

基于 Matlab 的数字图像相关法的程序实现

余跃心, 曹茂柏

(淮阴工学院 建筑工程系, 江苏 淮安 223001)

摘要: 数字图像相关法是对全场位移和应变进行分析的一种新的实验力学方法。图像处理是其核心之一。本文探讨了根据相关技术寻求位移场的基本原理, 并编制了基于 Matlab 的数字图像相关法程序。程序验证结果表明本程序处理速度快, 精度高, 可以满足基于相关技术的图像处理的要求。

关键词: 程序; 数字图像; 互相关; Matlab

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-7961(2004)05-0060-04

0 前 言

模型常被用来描述土的工程性质、校验预测模型以及施工工程模拟等方面的研究工作。为了便于对观察现象或试验结果进行定量分析, 必须进行土的变形测量。土的变形测量通常有两种方式: 一种是在模型边界处设置位移探头以测定某点的位移, 二是利用光学技术对整个研究区域进行变形场内的非插入式测量。

数字图像相关法(Digital Image Correlation DIC)或激光散斑测速法(Laser Speckle Velocimetry ISV)是对全场位移和应变进行量化分析的新实验力学方法^[1-4]。自从 Peters 和 Ranson 于 1982 年提出该方法以来^[1], 由于其能进行全场的变形或应变测量、对土体无干扰等特点, 日益受到重视, 获得了长足的发展。在 DIC 方法中, 图像处理的算法是其核心之一, 因此是目前 DIC 理论研究中的主要方面之一, 它直接决定了处理结果乃至 DIC 方法的可靠性和精确度。

通常采用相关技术(Correlation)或最小二次差分(Minimum Quadratic Difference MQD)来求解子区域的平均位移, 然后再采用曲线拟合、插值等数学手段来寻求亚像素级的位移。其中相关方法已成为 DIC 分析方法中最常用的一种算法。本文也以相关技术为基础, 探讨图像处理方法及其程序实现。

1 数字图像相关法基本原理

1.1 基本原理^[2-5]

当用一束激光照射在漫反射物体表面上时, 被物体表面漫反射回来的光会在其前方空间干涉形成一种随机的粒子结构, 将这种结构拍摄下来就称为散斑图。这种粒子结构与物体表面的微观结构是对应的, 物体表面的不同区域有不同的微观结构, 从而形成不同的随机散斑。当物体变形时, 散斑会随着表面的变形而发生移动。因此, 物体变形后可以通过匹配散斑图像来得到土体的变形信息。

目前, DIC 中的散斑场主要有两种: 一种是激光散斑,

用激光作光源照射物体, 在物体表面前方干涉形成散斑场; 另一种是人工散斑, 可以在模型表面涂以玻璃微珠漆, 然后用白光作光源拍摄便能得到一个人工散斑场。实际上, 砂土颗粒(或在粘土表面涂抹细砂)具有不同色彩, 在光源的照射下可以形成天然的具有不同灰度的散斑图像, 姑且称之为天然散斑场。

在 DIC 中, 将土体变形前后摄取的散斑(灰度)图像分割成许多网格, 每一网格称之为子区域(Interrogation)。将变形前任一子区域与变形后散斑图像进行全场匹配或相关运算, 根据峰值相关系数确定该子区域在变形后的位置, 由此可以得到该块的平均位移。对变形前所有子区域进行类似运算, 就可以得到整个位移场。

1.2 数字图像分析方法

通常采用相关技术(Correlation)或最小二次差分(Minimum Quadratic Difference MQD)来求解 Interrogation 块的平均位移, 其中相关方法已成为 DIC 分析方法中最常用的一种算法。

设变形前后两帧数字图像分别为 g_1 和 g_2 , $g_1(i, j)$ 和 $g_2(i, j)$ 是数字图像的灰度值。 G_1 和 G_2 是 g_1 和 g_2 图像中两块 $M \times N$ 个像素的待匹配区域。 (m, n) 是两个匹配块之间的相对位置。匹配块之间的标准相关函数 G 可由下式给出:

$$C(m, n) = \int_A g_1(i, j) g_2(i+m, j+n) \quad (1)$$

$$C(m, n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i, j) g_2(i+m, j+n) \quad (2)$$

式(2)为式(1)的离散形式。式中: i, j 是匹配块左上角的顶点坐标。 A 是待匹配块。 g_1 和 g_2 分别是两帧图像的灰度集度。 M, N 是搜索子块窗口的像素尺寸。将第二帧图像中搜索子块沿图像坐标平移 m 和 n 计算相应的相关系数, 进而构成空间相关面。若两帧图像之间有位移, 那么就可以用相关面中相关系数的峰值坐标表示图像位移的方向和大小。计算每一个待匹配块的位移可构成整个图像的

收稿日期: 2004-08-28 修改日期: 2004-09-05

基金项目: 江苏省高校自然科学研究指导性计划项目(O3KJD560042); 淮阴工学院科研基金项目(2002007)。

作者简介: 余跃心(1964-), 男, 江苏淮安人, 副教授。

位移场。一般来讲, 采用待匹配块的形心坐标处的位移来 表征子块的位移。

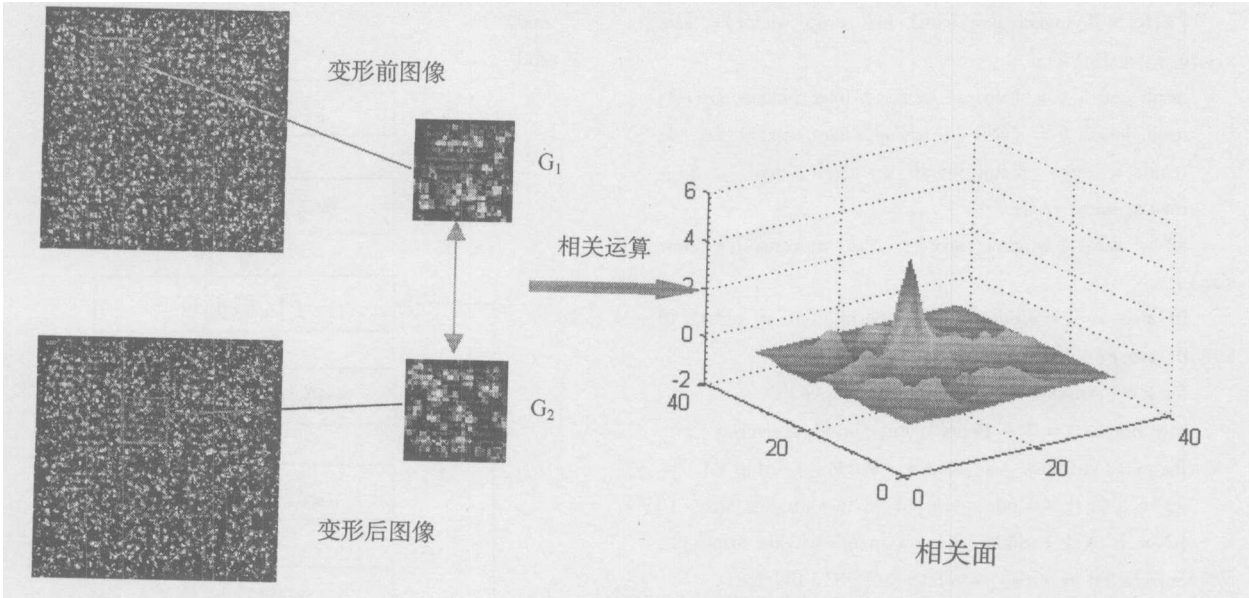


图 1 数字图像相关技术原理图

1.3 亚像素

上述方法求得的位移场, 是整像素位移值。在实际应用中, 由于数字相机像素有限, 确定整像素位移的意义不大。通常希望能够获得 0.01 像素的测量精度。因此需要进一步确定亚像素位移。目前在确定亚像素位移方面已经有了不少方法, 如插值运算, 拟合以及梯度法^[6-10]。从相关系数分布曲线来看, 相关系数分布规律接近于高斯分布, 因而可以考虑采用高斯插值方法进行亚像素位移计算。所以这里仅介绍程序中最常用的 G a u s s i a n 插值计算方法, 其它方法可参考有关文献, 在此不再赘述。

若相关系数的峰值在 $[i, j]$ 点, 其附近的相关系数可以用来拟合高斯函数曲线。高斯函数曲线假定为如下形式:

$$f(x) = C \exp[-(x_0 - x)^2 / \lambda]$$
 (3)

则 X、Y 方向上的高斯插值可按下式进行:

$$x_0 = i + \frac{\ln R_{i-1,j} - \ln R_{i+1,j}}{2 \ln R_{i-1,j} - 4 \ln R_{i,j} + 2 \ln R_{i+1,j}}$$
 (4)

$$y_0 = j + \frac{\ln R_{i,j-1} - \ln R_{i,j+1}}{2 \ln R_{i,j-1} - 4 \ln R_{i,j} + 2 \ln R_{i,j+1}}$$
 (5)

式中: $R_{i,j}$ 为 (i, j) 点的相关系数。

2 数字图像相关法程序 M A T L A B 实现

2.1 M A T L A B 语言特点^[11]

MATLAB 源于 M A T r i x L A B o r a t o r y 一词, 原意为矩阵实验室。美国 New Mexico 大学计算机系 C l e v e M o l e r 教授发现学生用 Fortran 编写接口程序很费时间, 于是 M o l e r 教授自己动手编写 E I S P A C K 和 L I N P A C K 的接口程序, 并取名为 M A T L A B。1984 年 M o l e r 与 L i t t l e 成立了 M a t h w o r k s 公司, 正式把 M A T L A B 推向市场, 并继续进行 M A T L A B 的研究开发。MATLAB 利用其丰富的函数资源, 使编程人员从繁琐的程序代码中解放出来。笔者认为, MATLAB 的最突

出的特点就是简洁。MATLAB 用更直观、符合人们思维习惯的代码, 代替了 C 和 F O R T R A N 语言的冗长代码, 给用户带来了最直观、最简洁的程序开发环境。

功能强劲的工具箱是 M A T L A B 的另一重大特色。MATLAB 包含两个部分: 核心部分和各种可选的工具箱。其工具箱又可分为两类: 功能性工具箱和学科性工具箱。这些工具箱都是由该领域内的学术水平很高的专家编写的, 所以用户无需编写自己学科范围内的基础程序, 而直接进行高、精、尖的研究。本文数字图像相关法的程序核心就是采用 M A T L A B 的图像处理工具箱来实现的。

2.2 D I C 程序框图及主程序代码

基于上述基本原理, 数字图像相关技术程序主要分为三大模块: 图像预处理、主程序以及数据的后处理和图形显示。其中主程序中相关系数算法可以采用基于傅立叶变换的算法, 计算速度大大加快。亚像素插值后所形成的位移矩阵, 由于图像噪声等原因, 个别位移矢量显著不同于周围的位移矢量, 属于奇异值, 须对其进行处理。同时, 个别位移矢量在计算过程中由于信噪比未超过一定值, 位移矢量充不定值。这两种情况都可以采用 K r i g i n g 算法进行插值运算, 以获得整个位移场。图 2 为数字图像相关技术程序框图。为便于理解, 主程序中的相关算法子程序一并给出。

```
function DIC
[ filenames amount filebase] = R_image_dir...
( I_dir_choice Imp);
in1 = [ I_dir_choice filesep filenames( 1: )];      in2
= [ I_dir_choice filesep filenames( 2: )];
[ a b] = R_image_pair( image1, image2 [ 0 0 0 0 ] );
for fileind = 1: 2 amount
    in1 = [ image_dir_choice filesep filenames( fileind
, : )];
    in2 = [ image_dir_choice filesep filenames( fileind +
```

```
1: );  
[ a b] = R_image_pair( in1 in2 crop_vector); [ size_  
x size_y] = size( a);  
result_length_x = ( size_x - overlap) /inter_window_size+1  
result_length_y = ( size_y - overlap) /inter_window_size+1  
result = zeros( result_length_x* result_length_y 5);  
result_index = 0  
a2 = zeros( window_size); b2 = zeros( window_  
size);  
fft_size = 2* window_size; correlation = zeros( fft_  
size fft_size);  
for k=1: window_size size_x - overlap+1  
row_number = 1+ floor( k /inter_window_overlap);  
form =1: window_size size_y -window_overlap+1  
a2 = a( k k+window_size -1 m; m+window_size -1);  
b2 = b( k k+window_size -1 m; m+window_size -1);  
correlation = cross_correlate( a2 b2 fft_size);  
[ peak1 peak2 pixi pixj]= find_displacement( correla  
tion);  
[ peakx peaky signal_to_noise] = sub_pixel_velocity  
( correlation pixi pixj peak1 peak2);  
u = ( window_size - peaky) * space_scale /time_scale; v  
= window_size - peakx) * space_scale /time_scale;  
x= m+window_size /2 -1; y = k+window_size /2 -1;  
result_index = result_index + 1;  
result( result_index : )=[ x y u v signal_to_noise
```

3 程序验证

为验证程序的可靠性和精度, 首先用计算机生成一幅随机的灰度图像, 然后将该幅图像在 x y 方向上偏移几个像数。则可以用上述程序来计算这两幅图像之间的位移。如图 3 为一幅散斑灰度图像, 由 Matlab 图像处理工程箱中的 imread 函数将图像数字化, 形成一个灰度矩阵。该灰度

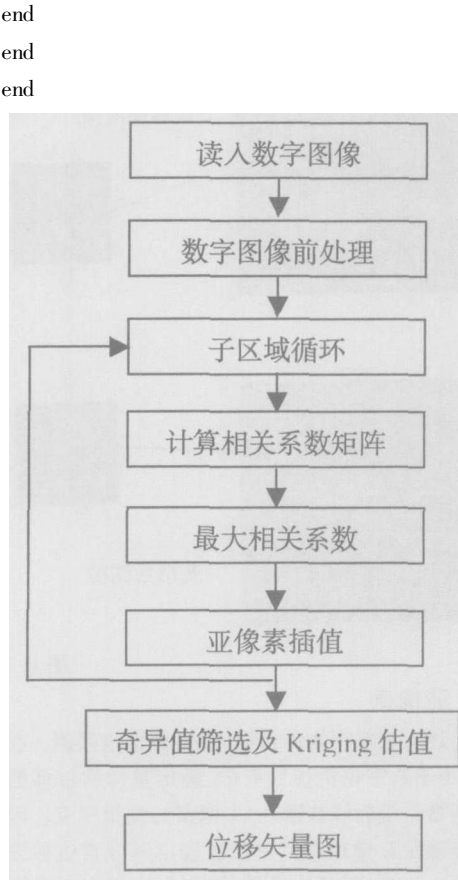


图 2 数字图像相关技术程序框图

矩阵中任一元素表示了某点的灰度值, 也就量灰度矩阵实际是图像灰度的数字化。首先我们将该矩阵进行平移, X 方向上偏移 3 个像素, Y 方向上也偏移 3 个像素, 得到另一幅数字图像。为了模拟光强、相机等环境因素的影响, 我们人为地在第二幅图像添加一些噪声, 如图 3 (b) 所示。显然, 图 3 (b) 由于噪声的加入, 使得灰度场有了一定改变, 但仍可以看出该图像保持了图 3 (a) 的灰度场的分布特征。

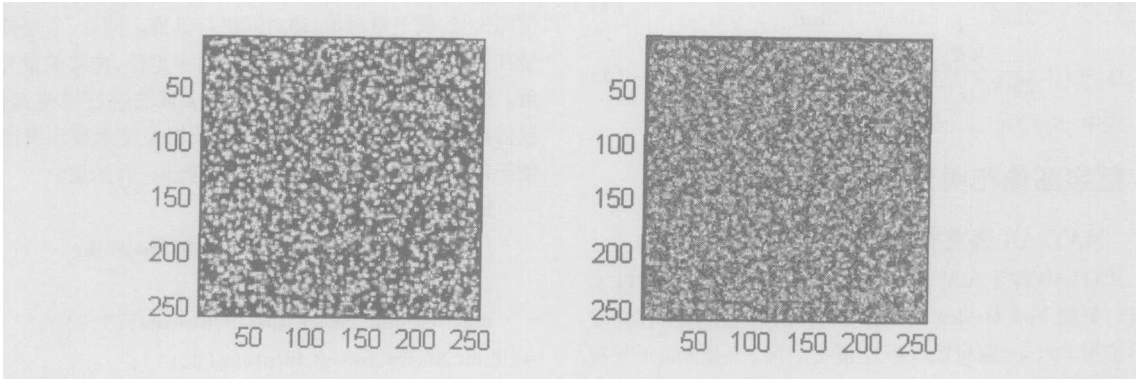


图 3 变形前后的灰度图像

(a) 变形前灰度图像; (b) 平移后加噪声的灰度图像

图 3 (b) 为本文的 DC 程序对这两幅图像处理所得到的位移场。从图中可以看出, 尽管在第二幅图像形成过程

中添加了噪声, 但程序仍然能从这两幅图像中找到真正的位移场。位移矢量清晰地描绘出整个图像向右向下发生的

整体移动。196 个位移矢量统计分析表明 X、Y 方向上的平均位移分别为 2.9949 和 2.9968 像素, X、Y 方向上的最大位移分别为 3.0729 和 3.0727 个像素, 计算结果与真值非

常接近。图 4 为 Y 方向上位移矢量的直方图。从直方图可以看出, Y 方向上的位移在 2.9-3.1 之间变动, 其中 85% 以上的矢量在 2.98-3.02 之间变动。

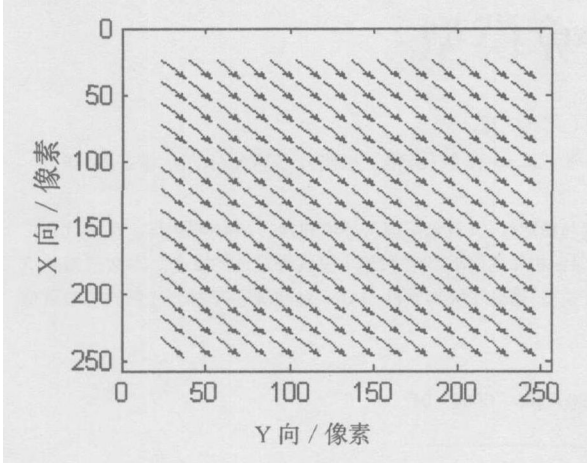


图 4 位移场矢量图

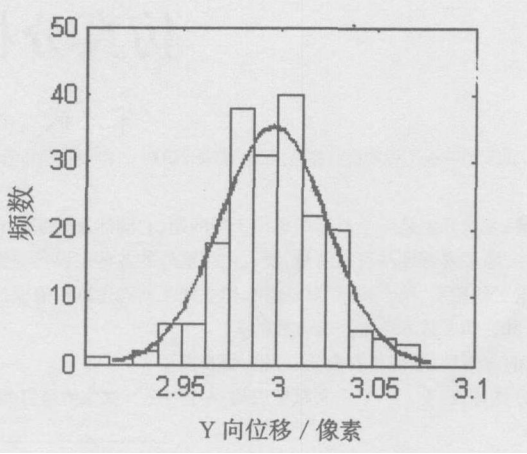


图 5 Y 向位移直方图

4 结 论

本文扼要地介绍了数字图像相关法的基本原理及其典型的算法, 在此基础上编制了基于 M atlab 的数字图像相关法分析程序。主程序由于运用了 FFT 算法, 使运算速度大大加快。程序的后处理部分能够有效的处理某些奇异值及未找到对应匹配区域的矢量(程序中设为不定值), 利用地质统计学中 Kriging 估值技术进行了插值运算, 从而使误匹配所造成的假位移所引起的误差降至最小。程序验证结果表明程序所计算的位移场能够反映全场位移模式, 但是程序的可靠性和精度还应经实验进一步验证。至于窗口大小、搜索区域、灰度分布等参数对测量精度的影响将是今后研究的一个方向。

参考文献:

[1] Peters W. H., Ranson W. F. Digital images Techniques in Experimental Mechanics Opt. Eng. 1982 21(3): 427~431.
[2] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994 26(5): 559-607.
[3] White D. J. Take W. A., M. D. Bolton Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis

[A]. 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geotechnics[C]. Balkema Rotterdam: 997-1002
[4] Gill D., Barry M. Lehan (2001). An optical technique for investigating soil displacement patterns Geotechnical Testing Journal GTJODJ Vol. 24 No. 3 September 2001 324-329
[5] Gui L., Nerzich W. A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms Experiments in Fluids 28(2000): 36-44.
[6] 雷志辉, 于起峰. 亚图像处理技术及其在网格法中的应用[J]. 国防科技大学学报, 1996 18(04): 17-20
[7] 王琛影, 何小元. 相关识别中的曲面拟合法[J]. 实验力学, 2000 15(3): 280-285.
[8] 孟利波, 马少鹏, 金观昌. 数字散斑相关测量中亚像素位移测量方法的比较[J]. 实验力学, 2003 18(3): 343-346
[9] 苏翼雄, 贺忠海, 徐可欣, 陈林才, 蒋诚志. 利用二次曲线拟合的 CCD 图像亚像素提取算法[J]. 计量技术, 2003(7): 3-5
[10] 金浩, 姜文华, 于新瑞, 王石刚. 基于不同区域的亚像素的插值方法[J]. 光学仪器, 2003(4): 7-11
[11] 飞思科技产品研发中心. Matlab6.5 辅助图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003

Programm ing of Digital Image Cross - correlation Method Based on Matlab

SHE Yue - xia Cao Mao - bo

(Construction Engineering Department Huaiyin Institute of Technology Huai'an Jiangsu 223004, China)

Abstract Digital image cross - correlation method (DIC) is a new method of experimental mechanics for the analysis of whole field displacement and strain. Image processing is one of the cores of DIC. The basic principle of DIC is presented and the programming of DIC is edited based on Matlab language. The results of validation indicate this programming runs quickly and has high precision. It can meet the need of image procession of DIC.

Key words programming digital image cross - correlation; Matlab

(责任编辑: 蒋 华)