

数字散斑相关方法的原理与应用

高建新

(同济大学生物工程研究所, 上海 200092)

周辛庚

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 应用图像识别与变分学原理, 对数字散斑相关方法作了理论阐述, 导出了测量物体表面变形场的一般过程, 将力学中的变形测量问题转化为单纯的数值计算问题, 避免了传统光测方法与干涉条纹有关的一系列困难. 初步的实验结果表明, 该方法在工程实际现场、高速冲击动态过程、细观力学变形过程以及变形测量的自动化等方面都有广泛的应用潜力, 从而为光测力学拓展应用领域、实现自动化测量展现了新的前景.

关键词 数字散斑, 相关, 变形测量, 图像处理, 细观力学

引 言

数字散斑相关方法是现代数字图像处理技术与光测力学结合的产物. 传统的光测方法, 如光弹性、云纹、全息、散斑干涉, 一般都需要对被测物体表面作预处理, 如涂散射涂层、刻画网格与栅线, 甚至需做成模型, 然后通过特定的光学或几何干涉形成条纹, 再从条纹中提取所需的信息. 因此, 光测方法的测量环境要求比较高, 一般只能在实验室条件下进行, 至于在一般工程现场中的应用, 则几乎是不可能的. 八十年代发展起来的电子散斑干涉术, 尽管用光电子元件代替了传统的照相干板, 但其测量基础仍是干涉条纹, 对测量环境仍有相当的要求, 因而应用领域与其它光测方法基本相同. 其实, 物体表面自然或人工形成的随机斑点, 包括物理的表面微观结构和光学的表面散斑场, 本身就是信息的载体, 它们在物体变形过程中发生相应的变化, 因而包含了变形过程的大量信息. 传统的光测方法是通过光学干涉形成条纹来提取变形信息, 需要特定的测量环境, 从而难以在工程现场中应用, 而且其应用领域也受到与干涉条纹有关的一系列限制. 如能避开条纹而直接从这些信息载体中提取变形信息, 变形测量同样得以实现. 数字散斑相关方法正是这样一种从物体表面的随机分布的斑点或伪随机分布的人工散斑场中直接提取变形信息的全场、非接触的光测方法.

数字散斑相关方法是在八十年代初由山口一郎^[1]和 Peters, Ranson 等人^[2]同时独立提出的. 前者着重于研究一维变形场的测量, 并进行相应的仪器化工作^[3-5], 而后者则限于对局部变形场的算法进行研究和改进, 并应用于一些实际测量问题

1993-03-18 收到第一稿, 1994-11-03 收到修改稿.

中^[6-8]。本文从图像识别与变分学原理出发,对数字散斑相关方法的原理作出理论阐述,然后应用仿射变换,导出数字散斑相关方法测量一般全场变形的具体算法,表明数字散斑相关方法是根本不同于现有其它光测力学方法的一种全新的变形测量方法,随着现代数字图像处理设备技术水平的提高,可望解决工程实际现场应用与细观力学变形场定量测量两方面的问题。

1 方法的理论描述

1.1 数字散斑相关方法与图像识别

图像识别,简单地说,就是要把一种研究对象根据其某些特性进行识别与分类。图像识别时除了要对图像进行数字化以外,还需将各类图像的重要特性用数字刻划出来,这称为特征提取。由于反映一类图像特性的数目往往是比较多的,因此,实际上在特征提取前先要进行特性选择,即利用图像原来的特性,通过一些方法,找出某些(比原来特性数目要少)综合性指标。接下来就是设计识别方案,使得对任何一个未知类别的图像,根据方案就可以判定它属于哪一类^[9]。

数字散斑相关方法的基本思想与图像识别极其相似。即给定物体变形前后的两个数字散斑场,要求在变形后的散斑场中识别出对应于变形前的散斑场中某一散斑子区(样本)的那个散斑子区。但是,这一过程又与一般的图像识别过程不同。一般的图像识别,它所要识别的对象是由点集构成(以数字形式),它在各种状态下保持不变,或者可忽略其不同状态下自身的变化,这主要是因为在一般的图像识别过程中图像的背景很复杂,无法考虑研究对象的自身变化。但是在变形测量中,图像背景及识别对象比较简单,都是与物体表面的物质点对应的光强分布,这种对应关系可以是照相意义上的物像对应关系,也可以是广义的衍生对应关系,如窄光束照射物面产生的空间散斑场。它们的特征只有一个,就是光强即灰度的分布,因此不必进行通常图像识别过程中要作的特性选择和特征提取,但是要在识别时考虑不同状态下(如外力作用前后)被识别对象自身的变化,也就是说,需要考虑不同状态下研究对象(数字图像)所发生的伸缩、扭曲等变形情况,从而直接与物体的变形联系起来。这种考虑被识别对象在不同状态下的自身变化的图像识别,不妨称之为变形物体的相关识别,以示与一般图像识别的区别。

既然数字散斑相关方法是一种特殊的图像识别——相关识别,那么自然就存在一般图像识别中都存在的识别错误的概率,因而就有可靠性问题,这需要专门的深入研究。

1.2 数字散斑相关方法与力学变分方法

数字散斑相关方法就其实质而言(详述见后)也可看成是一种变分方法,它与弹性力学变分方法可作如下比较:

①相同点:两者的变分函数均为位移,最终结果均为真实位移的逼近。

②相似点:后者使变分泛函——总势能取极小而获得所需结果,而前者则使物体变形前后的数字散斑场之间的相关性取极大而获得所需结果。

③不同点:后者通过本构关系将位移函数直接引入总势能中,总势能成为位移

函数的显式表达式；而前者只能通过对变形后物体所依附的基坐标作仿射变换，将位移间接地引入到相关性中，相关性仅是散斑的数字灰度的显式表达式，因而只是位移函数的隐式表达式。

通过上述比较，可以看出，数字散斑相关方法虽然可看成是一种变分方法，但它的变分函数与变分泛函——相关性之间需通过数字散斑场来沟通，而数字散斑场作为物体变形信息的载体，必须具有统计随机特性，这就决定了不可能直接对相关性与位移之间的关系作一般的变分学分析，来导出一般的显式表达式。

下面我们用弹性力学的有关概念来说明数字散斑相关方法的基本原理。

我们知道，弹性体在承受弹性极限以内的载荷时，产生的变形是弹性变形，即可恢复变形。假如不知道外载的大小，可以通过反向加载（卸载）使物体恢复到原来的自然状态来确定外载的大小，也就是说，物体承受的外载大小等于使物体恢复到自然状态所需的反向加载（卸载）值。数字散斑相关方法的基本思想与上述设想相似，所不同的是上面所说的物体变形被物体的散斑位移场代替，反向加载变为对散斑场作的仿射变换，而判断物体变形后的散斑场经仿射变换恢复到变形前对应的散斑场的相似程度的指标就是散斑场之间的相关性。在仿射变换中，引入试凑散斑位移，使物体变形前的散斑场与变形后的散斑场（经仿射变换）的相关性与散斑位移场联系起来，相关性成为散斑位移函数的一个泛函，而物体的变形量可从散斑位移导出。这样，物体变形的测量变为散斑相关值对试凑散斑位移的数字迭代过程，力学测量问题转化为单纯的数值计算问题，因而可以直接利用电子计算机来进行相关迭代的计算，使力学测量与力学计算在图像相关的基础上得到统一。

2 测量（计算）过程

图 1 是相关分析的系统图。反映物体不同状态的散斑场由光电摄像机摄入，经数字化为数字图像后输入图像处理系统的计算机中进行相关分析。图像系统由监视器与光笔或鼠标器构成人机对话系统，控制相关分析的整个过程。相关分析的结果由打印机输出，同时通过伪彩色编码进行伪彩色显示，以达到输出结果的直观形象性。磁盘存储器用磁盘保存由光电摄像机摄入或由数字扫描仪读入的散斑图以及相关运算所得的结果，以便下次计算时直接调用。显微镜的作用是为了在散斑场的平

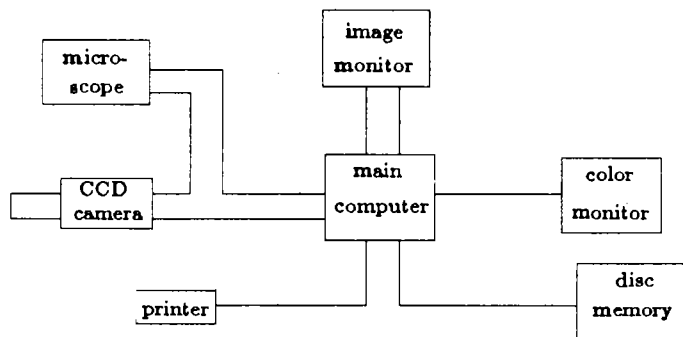


图 1 相关分析系统图

Fig.1 Schematic illustration of digital speckle correlation

均空间频率小于摄像机的空间分辨率(像素)时,把散斑场的平均空间频率放大到与摄像机的空间分辨率相匹配的程度,以便尽可能地减小散斑场在数字化时的失真度.

需要说明的是,这里由光电摄像机或数字化扫描仪输入的散斑场,既可以是通常散斑照相时的散斑场(主观散斑),也可以是相干光照明物体时产生的空间散斑场(客观散斑)还可以是物体表面的人工散斑场(白光散斑),以及流场测量中的示踪粒子轨迹图.从摄入的方式来看,既可以由图像处理系统的成像部分对散斑场成像,也可卸除成像系统后由摄像机的光电敏感元列阵直接记录散斑场.有时为了方便,也可先通过物理处理方法,用感光胶片或全息干板把物体变形前后的散斑场记录下来,然后再通过图像处理系统的成像部分对散斑照片再成像,输入图像系统进行处理,这对现场、动态及细观力学等变形过程的测量尤其重要.

物体变形前后的两个数字散斑场分别为

$$\text{变形前 } \{F_1\} = \{F_1(x_i, y_j); \quad i = 1 \cdots n, j = 1 \cdots n\} \quad (1)$$

$$\text{变形后 } \{F_2\} = \{F_2(x_i, y_j); \quad i = 1 \cdots n, j = 1 \cdots n\} \quad (2)$$

目前的图像系统的扫描线一般为 $n = 512$ 或 1024 .

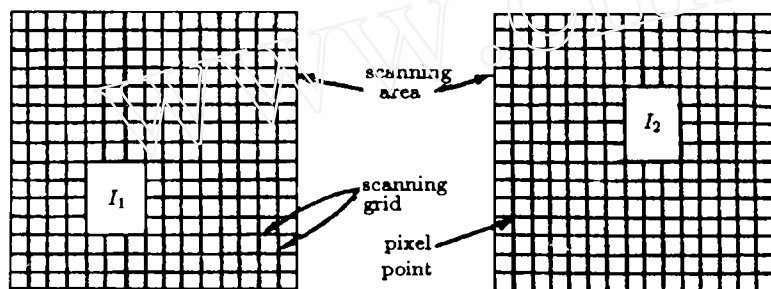


图 2 图像扫描示意图
Fig.2 Scanning grid of digital images

假设散斑位移场为 $u(x, y)$ 与 $v(x, y)$, 则变形前的散斑图上任一点 (x, y) 的灰度与变形后的散斑图上位于 $[x + u(x, y), y + v(x, y)]$ 的灰度相对应, 即

$$I_1(x, y) = I_2[x + u(x, y), y + v(x, y)] \quad (3)$$

对变形后的数字散斑场所依附的基坐标作仿射变换

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - u'(x, y) \\ y' &= y - v'(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

得到新的基坐标 (x', y') , 其中 $u'(x, y), v'(x, y)$ 是试凑散斑位移函数.

通过上述仿射变换, 得到新的数字散斑场

$$\{I_2'(x', y')\} = \{I_2[x + u'(x, y), y + v'(x, y)]\} \quad (5)$$

其中

$$I_2'(x', y') = I_2[x + u'(x, y), y + v'(x, y)] \quad (6)$$

对照 (3) 式, 可得

$$I_2'(x', y') = I_1[x + u'(x, y) - u(x, y), y + v'(x, y) - v(x, y)] \quad (7)$$

上式表明, 当试凑位移函数与真实的散斑位移函数相同时, 经仿射变换得到的数字散斑场完全恢复到物体变形前的数字散斑场. 衡量试凑位移函数与真实的散斑位移函数的接近程度的指标, 就是 $\{I_1\}$ 与 $\{I_2\}$ 之间的相关性

$$C_n = \frac{\langle I_1 * I_2' \rangle - \langle I_1 \rangle * \langle I_2' \rangle}{\{[(I_1 - \langle I_1 \rangle)^2] * [(I_2' - \langle I_2' \rangle)^2]\}^{1/2}} \quad (8)$$

其中 $\langle \rangle$ 是系综平均符. $|C_n| \leq 1$; 当且仅当 $I_1 = I_2'$ 时, $C_n = 1$.

显然, 相关性 C_n 是数字散斑场 $\{I_1\}$ 与 $\{I_2'\}$ 的显式表达式, 试凑位移函数 $u'(x, y), v'(x, y)$ 是通过基坐标的仿射变换隐含地引入到相关性中的.

具体的计算步骤如下: 依次选取一组试凑位移函数 $u'(x, y), v'(x, y)$, 对变形后的数字散斑场通过 (4) 式作仿射变换, 形成新的数字散斑场 $\{I_2'\}$, 然后计算 $\{I_1\}$ 与 $\{I_2'\}$ 之间的相关性. 使相关性取最大值的试凑位移函数就是真实的散斑位移, 顺便指出, 在仿射变换时, 需对离散的数字散斑灰度进行插值.

以上就是数字散斑相关方法测量物体表面变形场的一般过程. 在实际应用时, 一般先在变形前的散斑图上选定一个样本 (散斑子区), 一般是 10×10 像素, 然后在变形后的散斑图上进行搜索, 即选取的试凑位移函数是常数

$$\left. \begin{aligned} u'(x, y) &= u_0 \\ v'(x, y) &= v_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这就是数字散斑相关搜索法^[11], 其结果是对样本的整体位移的逼近. 在此之后, 选取均匀变形

$$u' = u_0 + u_x \cdot x + u_y \cdot y \quad (10)$$

$$v' = v_0 + v_x \cdot x + v_y \cdot y \quad (11)$$

然后在前面相关搜索的基础上进行精细相关运算, 直接得到散斑样本的位移梯度项. 但由于目前图像处理系统的图像分辨率较低, 一般为 512×512 像素, 256 级灰度, 因此这样直接算出的位移梯度的灵敏度较低, 一般为 1-2% ($10000-20000 \mu\epsilon$), 这对一般的变形测量是不适应的. 如果由位移差分来求应变, 则对于 512×512 像素分辨率的图像场, 理想可测的最小应变为 $0.02-0.1/512=40-200 \mu\epsilon$, 这里假定最小可测的散斑位移为 0.02-0.1 像素^[2].

3 应用实例

3.1 漩涡流场测量

图 3 是用电视摄像机直接记录水流绕圆柱体产生的漩涡散斑场系列照片之一,

扫描速度为每帧 1/30 秒. 对散斑图中的漩涡用数字散斑相关方法进行测量, 得到的流形图如图 4 所示, 图 5 是其等速线图.

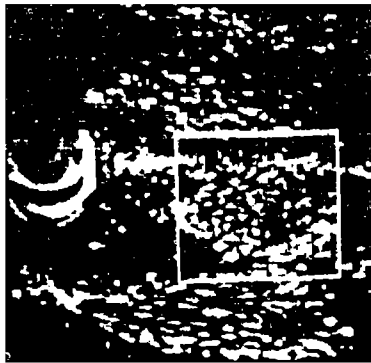


图 3 圆柱绕流的示踪粒子图
Fig.3 Particle image behind a column

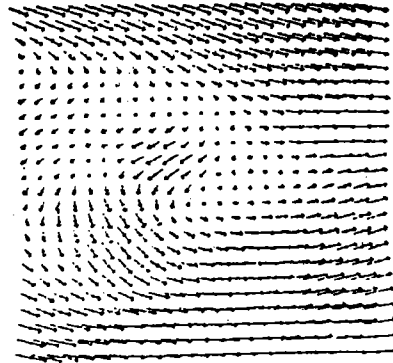


图 4 漩涡流形图
Fig.4 Flow pattern of a vortex

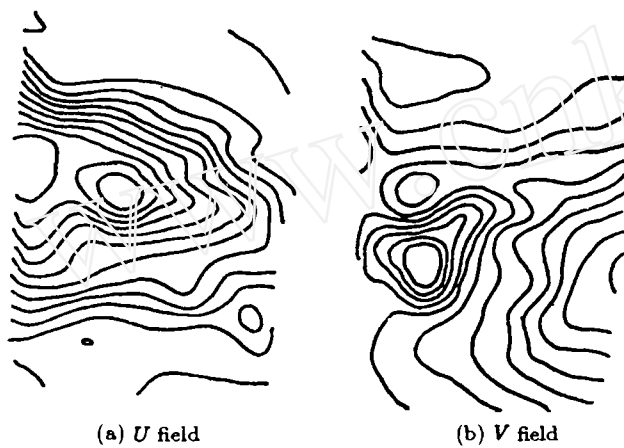


图 5 漩涡场等速线图
Fig.5 Iso-velocity map of a vortex

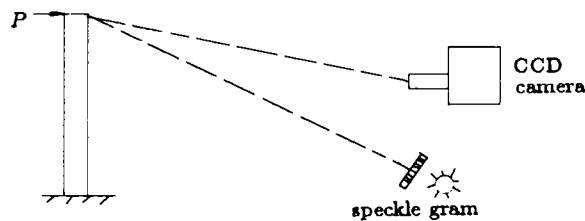


图 6 投影散斑记录装置
Fig.6 Setup for shadow speckle recording

3.2 离面变形场测量

我们采用如图 6 所示的投影散斑记录装置将悬臂梁的离面变形场转化为散斑的面内变形场, 然后用数字散斑相关方法进行测量计算, 最后得到的悬臂梁的挠度曲率和斜率曲线分别如图 7 和图 8 所示. 位移测量非常精确, 平均相对误差小于 1%, 斜率测量值误差稍大, 但仍是令人满意的.

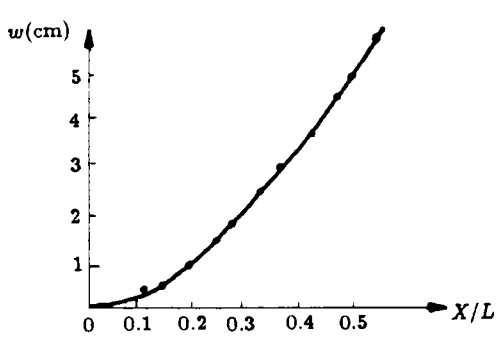


图7 梁的挠度曲线
Fig.7 Deflection curve of a beam

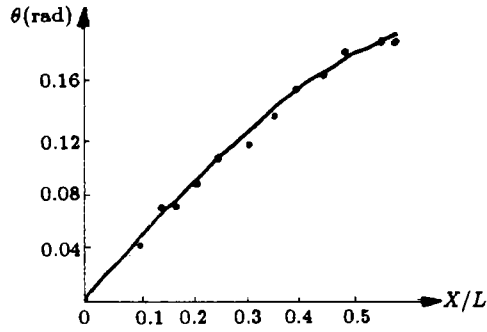


图8 梁的斜率曲线
Fig.8 Slope curve of a beam

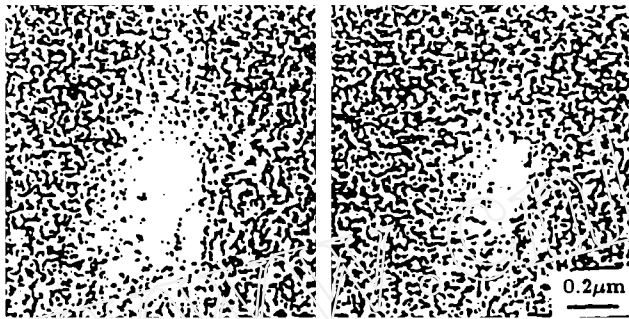


图9 扫描电镜照片
Fig.9 SEM photographs at different state

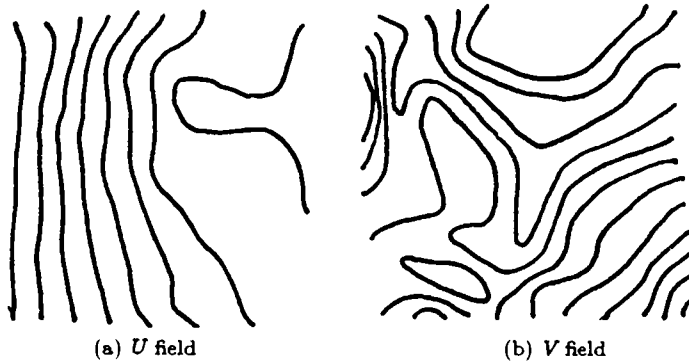


图10 等位移场
Fig.10 Iso-displacement map

3.3 扫描电镜照片变形场测量

图9是在研究铝镁合金高温氧化时拍摄的两个相邻状态的扫描电镜照片,来源于文献[13],放大倍数为50000倍.从图中可以看出,显微照片与固体变形测量中的激光散斑很相似,因而用数字散斑相关方法来测量其位移场是非常合适的.

图10是用数字散斑相关方法测到的位移等值线图.由于测到的首先是离散的位移数据,等值线都是在对这些离散数据进行连续化等再处理后得到的,因而等值线的疏密完全可调.

4 结 论

本文从图像识别原理和变分原理出发,对数字散斑相关方法作了新的理论阐述,指出数字散斑相关方法是一种直接测量两幅散斑图之间几何差别的方法,它把力学中的变形测量问题转化为单纯的数值计算问题,避免了传统光测方法与干涉条纹相联系的一系列困难.由于其记录方式与光路要求极其简单,因而除了能对一般的变形问题进行测量外,还能应用于工程实际现场的变形测量与监测.而最为重要的应用领域,当属高速冲击等动态过程和细观力学变形场这类其它光测方法目前还不易甚至不能解决的定量测试分析.结合电子计算机进行后续数据处理,可望发展出一整套从原始数据(散斑场)的采集到最终所需结果的形象化显示与输出的完整的自动测量系统.

参 考 文 献

- 1 Yamaguchi I. *Opt Acta*, 1981, 28(10): 1359-1376
- 2 Peters WH, Ranson WF. *Opt Eng*, 1982, 21(3): 427-431
- 3 Yamaguchi I. *Opt Eng*, 1982, 21(3): 436-440
- 4 Yamaguchi I. *Opt Eng*, 1986, 25(5): 671-676
- 5 Yamaguchi I. *Opt Eng*, 1988, 27(3): 214-218
- 6 He ZH, Sutton MA, Ranson WF and Peters WH. *Exp Mech*, 1984, 24(2): 117-121
- 7 Chu TC, Ranson WF, Sutton MA, Peters WH. *Exp Mech*, 1985, 25(3): 232-244
- 8 Metalli SM, Ragab AR, Kamei AH, Abdul Saheb A. *Exp Mech*, 1987, 27(3): 414-442
- 9 程德明等. 图像识别导论. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- 10 徐芝纶. 弹性力学. 北京: 人民教育出版社, 1979
- 11 高建新, 周辛庚. 变形测量中的数字散斑相关搜索法. *实验力学*, 1991, 6(4)
- 12 Tian Q, Huhns MN. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 35: 220-233
- 13 Field DJ, Scamans GM, Butler EP, *Metall Trans A*. 1987, 18(3)

PRINCIPLE AND APPLICATIONS OF DIGITAL SPECKLE CORRELATION METHOD

Gao Jianxin

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Zhou Xingeng

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract This paper presents theoretical description for digital speckle correlation method which is based on variational and image recognition principle. The problem of deformation measurement is then converted into a pure numerical computation, in which the difficulties due to interferometric fringes in conventional optical methods can be avoided. Primary experiments indicated that the method can be applied in engineering environments, and is capable of measuring deformations quantitatively in high speed dynamic process and micromechanics.

Key words digital speckle, correlation, experimental mechanics, micromechanics