,  $\theta$  为该垂线与  $x$  轴的夹角. 将 Hough 空间看作函数  $H(\rho, \theta)$ , 其中  $\rho \in (0, \sqrt{x_{\max}^2 + y_{\max}^2})$ ,  $\theta \in (0, 180^\circ)$ . 对于任意  $\theta$  处, 当  $\rho = 0, 1, 2, \dots, n$  时,  $H(\rho, \theta)$  对应的值分别为  $H(0, \theta)$ ,  $H(1, \theta)$ ,  $H(2, \theta)$ ,  $\dots$ ,  $H(n, \theta)$ . 将每个  $\theta$  对应的  $\rho$  序列分别作傅里叶变换, 比较每一方向的傅里叶变换后的最大幅值, 并取出最大值, 该幅值对应的频率就是该方向上对应的条纹个数. 例如, 将图 1 转到 Hough 空间(图 2), 对每一方向做傅里叶变换后, 在  $\theta_0$  对应  $\rho$  序列的傅里叶变换中, 条纹频率的幅值将存在最大值, 即对应的条纹数量.

该方法是利用 Hough 变换和傅里叶变换的特点和性质, 可以实现周期性条纹的检测, 并且检测的是在图像范围内, 相同周期的条纹在其平行的方向上能容纳该周期条纹的数量. 其最大优点在于该方法是对整幅图像中拥有相同周期条纹的总体特征进行识别, 不针对单一条纹. 因此, 对条纹是否完整、条纹部分覆盖不敏感, 能有效减弱条纹严重模糊的对检测结果的影响, 并能快速求出图像中有相同周期条纹的准确数量.

## 4 在全息干涉条纹检测中的应用

实验采用氦氖激光器、CCD、EALCD 和傅里叶变换透镜为关键器件, 进行数字全息干涉术研究, 高准确度测量物体微小位移. 在全息记录中, 全息图的记录装置如图 3.

在记录多幅数字全息图后, 将其中两幅叠加, 写入 EALCD, 并复位到 CCD 记录全息图的位置. 最后, 通过傅里叶变换透镜和 CCD 相结合进行全息再现, 装置图如图 4, 记录的全息干涉图, 如图 5.

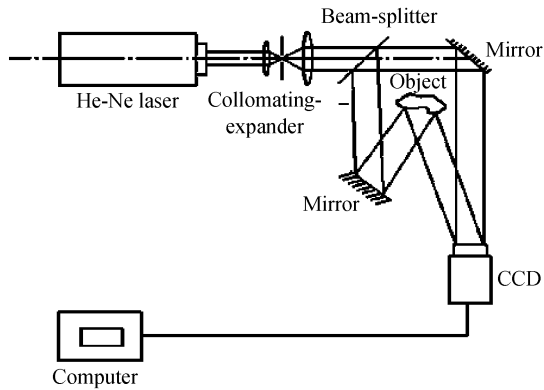


图 3 全息记录装置  
Fig. 3 Setup of holographic recording

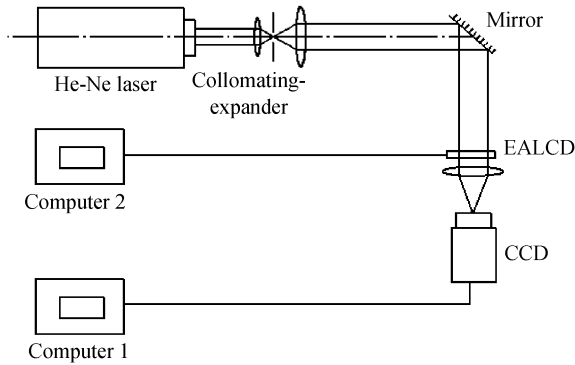


图 4 全息再现装置  
Fig. 4 Setup of holographic reconstruction

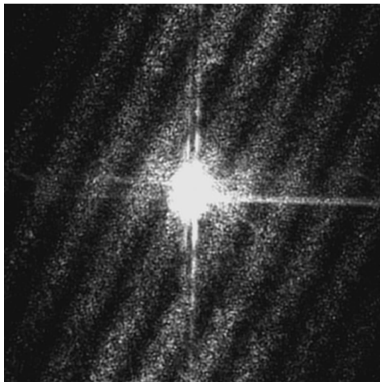


图 5 数字全息干涉图  
Fig. 5 Digital holographic interferogram

由于采用 CCD 记录数字全息干涉图时, 不仅受到大量杂光、振动等外界因素的影响, 而且受 EALCD 分辨率、光调制特性和 CCD 自身动态范围、感光能力的限制, 干涉条纹的对比度、清晰度等往往受到很大影响. 通过对图 5 中全息干涉条纹观察可知, 尽管大部分条纹可以辨认, 但图像边缘部分的条纹已经非常模糊. 并且每一根条纹中也存在着大量的间断点, 灰度分布非常不均匀, 中心存在高亮度的衍射零级, 这些因素都给全息干涉图的自动检测造成了很大的影响. 在图 5 这种复杂的图像中, 单一使用 Hough 变换, 在 Hough 空间中很难通过局部波峰识别干涉条纹, 更无法检测到条纹的准确数量. 因此, 为了实现全息干涉图的快速自动

判读, 应用第 3 节中提出的方法分两步来实现对干涉条纹的自动检测.

#### 4.1 全息干涉条纹方向的确定

应用 MATLAB 工具, 定义图 6 的左上角顶点为坐标(0, 0)点, 水平向右为  $x$  轴正方向, 垂直向下为  $y$  轴正方向. 因此, 条纹方向与  $x$  轴夹角为  $90^\circ - \theta$ .

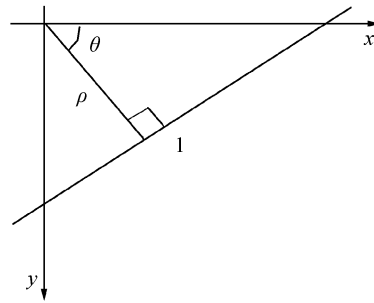


图 6 实验中 Hough 空间坐标定义图  
Fig. 6 The coordinate definition of Hough space in experiment

首先, 通过 canny 算法对二值化的全息干涉图的条纹进行边缘提取, 得到其轮廓曲线图, 如图 7.



图 7 全息干涉图 5 的边缘提取结果  
Fig. 7 The edge extraction result

从图 7 中可知, 尽管图中存在很多与条纹方向不相关的点或线的分布, 但大部分点都分布在条纹方向的边缘上, 并且这些点连接起来总体上反映出全息干涉条纹的方向. 为了提高运算速度, 减小运算量, 将边缘提取图缩小到原图像的 1/4. 如此, 只是图片比例的变化, 并不会改变图像中信息的特征, 且运算时间缩短了 1/2. 先对图 7 进行 Hough 变换, 其结果为图 8.



图 8 对图 7 进行 Hough 变换的结果  
Fig. 8 The Hough transform result from Fig. 7

应用第 3 节中的方法,对图 8 的 Hough 空间中每一  $\theta$  方向对应的  $\rho$  序列进行傅里叶变换,其结果为图 9. 应用 max 指令,将图 9 中每一  $\theta$  方向的最大幅值进行比较,并求得最大值. 图 9 上半部分有两个亮斑,且位于下侧的亮斑更亮. 该亮斑反映了傅里叶变换图像中最高频率的幅值. 该幅值表明原图 7 中是与  $\theta_i$  平行的方向上有最多的直线,即对应图 5 中干涉条纹的方向.

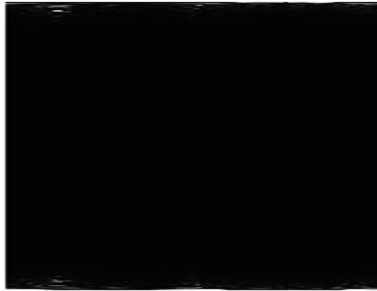


图 9 对图 8 进行傅里叶变换的结果  
Fig. 9 The Fourier transform result from Fig. 8

#### 4.2 全息干涉条纹数量的确定

在确定了全息干涉条纹方向后,可以继续应用第 3 节中提供的方法,对原图像进行 Hough 变换(图 10). 再对图 10 的 Hough 空间的每一  $\theta$  方向对应的  $\rho$  序列进行傅里叶变换,其结果为图 11. 继续使用 Max 指令,只需要在第 4.1 节中已经获取的条纹方向  $\theta_i$  上取傅里叶变换后的最大幅值. 在图 11 中的左上角位置的最亮斑即最大幅值,该幅值表明在该方向上出现条纹的最大频率. 该频率即对应图 5 中全息干涉条纹的数量.

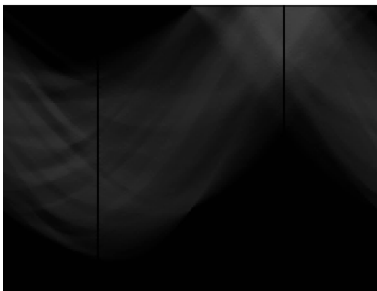


图 10 对图 5 的 Hough 变换结果  
Fig. 10 The Hough transform result from Fig. 5

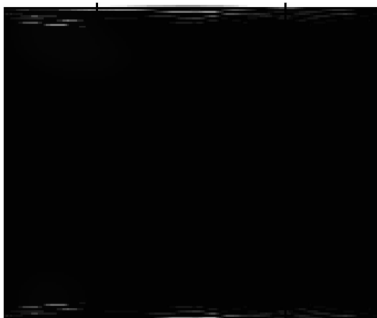


图 11 对图 10 的傅里叶变换结果  
Fig. 11 The Fourier transform result from Fig. 10

针对图 5 的测试结果如图 12. 条纹数量取小数点后一位作为有效数字,可知条纹的准确数量为 11.0. 设物体的位移量为  $d$ ,全息干涉图中干涉条

Automation recognition result to  
holographic interference fringes  
Fringes orientation 65°  
Fringes number 11.0459

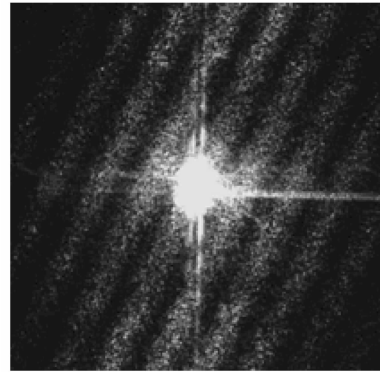


图 12 检测结果  
Fig. 12 Test result

纹数  $N$ , 实验中使用的激光器波长  $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ , 根据公式<sup>[10]</sup>

$$d=(\lambda/2)N \quad (3)$$

由式(8)可求得物体的位移量  $d$  为  $3.48 \mu\text{m}$ .

## 5 结论

本文提出了一种基于 Hough 变换的在模糊图像中检测直线条纹的有效方法. 该方法将 Hough 变换与 Fourier 变换相结合使用,利用 Hough 变换良好的抗噪音性能以及对部分遮挡现象的不敏感等特性、Fourier 变换自身性质,可识别在图像范围内,相同周期的条纹在其平行的方向上能容纳该周期条纹的数量. 且该方法只识别有相同周期直线条纹的总体特征,不针对单一直线,增强了 Hough 变换的抗干扰能力,扩大了 Hough 变换的应用范围. 并应用 MATLAB,在数字全息干涉图的自动判读中两步应用该方法,在不丢失图片信息的前提下,按比例缩小图片,提高了运算效率,并成功地实现了全息干涉条纹的自动检测,直接测得了准确的条纹数量. 该应用消除了记录全息干涉图时,由于外界振动、噪音以及探测器自身原因造成的干涉条纹灰度值不均匀、甚至严重模糊对测试结果造成的影响,有效地提高了全息干涉图自动判读的准确度和效率.

#### 参考文献

- [1] HE Bao-hong. The study of properties of the flow field by means of the real-time laser holographic interferometry in combustion intake duct[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2003: 34-46.  
何保红. 实时全息干涉测量技术用于内燃机进气道流场的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2003:34-46.

- [2] WU Guan-hao, ZENG Li-jiang. Measuring the kinematics of a free-flying hawk-moth by a comb-fringe projection method[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, **26**(1): 67-71.
- [3] ZENG Rong-zhou. The study of digital holographic interferometry for the temperature field measurement [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007: 22-31.  
曾荣周. 数字全息干涉用于温度场测量的初步研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007: 22-31.
- [4] YU Ben-guo, WANG Jian-zhong. Research on laser spectrum detecting technology based on the bilateral-wedges Fourier interferometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1717-1721.  
余本国, 王建中. 基于双边倾斜傅里叶干涉具的激光光谱探测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1717-1721.
- [5] YANG Bo, WANG Tong-qing, LÜ Yong-ping, *et al.* Line extraction using dynamically structured element [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2003, **4**(15): 421-424.  
杨波, 汪同庆, 吕永平, 等. 利用动态结构元素提取直线[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, **4**(15): 421-424.
- [6] YANG Zhi-ming, ZHOU Qi-guo. The recognition the geometric figure based on the Hough transformation theory [J]. *Journal of Chongqing Polytechnic College*, 2002, **11**(17): 16-18.  
杨治明, 周齐国. 基于霍夫变换理论的图形识别[J]. *重庆工业高等专科学校学报*, 2002, **11**(17): 16-18.
- [7] ACKERMANN G K, EICHLER J. *Holography*[M]. Berlin: Uwe Krieg, 2007: 203-206.
- [8] CHEN Zhen, GAO Man-tun, YANG Sheng-yun. A new method of lines Tracking based hough transform [J]. *Computer Applications*, 2003, **10**(23): 30-32.  
陈震, 高满屯, 杨声云. 基于 Hough 变换的直线跟踪方法[J]. *计算机应用*, 2003, **10**(23): 30-32.
- [9] QIU Sang-min, XIA Yu-ren. A new fast Hough transform algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2001, **24**(10): 1102-1109.  
邱桑敏, 夏雨人. 一种快速霍夫变换算法[J]. *计算机工程*, 2001, **24**(10): 1102-1109.
- [10] 熊秉衡, 李俊昌. *全息干涉计量-原理和方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 1: 323-337.

## Detection of Digital Holographic Interference Fringes Based on Hough Transform

GUO Jun, ZHANG Wan-yi, YAN Fei, ZHOU Yan, WANG Wen-sheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022 China)

**Abstract:** An effective method based on Hough transform, which is used to detect the fuzzy line fringes in image, was put forward. Taking advantages of the insensitivity feature of Hough transform to random noise and the properties of Fourier transform, the method can detect the fringes with the same period. The method can recognize the general feature of the fringes with the same period and do not recognize the single fringe. Using the proposed method, the influence of incomplete fringes to the measurement result can be efficiently avoided. In the application of the automatic interpretation of the holographic interferogram, the holographic fringes were automatically recognized and exactly counted. The experimental results show that the proposed method can avoid the influence of the uneven gray and the serious blur of fringes, and increase the test precision and efficiency of the digital holographic interferometry.

**Key words:** Hough transform; Fourier transform; Holographic interferogram; Micro displacement