

文章编号: 0258-7025(2006)08-1092-05

数字散斑的边缘相关测量法

邱天, 郭立, 李东晖, 朱俊株, 白雪飞

(中国科技大学电子科学与技术系, 安徽合肥 230027)

摘要 利用数字激光散斑图像测量物体的形变和微小位移是一种新兴的非接触测量方法, 为提高测量速度, 通过对数字散斑相关测量方法(DSCM)和激光散斑图像的特点进行研究, 提出一种针对数字散斑图像的边缘相关测量法(DSMC)。该方法把移动前后的激光散斑图像像素在单方向上求和, 使整幅图像的能量集中在边缘上, 然后使用边缘上所形成的一维数列, 通过插值和相关的方法求解激光散斑图像的位移。而激光散斑图像的位移可以反映出物体的位移或形变。理论和实验证明了该算法可行, 可以大大节省数字散斑相关测量中数据处理的时间而不影响计算精度, 因为此算法的运算精度主要取决于插值点的个数和散斑图像自身的综合误差。

关键词 测量; 数字散斑; 位移测量; 数字散斑边缘相关测量法; 数字散斑相关测量法

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Digital Speckle Marginal Correlation Measuring Method

QIU Tian, GUO Li, LI Dong-hui, ZHU Jun-zhu, BAI Xue-fei

(Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract It is a rising non-contact measuring method to detect minor distortions and displacements using digital laser speckle images. To improve the speed of this measurement method, a new speckle tracking method—digital speckle marginal correlation (DSMC) method is presented after the research of digital speckle correlation measurement (DSCM) method and speckle images' characteristic. The speckle images' pixel sum of every line and column is computed to make the light energy accumulated to the margin, and then uses only the two sequences to find the displacement of speckle images by correlation and interpolation method. And the displacement of speckle image reflects the distortion or displacement of objects. The theory and experiment proves that this method is feasible and it reduces computing time greatly without damaging the computing precision, because the precision of the measurement is mainly determined by the number of interpolation points and the synthesis noise of the digital speckle images themselves.

Key words measurement; digital speckle; displacement measurement; digital speckle marginal correlation method; digital speckle correlation method

1 引言

20世纪80年代, 日本的 I. Yamaguchi 和美国南卡罗来纳大学的 W. H. Peter 和 W. F. Panson 等各自独立提出了数字散斑相关测量方法(DSCM)^[1], 通过对变形前后物体表面的两幅散斑图进行相关处理来实现物体位移和变形的测量。数字散斑相关测量法与以往的干涉计量法相比具有光

路简单、对测量环境要求低、自动进行数据处理等优点, 可以进行全场、非接触测量, 在精密位移测量方面得到了较为广泛的应用^[2,3]。但是为了寻求相关最大点, 需要进行大量繁琐重复的相关运算, 使得计算量非常庞大, 处理数据的过程相当慢, 直接制约了数字散斑相关测量方法的实际应用。

本文根据激光散斑图像灰度值随机分布的特点, 以及任意从激光散斑图像上截取的子图像与整

收稿日期: 2005-11-15; 收到修改稿日期: 2006-05-30

作者简介: 邱天(1977—), 男, 河南人, 中国科技大学电子科技系博士研究生, 主要研究方向为图像分析与处理、电路与系统设计。E-mail: tianqiu@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郭立(1946—), 男, 内蒙古人, 中国科技大学电子科技系教授, 博士生导师, 主要研究方向为电路与系统、数字信号处理、数字图像处理。E-mail: lguo@ustc.edu.cn

幅图的概率密度分布相似的特点,提出可以将移动前后的激光散斑图像像素在单方向上求和,使整幅图像的能量集中在边缘上,然后只使用边缘上所形成的一维数列来求解激光散斑图像位移的方法。大量实验及理论分析证明上述算法速度快,运算量减小,而且测量精度与普通数字散斑相关测量方法算法的精度基本相当。

2 基本原理

数字散斑相关测量法的基本测量过程为由

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中 $f(x_i, y_j)$ 表示子集 A 中某一点 (x_i, y_j) 处的灰度值, $g(x'_i, y'_j)$ 表示子集 B 中一点 (x'_i, y'_j) 处的灰度值, $x'_i = x_i + u, y'_j = y_j + v, \bar{f}$ 和 \bar{g} 分别为子集 A 和子集 B 的平均灰度,即

$$\bar{f} = m^{-2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f(x_i, y_j), \quad (2)$$

$$\bar{g} = m^{-2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m g(x'_i, y'_j). \quad (3)$$

(1) 式分母分别为子集 A 和子集 B 的均方根,分子为 A 和 B 之间的相关矩,通过搜索相关系数 C 的峰值来确定待测点 x 方向位移 u 和 y 方向的位移 v 。

$$p_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{\varphi \langle I(r) \rangle} \left\{ \exp \left[-\frac{2I(r)}{(1+\varphi)\langle I(r) \rangle} \right] - \exp \left[-\frac{2I(r)}{(1-\varphi)\langle I(r) \rangle} \right] \right\}, & \varphi > 0, I(r) \geq 0 \\ \frac{4I(r)}{\langle I(r) \rangle^2} \exp \left[-\frac{2I(r)}{\langle I(r) \rangle} \right], & \varphi = 0, I(r) \geq 0 \\ 0, & I(r) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 p 为某点的光强概率密度, I 为激光的强度, r 为成像点的位置, φ 为光的偏振度, $\langle \rangle$ 为求均值符号。(4) 式说明,散斑图案上某一点的光强概率密度只和激光强度和激光被反射后的偏振度有关,而和反射面本身的图案无关。对应于数字散斑图像而言,这个光强概率密度分布函数就等同于数字散斑图像灰度值的分布。

散斑的另外一个特点是无论是在数字散斑图像上只取一小块还是整幅图像,还是任意从图中抽取若干个点,其灰度的分布规律都是相似的,且与其概率密度曲线相吻合。图 1 是从整幅图上取一小块的

CCD 摄像机记录被测物体位移或变形前后的两幅散斑图,经模-数转换得到两个数字灰度场,对两个数字灰度场做相关运算,找到相关系数极值点,得到相应的位移或变形。

由于散斑分布的随机性,散斑场上每一点周围的一个小区域中的散斑分布与其他点不同,这样的小区域通常称为子集。取 P 点为待测点,以 P 为中心取子集 A ,其大小为 $m \times m$ 个像素,当靶面发生位移或变形后,子集 A 移至子集 B 的位置。由概率与统计理论,子集 A 和子集 B 的相关系数为^[4]

3 边缘相关测量法的提出

如果直接使用数字散斑相关测量方法,计算量非常庞大,并且上述算法并未充分利用散斑图像的特点。

3.1 数字散斑图像的特点及边缘求和的特性

常见的散斑多数是部分偏振散斑。由散斑统计光学的基本理论和散斑的光学模型可以得到部分偏振散斑光强概率密度函数以及部分偏振散斑光强概率密度曲线^[5]

灰度直方图,图 2 是从整幅图上任意取若干行所统计的灰度直方图,可以看出二者很相像。

3.2 边缘相关测量法的原理

散斑灰度值的随机分布特性,使得散斑图像不同于一般的各类数字图像。对于一般的数字图像来说,如果从中任取一个小的区域,那么这个区域的灰度分布的规律可能和整幅图像的灰度分布完全不同。

基于这一规律,就可以把一行的数据相加求和。因为已知这一行数据的概率分布特性,那么按照概率论的基本规律,如果替换掉其中 10 个数据的 1 个,这一个数据的变化对这 10 个数据均值的影响是

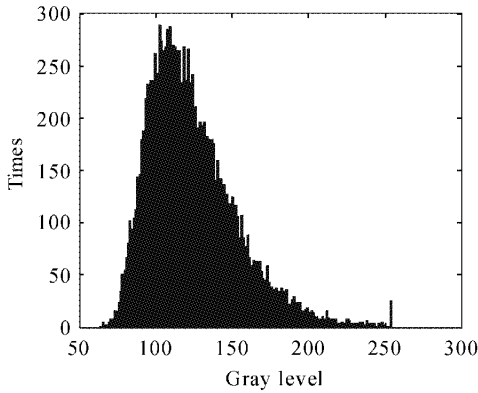


图 1 散斑图像子集的灰度分布

Fig. 1 Gray level histogram of speckle images' subset

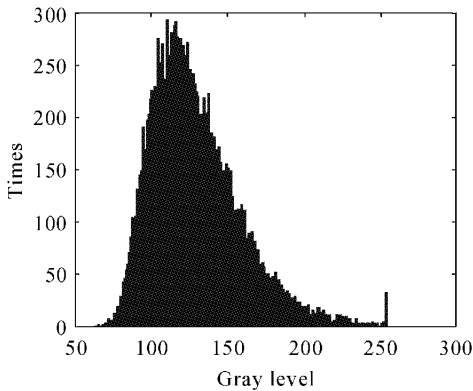


图 2 任意取若干行的灰度分布

Fig. 2 Gray level histogram of speckle images' random lines

微乎其微的。

以上分析表明,在单方向上求和之后得到两个一维序列,如图 3 所示

$$P_x(k) = \sum_{i=1}^n P(k,i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$P_y(k) = \sum_{i=1}^n P(i,k), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

与数字散斑相关测量方法相似,可以利用这两

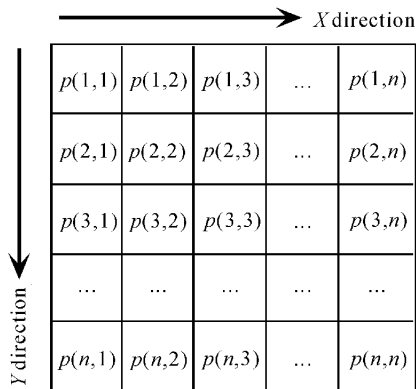


图 3 数字激光散斑图像的像素阵列

Fig. 3 Pixel array of digital speckle images

个一维序列的变化情况来求解图像分别在 x 和 y 方向上的位移,但此时的相关系数变为

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^m [f(x_i) - \bar{f}_x][g(x'_i) - \bar{g}_x]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [f(x_i) - \bar{f}_x]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m [g(x'_i) - \bar{g}_x]^2}}, \quad (7)$$

$$C_y = \frac{\sum_{j=1}^m [f(y_j) - \bar{f}_y][g(y'_j) - \bar{g}_y]}{\sqrt{\sum_{j=1}^m [f(y_j) - \bar{f}_y]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m [g(y'_j) - \bar{g}_y]^2}}, \quad (8)$$

分别搜索相关系数 C_x 和 C_y 的峰值来确定待测点 x 方向的位移 u 和 y 方向的位移 v 。

在概率论中,若 (X, Y) 为二维连续型随机向量,具有概率密度 $f(x, y)$,则有关于 X 的边缘概率密度为概率密度 $f(x, y)$ 在 y 方向的积分;关于 Y 的边缘概率密度为概率密度 $f(x, y)$ 在 x 方向的积分。而上述对 x 方向上和 y 方向上像素求和的方法与求边缘概率密度的方法相似,因此将上述方法称为数字散斑边缘相关法(DSMC)。

3.3 数字散斑边缘相关测量方法的实现步骤

由于散斑图记录的是离散的灰度信息,相关搜索时窗口的平移也只能以像素为单位进行,因此整像素相关搜索所能获得的位移是以像素为单位的值,而真实的位移值不一定正好为整像素值。为了进一步提高精度,采用对灰度值进行插值或拟合,然后以 0.1 像素或 0.01 像素作为最小单位进行搜索的方法,得到亚像素级的位移。理论上用对灰度值进行拟合来作亚像素搜索,分辨率可达 0.01 像素;实际测量中,由于外界因素的影响(主要包括光源的不稳定性、摄像机电子噪声、散斑图像数字化时的量化误差),测量的平均误差为 0.1 像素,测量精度达到 1%^[6]。实现步骤如下:

1) 对图像 0 分别在垂直方向和水平方向求和,使能量集中在下边缘和右边缘,二维散斑图像变为两个一维序列 X_0, Y_0 。

2) 对图像 1 做同样的求和运算,得到 X_1, Y_1 ;

3) 对这四个一维序列 X_0, Y_0, X_1, Y_1 做插值,得到 $X_{0_ins}, Y_{0_ins}, X_{1_ins}, Y_{1_ins}$;

4) 对这四个序列 $X_{0_ins}, Y_{0_ins}, X_{1_ins}, Y_{1_ins}$ 进行滤波,除去小的尖峰,得到新的 $X_{0_ins_f}, Y_{0_ins_f}, X_{1_ins_f}, Y_{1_ins_f}$;

5) 利用上述序列中 $X_{0_ins_f}$ 和 $X_{1_ins_f}$,用相关法求得一组位移,即为在 x 方向(水平方向)的位移 d_x ;

6) 利用上述序列中 $Y_{0_ins_f}$ 和 $Y_{1_ins_f}$, 用相关法求得一组位移, 即为在 y 方向(垂直方向)的位移 d_y 。

3.4 数字散斑边缘相关测量方法的运算量估计

设所取散斑图像子集的面积 $N \times N$ 像素, 搜索的范围 $M \times M$, 为了求解小位移进行 K 倍插值, 则运算量的估计如下:

由于使用相关法最主要的运算量来自于乘法运算, 而且单次乘法运算所消耗的时间也比较长, 这里主要考虑乘法运算对整体运算量的影响。

对数字散斑相关测量法来说, 求解一个相关系数, 要对一个 $N \times N$ 像素的子集进行 $N \times N \times K \times K$ 次乘法运算; 如果搜索范围为 $M \times M$, 则需求解 $M \times K \times M \times K$ 个相关系数。若忽略加减运算, 主要考虑乘法运算, 则运算量为 $N \times N \times K \times K \times M \times K \times M \times K$ 次乘法运算, 即 $N^2 M^2 K^4$ 次乘法运算。

而对于数字散斑边缘相关测量法来说, 取一个 $N \times N$ 像素的子集, 首先使用边缘法, 将它简化为两个长度为 N 的一维序列。求解一个相关系数, 只要进行 $N \times K$ 次乘法运算; 如果搜索范围为 $M \times M$, 计算 x 方向上的位移和 y 方向上的位移需分别求解 $M \times K$ 个相关系数, 即共需要 $2 \times M \times K$ 个相关系数。若忽略加减运算, 主要考虑乘法运算, 则运算量为 $N \times K \times 2 \times M \times K$ 次乘法运算, 即 $2NMK^2$ 次乘法运算。

因此, 边缘相关测量法的运算量约为数字散斑相关测量方法的 $2NMK^2 / (N^2 M^2 K^4) = 2 / NMK^2$ 倍。

当所取散斑图像子集的面积 30×30 像素, 搜索的范围 $-1 \sim 1$ 像素, 即 $M = 2$, 搜索的范围 2×2 像素, 进行 10 倍插值时: 边缘相关测量法的运算量是数字散斑相关测量方法的 $2 / NMK^2 = 2 / 30 \times 2 \times 10 \times 10 = 1 / 3000$, 因此大大降低了运算量。

4 实验结果

根据上述方法编制了散斑图像边缘相关法的运算程序, 并对一平面的平移进行了实际测量, 获得了比较满意的实验结果。

实验时 $7.5 \mu\text{m}$ 对应 1 个像素; 测量距离为 $5.3 \mu\text{m}$, 为 0.707 像素; 插值倍数用的是 10 倍插值, 图像子集大小为 30×30 像素。用散斑图像边缘相关法计算一点的位移在 P4-2.4G 的微机上需 1.86 ms; 而直接使用数字散斑相关测量方法需要 4.4063 s。边缘相关测量法比数字散斑相关测量方法约快 2400 倍, 与粗略估计的 3000 倍在同一个量级, 测量平均误差在 0.05 像素以下, 已经足够小, 但是测量的标准差稍偏大。

可以适当增加散斑图像子集的面积, 减小测量的标准差, 但运算时间会相应增加, 如表 1 所示。

表 1 数字散斑相关测量和数字散斑边缘相关测量结果和效率的比较

Table 1 Comparison of DSMC and DSCM method on measurement result and efficiency

Measurement method	Area of sub-image / pixel	Mean error of 100 measurement results (X,Y) / pixel	Measurement standard deviation of 100 results (X,Y) / pixel	Mean time of one measurement
DSCM method	30	(-0.007, 0.033)	(0.001, 0.0516)	4.4063 s
DSMC method	30	(0.015, 0.040)	(0.0824, 0.0731)	1.860 ms
DSMC method	60	(0.013, 0.040)	(0.0371, 0.0533)	3.160 ms

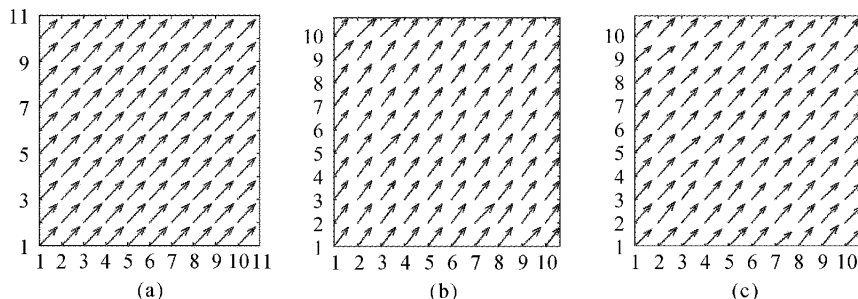


图 4 理想情况(a), 使用数字散斑相关测量(b)和数字散斑边缘相关测量(c)方法测得的散斑平移变形场

Fig. 4 Laser speckle's displacement field of ideal (a), DSCM method (b) and DSMC method (c)

对一个平移的散斑场进行了测量实验,实验所用的是在 45° 方向上平移一个像素单位的散斑场,理想情况下,实际使用数字散斑相关测量方法和数字散斑边缘相关测量方法的测量结果分别如图 4 所示。综合表 1 的测量结果的统计分析,可见两种算法的测量结果比较相似,但是测量所需要的时间却相差很大。

5 结 论

理论分析和实验数据表明,数字散斑边缘相关测量法算法速度快,大大节省了数字散斑相关测量中数据处理的时间,而对运算的精度影响不大,在可以接受的范围之内。为了减小对运算精度的影响,可以适当增大子集的面积。运算量表达式以及实验表明,增大子集面积会增加运算时间,但是与普通的数字散斑相关测量方法相比,其对运算量的降低仍然是非常可观的。

参 考 文 献

- 1 Ichirou Yamaguchi. A laser-speckle strain gauge [J]. *J. Phys. E: Sci. Instr.*, 1981, **14**(11):1270~1273
- 2 Miguel Asmad, Guillermo Baldwin, Cordula Maczeyzik *et al.*. Experimental study of the surface roughness in metals with different surface finishing by two dimensional correlation of speckle pattern [C]. *SPIE*, 2005, **5776**:530~537
- 3 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
- 4 Y. C. Chan, Fan Yeung, Guangchang Jin *et al.*. Nondestructive detection of defects in miniaturized multilayer ceramic capacitors using digital speckle correlation techniques [C]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, 1995, **18**(3):677~684
- 5 Liu Peisen. Foundations of Speckle Statistical Optics [M]. Beijing: Science Press, 1987. 69~90
刘培森. 散斑统计光学基础[M]. 北京:科学出版社, 1987. 69~90
- 6 Jin Guanchang. Computer-Aided Optical Metrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 143~155
金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京:清华大学出版社, 1997. 143~155