

文章编号: 1002-1582(2005)06-0871-04

数字散斑相关方法亚像素求解的一种混合方法^{*}马少鹏¹, 金观昌², 赵永红³

(1. 北京理工大学 理学院力学系, 北京 100081; 2. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

(3. 北京大学 地球物理学系, 北京 100871)

摘 要: 亚像素求解是数字散斑相关方法(DSCM)中最重要的技术。亚像素求解算法的精度和效率直接影响 DSCM 的精度和计算速度。目前广泛应用的两种亚像素求解方法在处理高质量散斑图时都存在一定的缺陷: 基于灰度插值的散斑场亚像素恢复方法, 其计算精度较高, 但计算消耗太大; 基于相关系数分布的拟合方法, 其计算消耗小, 但计算精度较低。在分析两种亚像素求解方法各自优缺点的基础上, 提出了一种结合两种算法优势的混合算法。混合算法在保证亚像素求解精度的基础上, 可以大大降低整个算法的计算消耗。

关 键 词: 数字散斑相关方法(DSCM); 亚像素求解; 精度; 计算消耗

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

A hybrid method for subpixel registration of digital speckle correlation method

MA Shao-peng¹, JIN Guan-chang², ZHAO Yong-hong³

(1. Department of Mechanics Science School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Department of Engineering Mechanics Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. Department of Geophysics Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Subpixel registration is the most important technique in digital speckle correlation method (DSCM). The accuracy and efficiency of the subpixel registration algorithms directly affect the accuracy and efficiency of DSCM. The currently most often used algorithms for subpixel registration could be divided into two categories: the Gray-value Interpolation based on subpixel reconstruction (GISR) method, and the correlation coefficient distribution based on fitting (CCDF) method. However, when processing the high-quality speckle images using DSCM, one could find that the GISR method was with high accuracy but with very large computational consumption, while the CCDF method with rather low computational consumption but with low accuracy. A hybrid method based on the combination of GISR and CCDF is proposed. Using the hybrid method, the computational consumption decreases greatly while the accuracy of the algorithms holds. The flow chart to realize the hybrid method is introduced and then an experiment is completed to verify the efficiency and accuracy of the method.

Key words: digital speckle correlation method (DSCM); subpixel registration; accuracy; computational consumption

1 引 言

数字散斑相关方法(DSCM), 亦称数字图像相关(DIC)方法, 是一种基于数字图像处理的固体材料表面变形测量法^[1~4]。这种方法不但具有其它光学测量方法的全场、非接触等优点, 而且实施简单、对测量环境要求低(使用白光或自然光照明)。此外, 还可以很方便地调整 DSCM 的测量范围和测量灵敏度(DSCM 的测量范围和灵敏度以像素表达, 与成像系统的放大倍数有关), 因此可应用于不同尺度的力学观测^[5~6]。如果应用立体拍摄光路, 则 DSCM 还可实现三维变形测量^[7]。DSCM 自 20 世纪 80 年代提出后, 已经成功地应用在多种材料的力

学变形测试。

DSCM 以图像匹配为基础。一般的图像处理领域中的匹配问题只做到像素(半个像素)精度即可, 但用于固体材料的变形测量的 DSCM 需要更高的亚像素精度, 即 DSCM 要进行亚像素匹配, 其位移测量结果要具有亚像素精度。目前对于分布较好且图像质量较高的散斑图, 在变形比较简单的情况下, 位移测量可以达到 0.01 像素精度甚至更高^[4]。在完成像素级的匹配后再求解亚像素的匹配结果的过程称为亚像素定位或亚像素求解^[8,9]。因此, 亚像素求解是 DSCM 中的关键技术, 其精度决定了整个 DSCM 算法的精度, 亚像素求解也是整个 DSCM 数据处理中计算消耗最大的步骤。因此提高亚像素求

^{*} 收稿日期: 2004-09-21

E-mail: masp@bit.edu.cn

基金项目: 辽宁省高校科研基金资助项目(202183390); 国家自然科学基金资助项目(NSFC 50504001); 中科院武汉岩土所重点实验室开放基金资助项目(IRSM Z110304)

作者简介: 马少鹏(1974-), 男, 陕西省西安市人, 北京理工大学理学院力学系讲师, 博士, 主要从事实验固体力学中的光测方法的研究。

解算法的效率是对 DSCM 算法的一种重要改进。

目前 DSCM 亚像素求解的主要方法可分为两类: 基于灰度插值的散斑场亚像素恢复方法^[10~14] (gray-value interpolation based sub-pixel reconstruction, GISR) 和基于相关系数分布的拟合方法^[11, 13, 14] (correlation coefficient distribution based fitting CCDF)。CCDF 的计算消耗比 GISR 小很多。关于两者在计算精度上的差别也有一些研究报告^[11, 15], 但还存在一些模糊的地方。本文首先详细讨论了两种方法在计算精度和计算消耗上的差别, 然后在考虑两种方法特点的基础上, 提出了一种结合两者优势的混合方法, 在保证亚像素求解精度的基础上大大减少了计算消耗, 提高了方法的效率。

2 DSCM 原理及亚像素求解

2.1 DSCM 原理

DSCM 是通过匹配变形前后两幅散斑图像上对应点的几何位置来获得点的位移信息的, 进而获得应变场。设 $I_s = F(x, y)$ 和 $I_t = G(x, y)$ 分别为变形前后两幅散斑图的灰度分布。式中: I_s 称为源图

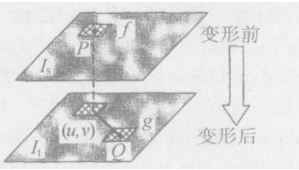


图 1 相关匹配示意图

像, 即基准图像, 代表起始状态; I_t 称为目标图像, 代表变形后的状态。如图 1 所示, 假设要对 I_s 上的点 P 的运动进行跟踪, 则需求得点 P 在 I_t 上的匹配点。为此, 先在源图像上取点 P 的特征散斑图案 f , 用相关匹配的方法在目标图像上搜索与之最匹配的散斑图案 g 。搜索成功后, 则散斑图案 g 所对应的点 Q 为 P 点变形后的位置, 两点之间的坐标差即为该点的位移。定义一个相关函数来表示 P, Q 两点特征散斑图案 f 和 g 的匹配程度。对于按一定规则设计的相关函数(式 1)来说, 其极值点(最大值)表示最佳匹配。

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)]}{[\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 \cdot [\sum \sum (g - \langle g \rangle)^2]^{1/2}} \tag{1}$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均。上述匹配搜索算法给出的结果只可以达到像素级的精度, 若要完成整个 DSCM 的数据处理, 还需进行下面将要介绍的亚像素求解。

2.2 DSCM 两种主要的亚像素求解方法

亚像素求解方法可分为两类: 基于灰度插值的散斑场亚像素恢复方法(GISR)和基于相关系数分布的拟合方法(CCDF)。GISR 方法是在现有的散

斑图像上用插值的方法来获得亚像素位置的灰度值, 然后在插值后的图像上进行相关搜索, 获得亚像素级的精度。对于散斑场 $F(x, y)$ 来说, 高分辨率的恢复散斑场可表示为

$$\overline{F(x, y)} = \sum_{i,j} F(x_i, y_i) \cdot M_{ij}^K(x, y) \tag{2}$$

式中 M 为插值函数。根据 M 选取的不同, 高分辨散斑场的恢复方法有双线性插值^[10]、二次多项式插值^[10]、三次多项式插值^[10]、三次样条插值^[10, 16] 以及五次样条插值^[16]。

CCDF 方法假设相关函数主峰(图 2)的分布符合某一模型 $C(x, y)$, 其中 x, y 为空间坐标。通过主峰上若干已知的整像素点的相关系数(一般取以整像素的峰值点为中心的 3×3 或 5×5 或更大的邻域)来确定模型 $C(x, y)$ 的未知参数, 最后由

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

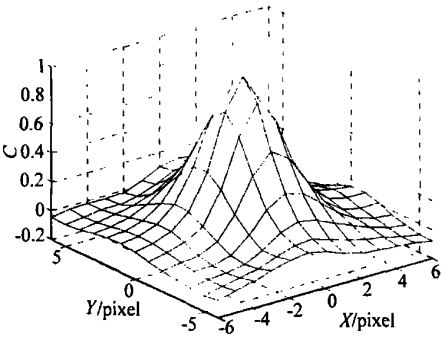


图 2 相关主峰示意图

得出亚像素的极值点和最大相关系数^[11, 13]。根据 $C(x, y)$ 选择的不同, CCDF 的求解方法可以有多种。一般假设 $C(x, y)$ 为以下几种形式:

$$C(x, y) = ax^2y^2 + bxy^2 + cx^2y + dx^2 + ey^2 + fxy + gx + hy + i \tag{4}$$

$$C(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \tag{5}$$

式(4)中的 9 个参数由图 3 所示的 9 个已知点求得, 式(5)中参数的求解只需要 6 个已知点即可。将确定的曲面形式代入式(3)便可求得亚像素精度的最大 C 值点 (X_s, Y_s) 。通过式(5)中的曲面模型, 由 (X_s, Y_s) 可求得解析角, 式(6)中的模型不能得到解析解, 可以用搜索方法得到最终的 (X_s, Y_s) 。也可以用一种简化的一维模型求

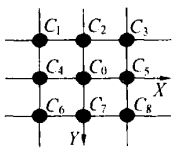


图 3 相关主峰的 3×3 邻域 (C_0 为整像素搜索时相关系数最大值所对应的点)

解。设相关主峰是对称的, 并设相关主峰与通过 C_0 并与 X 轴和 Y 轴平行的平面的两条交线为二次曲线, 用 C_4, C_0, C_5 和 C_2, C_0, C_7 求出二次曲线中的参数, 两条二次曲线的极值点 X_s 和 Y_s 分别对应于最终搜索结果的横坐标和纵坐标, 其解析形式为

$$\left. \begin{aligned} X_s &= \frac{C_4 - C_5}{2(C_5 + C_4 - 2C_0)} \\ Y_s &= \frac{C_2 - C_7}{2(C_7 + C_2 - 2C_0)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这种方法称为一维 CCDF。一维 CCDF 成立的条件是假设相关主峰是对称的。通过对相关主峰的研究发现, 这一假设在大多数情况下是合理的。因此一维 CCDF 虽然简单(计算消耗更小), 但却具有相当高的精度。

2.3 GISR 与 CCDF 的亚像素求解精度对比

根据 GISR 和 CCDF 的原理进行的算法复杂度分析和数字实验都可以证明 CCDF 的计算消耗大大低于 GISR。在以往的研究中, 由于采用了不同的散斑图, 而且未区分环境噪声带来的误差和算法带来的误差, 因此对二者在亚像素求解精度上的差别有不一致的说法。

为系统比较两种方法在精度上的差异, 本文采用模拟散斑图来研究二者的精度问题。散斑图是用数学方法根据已知变形场计算得到的变形前后的散斑图来模拟算法的^[4]。模拟散斑图可以完全消除或控制除变形外的其它影响因素, 因此它是单个算法性能测试的一种合适的选择。

首先模拟一组位移分别为 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.3, 0.5pixel 的散斑图(共 9 幅, 第 0 幅为基准图像, 其余 8 幅为第一幅分别按上述位移变形后的结果, 其中两幅图见图 4), 然后用 GISR 和 CCDF 分别进行亚像素求解, 并将计算结果进行统计分析, 如图 5 所示。在算法中, CCDF 用式(4)的曲面模型, GISR 用三次样条插值。

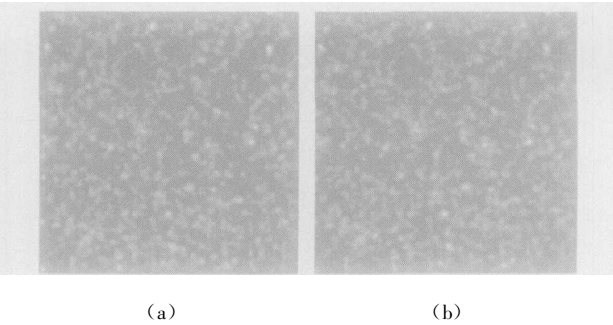


图 4 具有 0.08pixel 位移的两幅模拟散斑图
(a) 参考图像; (b) 变形图像。

可以看出, 对于模拟的无噪声的散斑图来说,

GISR 比 CCDF 的计算精度高, 尤其是当要测量的位移大于 0.01pixel 时更是如此。位移小于 0.01pixel 时误差较大是由于插值算法中的“峰锁”效应所致^[15]。

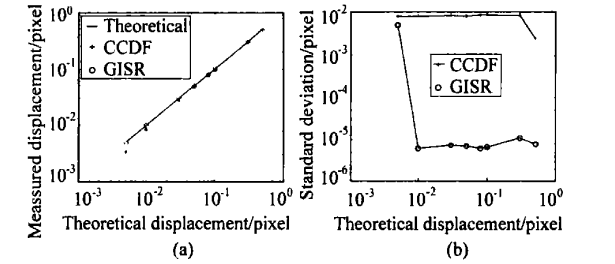


图 5 GISR 和 CCDF 处理模拟散斑图的结果对比
(a) 均值; (b) 标准差。

实际测量中的散斑图均含有相当大的噪声, 下面考虑噪声对算法精度的影响。首先模拟两幅具有 0.1pixel 位移的散斑图, 然后在散斑图上附加不同的高斯白噪声(高斯噪声的均值为 0, 方差分别为 $10^{-6}, 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}, 10^{-2}$, 其中两幅图见图 6)。用 GISR 和 CCDF 两种方法进行处理(算法参数的选取与上相同), 并将计算结果进行统计分析, 如图 7 所示。由图 7 可见, 在噪声较小时, GISR 有较好的精度, 而在噪声较大时, CCDF 有较好的精度。随着噪声的增大, GISR 算法的精度迅速降低, 而噪声对 CCDF 的影响不太大。究其原因, 在 GISR 中, 噪声信息通过插值算法被引入恢复后的散斑图中, 噪声不能得到抑制; 而在 CCDF 中, 噪声信息经过相关系数的计算被引入到相关系数分布中, 由于相关系数计算的统计特征, 噪声信息得到了一定程度的抑制。

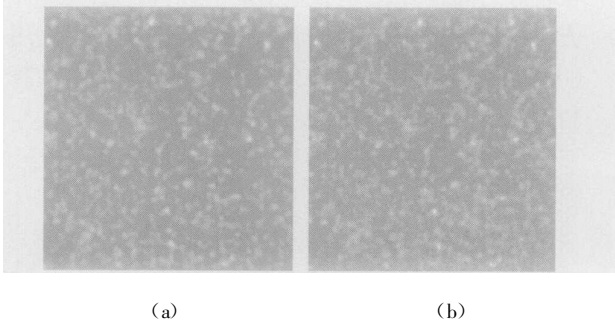


图 6 叠加高斯白噪声的散斑图

(a) 方差为 0.0001; (b) 方差为 0.01。

实际测量中, 散斑图的摄取过程可能引入更复杂的噪声, 不管是 GISR 还是 CCDF, 其系统处理精度都要经过标定才能确定。常用的标定方法是用平移台精确地平移一幅散斑图, 拍摄每个平移步的散斑图, 并将其保存成为标定图像。最后计算标定图像的位移, 并与实际平移量对比, 对算法进行标定。

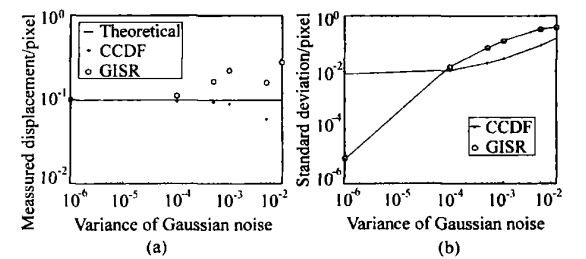


图7 GISR 和 CCDF 处理含噪声模拟散斑图的结果对比
(a) 均值; (b) 标准差。

本文的标定实验采用的平移台的平移精度为 $10\mu\text{m}$,实物图如图8所示。对于由此平移台得到的一组平移的散斑图像来说(平移位移分别为10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, $250\mu\text{m}$),用GISR和CCDF方法处理(算法参数的选取与上相同),其结果如图9示(为了说明问题,将平移位移和处理结果换算成像素表示)。

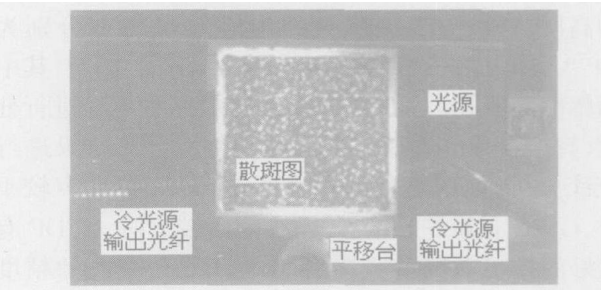


图8 平移实验装置实物图

在此实验环境下得到的实际散斑图,二者在精度上差别不大。但随着图像采集设备的发展、实验环境的改善以及一些图像降噪方法的应用,今后在实验中可能会获得图像质量更高的散斑图。对于质量较好的散斑图来说,根据前面的分析,利用CCDF方法来提高亚像素的估计能力是有限的,而利用GISR方法能使其精度得到较大提高。因此从计算精度上考虑,采用GISR处理将是一个好的选择。

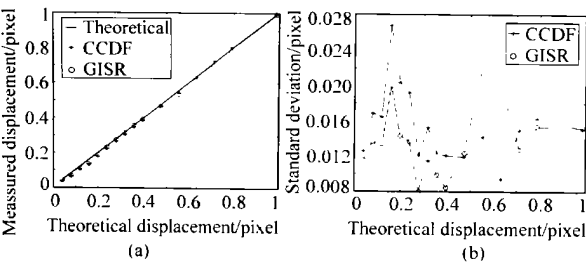


图9 GISR 和 CCDF 处理含噪声模拟散斑图的结果对比
(a) 均值; (b) 标准差。

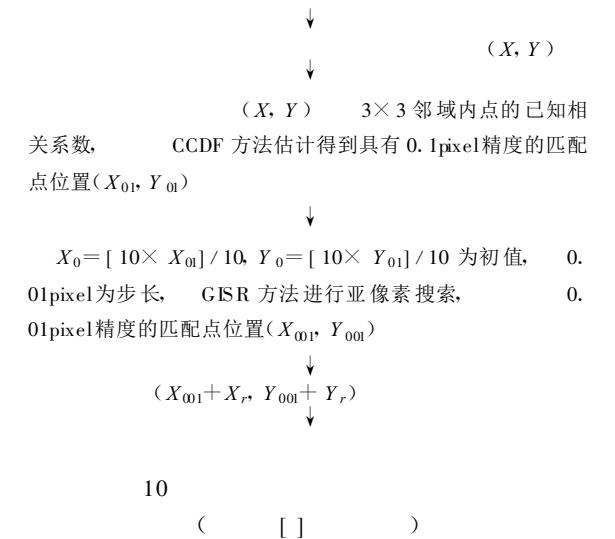
3

GISR 是将来 DSCM 高精度亚像素处理的重要方

法。
，GISR 的计算消耗太大，
。CCDF 方法的计算效率很高，
，
，
，
；
。

3.1

，CCDF 方法的
处理精度可以达到 $0.1(0.05)\text{pixel}$ 的水平，
GISR 方法之前，CCDF 估计插
值点的初始位置(0.1 或 0.05pixel 精度水平)，
GISR 方法搜索 $0.01()\text{pixel}$ 精度的
位移，
10 所示。



3.2

，
GISR 和 CCDF 以及
混合法处理同样的散斑图，
0.35pixel 的散斑图的对比结果如表 1 所示。

(GISR 相同)
(50%)。

	GISR	CCDF	混合法
均值/ pixel	0.351	0.358	0.351
标准差/ pixel	0.0005	0.007	0.0005
计算消耗/s	100.4	1.5	53.8

注: PIV2.4Gbyte 的 PC 机上用 Matlab6.5 编程语
言进行计算的。
81 个点的位移，
 41×41 . GISR 和混合法的插值亚像素恢复只进行到
 0.001pixel 精度。
(下转第 877 页)

