

文章编号: 0258-7025(2009)04-0949-05

采用多特征窗口识别的散斑位移测量新方法

曾丽梅 曹益平

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 基于激光散斑的位移测量是广泛应用于实际测试的一种重要方法。具体的实现方法常用的是数字图像灰度相关法(DIC)。在整像素位移搜索算法中,传统的方法需要做大量的相关运算,计算效率较低。因此提出了一种新的多特征窗口识别方法,采用选取能够较好反映原始图像特征的不在同一直线上的三个大小不同的矩形子区作为计算窗口,在保证准确度的同时减少运算量。实验证实这种方法能够很好地满足准确度的要求并大大提高了运算速度,是一种有效可行的方法。

关键词 测量; 位移测量; 多特征窗口; 相关法; 散斑

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0949

New Method of Displacement Measurement Based on Laser Speckle Using Multi-Characteristic Windows

Zeng Limei Cao Yiping

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Displacement measurement based on laser speckle is an important method widely used in practice, which is commonly realized by digital image correlation (DIC). However, the traditional method in pixel search algorithm is not very efficient for its correlation calculation. A new method of multi-characteristic windows is presented. Three distinct speckle sub windows with different sizes and different areas are selected as the calculation windows, which can not only guarantee the computational veracity properly, but also reduce the computation effectly. Experiments show that it is feasible and efficient, for it satisfies the computational veracity and improves the computational speed.

Key words measurement; displacement measurement; multi-characteristic window; correlation method; speckle

1 引言

散斑测量由于具有非接触、光路简单、全场测量等优点,常被用于面内位移、物体表面形变测量等,在实际测量工作中得到了广泛应用^[1~7]。在散斑位移测量中,常采用数字图像相关法^[8~15](DIC),它直接利用位移前后数字图像的灰度变化来测量物体面内位移。传统的灰度相关匹配算法,对模板区域和目标图像的像元进行逐个比较,计算两者之间的相似度,取相似度最高的点作为匹配结果。通常模板区域取得越大则相关度越高。而当模板窗口选得较

大时,需要做大量的相关运算,计算时间较长,难以达到实时性要求。所以散斑相关测量法的关键就在于如何提高计算速度,快速、准确地找到待测点的相关。

过去的研究工作集中在选用什么样的相关函数上^[16,17],而没有对模板计算窗口的选取方法提出改进。本文对此进行了研究,提出一种新的多特征窗口识别方法,采用从传统的单窗口模板区域中选取灰度特征较明显的三个不在同一条直线上且大小不同的矩形子区作为计算窗口,在满足准确度要求的

收稿日期: 2008-04-16; 收到修改稿日期: 2008-07-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 曾丽梅(1986-),女,硕士研究生,主要从事光机电一体化方面的研究。E-mail: zlmscu@yahoo.com.cn

导师简介: 曹益平(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光电信息处理、光机电一体化方面的研究。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

同时可以大大减少运算量,从而提高运算速度。

2 散斑相关法位移测量原理

当一束激光照射在物体粗糙表面上时,物体表面会出现稳定分布的无规则明暗相间斑点,这就是激光散斑。由于散斑分布是无规则的,散斑场中每一点周围的一个散斑子集分布特性与其他点周围的一个散斑子集不一样,当激光光源稳定不变,且被照材料一定时,被照表面上的散斑场将稳定不变,当被照材料发生微小位移时,会引起散斑场的整体迁移,而局部特征不会发生改变,通过记录被照材料位移前后的两幅散斑灰度图,找到某一子集的相关最大点,即可得到物体位移后该子集的新位置,从而确定物体的位移量,这就是散斑用于位移测量的原理。

目前已提出的相关方法有许多不同的计算形式。最基本的乘积互相关函数的定义式为

$$C(x, y) = \sum_{(i, j) \in M} f(i, j)g(x + i, y + j), \quad (1)$$

其中 $f(i, j)$ 和 $g(x + i, y + j)$ 分别为位移前后散斑图像中各像素点灰度, x 和 y 为模板中心的整像素位移, M 为模板窗口的大小。

由于乘积互相关函数值的大小与前后图像中各像素点灰度值有关,仅适合灰度呈一定规律分布的前后图像的相似性判断。由于激光散斑呈无规则分布特性,因此该模型不适合于判别散斑的相似性。

在激光散斑位移测量中,常用的相关法^[18]有标准化相关法、标准化协方差相关法和最小二乘相关法。标准化相关法用相关窗口内灰度平方和来对直接相关法得到的相关系数作归一化,使得相关函数的取值范围为 $[0, 1]$ 。相应的相关函数为

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in M} f(i, j)g(x + i, y + j)}{\sqrt{\sum_{(i, j) \in M} f^2(i, j) \sum_{(i, j) \in M} g^2(x + i, y + j)}}. \quad (2)$$

标准化协方差函数对图像和模板进行了去均值处理,使算法对图像的亮度变化和对比度变化不敏感,其取值范围为 $[-1, 1]$ 。

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in M} [f(i, j) - \bar{f}][g(x + i, y + j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{(i, j) \in M} [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_{(i, j) \in M} [g(x + i, y + j) - \bar{g}]^2}}, \quad (3)$$

其中 \bar{f} , \bar{g} 为其计算窗口内的平均灰度值。最小二

乘相关函数为

$$C(x, y) = \sum_{(i, j) \in M} [f(i, j) - g(x + i, y + j)]^2. \quad (4)$$

以上三种算法各有各的特点,不失一般性,本文采用标准化相关法进行分析。

具体测量过程为,利用“传感器-数据采集卡-微机”计算机辅助测试系统,用摄像机拍摄位移前后物体表面的散斑图,这些图经 A/D 转换储存于图像卡的帧存体中并显示在监视器屏幕上。图像的灰度经 8 bit A/D 转换为 0-255 灰度级并转化为浮点数,然后进行互相关迭代运算也即计算互相关系数随物体位移的变化过程,找出互相关系数的最大极值点,该点所在的位移就是与实际位移相一致的。

对被测试件位移前后拍得的两幅散斑图,在位移前的图像中取矩形子区为模板区域。在位移后的目标图像中移动,并计算互相关系数,寻找与模板的相关系数为最大值的矩形区域以确定目标的整像素位移。

3 多特征子窗口选取方法

计算窗口的选取是散斑灰度相关计算中的一个关键参数。在做整像素位移搜索时,一方面,计算窗口越小则计算量也越小,计算的速度就越快,但是当模板尺寸相对于整幅图像选得过小时,模板尺寸内有可能不能较完全地反映目标的特征,将使定位精度降低,甚至可能出现错误定位的情况。另一方面,计算窗口较大可以补偿和降低各种噪声的影响,提高定位精度,但同时计算量也会大大增加,从而降低了计算效率,快速性及实时性难以保证。传统的采用单矩形窗口作为计算模板的方法,为了保证定位准确度,需要在图像中心选取较大窗口,因此需要做大量的相关运算,计算量较大,计算效率低,快速性和实时性难以保证。

本文对整像素位移搜索中计算窗口的选取进行了研究,并改进了以前的单个矩形计算窗口的选取方法,提出了一种新的采用多特征窗口识别的方法。首先对图像进行傅里叶变换及高通滤波处理,滤除背景信息,再作傅里叶逆变换,并对恢复的散斑图像做二值化处理,选出其中散斑特征特别明显,与图中其他各处不重复的一些斑瓣。如果用这些斑瓣的外接矩形窗口作为计算模板,可以较好地保证定位准确性,由于从整幅散斑图像中提取的上述散斑特征明显的计算模板较多,如果将所有这些计算模板都参与计算,计算量势必会很大,因此,为了减小运算量,提高运算速度,提出选取三个不在同一直线上的

大小不同的模板子区共同参与计算的方法。在位移后的图像上移动这三个矩形子区，并分别按照(2)式的相关函数进行计算，设其相关系数分别为 $C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$ 和 $C_3(x, y)$ ，则总相关系数为这三个系数的加权组合，即

$$C(x, y) = k_1 C_1(x, y) + k_2 C_2(x, y) + k_3 C_3(x, y), \quad (5)$$

其中 k_1, k_2, k_3 为权重因子 ($k_1 + k_2 + k_3 = 1$)。权重因子的选择标准是根据选取的模板区域与图像其他区域不相似的程度来判断的。如果在图像中除了模板自身外，其他区域与它的相关系数都很小，则权重因子就取得较大，反之则权重因子取得较小。将 A, B, C 三个模板子区分别在原图像中做扫描，依次计算相关系数，分别为 C_A, C_B, C_C ，并求出相关系数平均值，分别为 $\overline{C_A}, \overline{C_B}, \overline{C_C}$ ，则权重因子为

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\overline{C_B} + \overline{C_C}}{2(\overline{C_A} + \overline{C_B} + \overline{C_C})} \\ k_2 = \frac{\overline{C_A} + \overline{C_C}}{2(\overline{C_A} + \overline{C_B} + \overline{C_C})} \\ k_3 = \frac{\overline{C_A} + \overline{C_B}}{2(\overline{C_A} + \overline{C_B} + \overline{C_C})} \end{cases} \quad (6)$$

这种方法由于选取的是在原图像中特征较明显的模板区域，并且是由三个不在一直线上的不相似区域共同定位的，因此保证了定位的准确性。而三个窗口的总大小与传统的单窗口相比大大减小，计算量明显比单窗口计算时更小，大大节约了计算时间，提高了计算效率。

4 实验及结果分析

为了验证本算法的有效性，进行了实物测试实验。图 1 为实验原理图，激光经准直、衰减、扩束后，经由分光镜反射到位于精密位移组合工作台上的待测铜片上，铜片表面产生的散斑场再经分光镜和透镜后由 CCD 相机采集到计算机中并显示在监视器屏幕上。

采集到位移前的散斑图像后，分别对物体相对于原始位置进行 3 次位移并采集位移后的散斑图像。采集的散斑图大小为 $576 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。图 2 为一幅位移前采集到的散斑图转化为灰度图的图像。

根据提出的方法，对位移前的原始图像进行傅里变换滤波及二值化处理，得到特征较明显的一些斑瓣图像如图 3 所示。在图中选取三块散斑特征特别明显的大小不同并且不在一条直线上的子区域 A, B, C 作为模板区域，选取的位置如图上所标示。选取的三块

子区大小分别为 $33 \text{ pixel} \times 37 \text{ pixel}, 34 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}, 24 \text{ pixel} \times 27 \text{ pixel}$ 。对应在原图中的模板如图 4 所示。

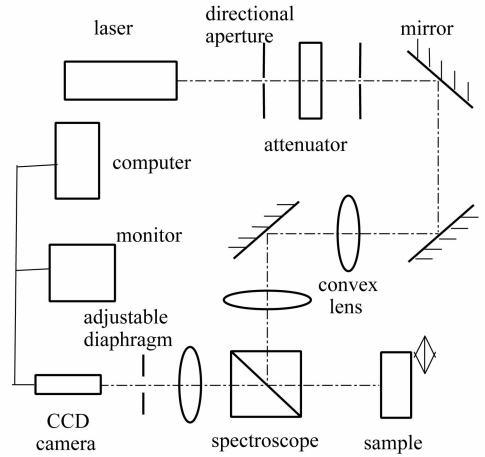


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus



图 2 散斑灰度图

Fig. 2 Speckle gray level

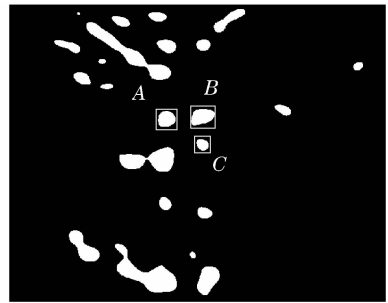


图 3 在处理后的图像中子区域的选取

Fig. 3 Sub areas chosen in processed image

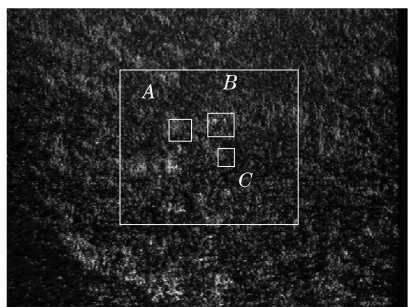


图 4 单窗口模板及多窗口模板选取示意图

Fig. 4 Template selected, single-window and multi-windows

将三个模板子区分别在原图像中扫描,与原图像做相关运算,得到相关系数分布如图 5 所示。从图中可以看出,其相关峰十分陡峭,即这三个区域的

散斑特征十分明显,与图中其他任何地方没有重复之处。

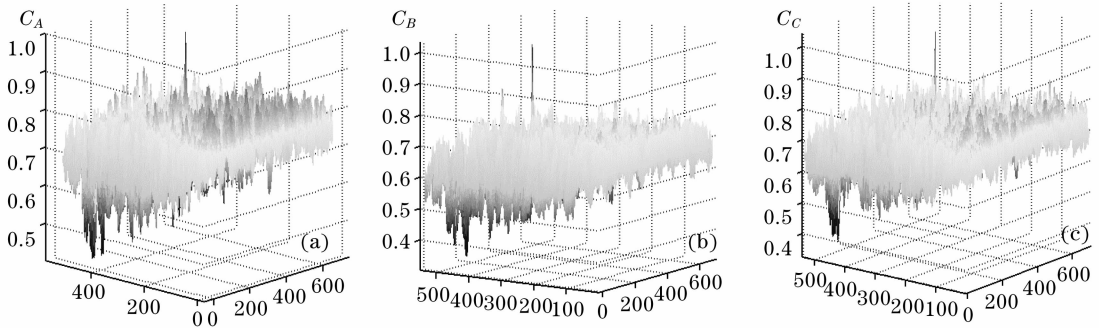


图 5 A, B, C 三个区域与原散斑图像相关计算的相关系数 C_A , C_B , C_C 分布图

Fig. 5 Correlation coefficient distributions between the sub area A, B or C and the original speckle image

在这个模板内,按照(5)式计算相关函数。由(6)式可计算出权重因子。从图 5 可见, A, B, C 三个区域与原图像的相关系数平均值 $\overline{C_A}$, $\overline{C_B}$, $\overline{C_C}$ 都为 0.7 左右。为简化计算,权重因子 k_1, k_2, k_3 均取 1/3, 即相关系数为三个子区各自的相关系数的平均

值。为了比较算法的运行速度,以像素点 [250, 350] 为中心选取 256 pixel \times 256 pixel 的传统单窗口相关运算模板窗口,按(2)式标准化相关函数进行相关计算。选取窗口在原图中的位置如图 4 所示。表 1~3 是其中三次位移测量的计算对比结果。

表 1 第一次位移的计算结果

Table 1 Result of the first displacement

The selected methods	Max correlation coefficient	Displacement x /pixel	Displacement y /pixel	Time/s
Tradition	0.9189	0	11	875.375
Sub-window	0.9323	0	11	40.688

表 2 第二次位移的计算结果

Table 2 Result of the second displacement

The selected method	Max correlation coefficient	Displacement x /pixel	Displacement y /pixel	Time/s
Tradition	0.9668	0	-5	877.484
Sub-window	0.9740	0	-5	40.781

表 3 第三次位移的计算结果

Table 3 Result of the third displacement

The selected method	Max correlation coefficient	Displacement x /pixel	Displacement y /pixel	Time/s
Tradition	0.9763	0	5	884.094
Sub-window	0.9831	0	5	40.328

分析计算结果可见,在用传统的单矩形窗口进行相关计算时,耗费时间很长,而采用多特征窗口识别的方法进行计算时,在保证定位精度的前提下,计算时间约为传统算法的二分之一。本算法包含了图像预处理即滤波过程,增加了一定的预处理时间。通过大量实验数据计算表明,图像预处理所用时间在 1~2 s 以内,与相关运算时间相比,对运算速度影响较小。从整体上来说,仍然是大大提高了计算速度,节约了计算时间。实验证明,本算法是散斑位

移测量中一种快速、有效、准确的方法。

5 结 论

对基于激光散斑测量物体位移的图像灰度相关法,提出了一种新的采用多特征窗口识别的新方法。从理论上分析了这种方法在定位准确度和计算速度方面的优点,并用实验验证了本方法的有效性和可行性。相对于传统的选用单个矩形样本窗口的计算方法,在保证准确性的同时大大减少了运算时间,

提高了散斑相关位移测量的效率,为以后的研究工作提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- 1 F. P. Chiang, D. W. Li. Random speckle patterns for displacement and strain measurement; some recent advances[J]. *Opt. Eng.*, 1985, **24**: 936~943
- 2 Chen Siying, Huang Chenguang, Duan Zhuping. Digital speckle correlation method and its application on impact deformation measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 735~739
陈思颖, 黄晨光, 段祝平. 数字散斑相关法在高速变形测量中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 735~739
- 3 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan, Lin Baoping. Application of micro-digital speckle correlation technique to study mechanical property of advanced thin film material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1104~1108
陈凡秀, 何小元, 林保平. 显微数字散斑相关测量新型薄膜的力学性能[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1104~1108
- 4 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 78~81
陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 78~81
- 5 Liu Qian, Zhou Sibao, Zhang Zhihong *et al.*. Application of laser speckle imaging; monitoring changes of vessels in photodynamic therapy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 869~872
刘 谦, 周斯博, 张智红 等. 利用激光散斑成像监测光动力治疗的血管损伤效应[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 869~872
- 6 Wang Jing, Liu Hengbiao, Li Tongbao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264
王 婧, 刘恒彪, 李同保. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- 7 Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three-dimensional deformation of local shearing band by digital speckle metrology technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902
刘颢文, 张青川, 于少娟 等. 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 898~902
- 8 T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton *et al.*. Application of digital image-correlation technique to experimental mechanics[J]. *Experimental Mechanics*, 1985, **25**: 232~244
- 9 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital image imagine techniques in experimental stress analysis[J]. *Opt. Eng.*, 1982, **21**(3): 427~432
- 10 M. Brüning, W. Niehsen. Fast full - search block matching[J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2001, **11**: 241~247
- 11 Liu Wenjun, Zhou Changhe. Femtosecond laser speckle cross-correlation technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1477~1480
刘文军, 周常河. 飞秒激光散斑相关法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1477~1480
- 12 Qiu Tian, Guo Li, Li Donghui *et al.*. Digital speckle marginal correlation measuring method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1092~1096
邱 天, 郭 立, 李东晖 等. 数字散斑的边缘相关测量法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1092~1096
- 13 Chen Daqing, Gu Jihua, Jiang Jinhua. Study on the digital speckle correlation method for in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 907~912
陈大庆, 顾济华, 姜锦虎. 斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 907~912
- 14 Li Shanxiang, Sun Yiling, Li Jingzhen. The tracking method of digital speckle correlation using the sequential dynamical speckle patterns and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1066~1068
李善祥, 孙一翎, 李景镇. 时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用[J]. *光学学报*, 2005, **34**(7): 1066~1068
- 15 Gong Haohan, Liu Cheng, Chen Daqing *et al.*. Relationship between laser speckle correlation and displacement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 211~214
龚浩瀚, 刘 诚, 陈大庆 等. 激光散斑相关性和位移的关系研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 211~214
- 16 Xiao Jun, Zhang Tianxu, Yang Weidong. Fast image matching algorithm based on symbols of correlation coefficient [J]. *Application Research of Computers*, 2007, **24**(9): 301~306
肖 军, 张天序, 杨卫东. 基于相关系数符号的快速匹配算法[J]. *计算机应用研究*, 2007, **24**(9): 301~306
- 17 Chen Shenyi, Qian Hui, Wu Zheng *et al.*. Fast normalized cross-correlation for template matching[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1325~1329
陈沈秩, 钱 徽, 吴 铮 等. 模板图像匹配中互相关的一种快速算法[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(6): 1325~1329
- 18 Yu Qifeng. Exact Measurement and Locomotory Measurement Based on Pictures[M]. Beijing: Science Press, 2002. 148~151
于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 148~151