

文章编号 1004-924X(2011)07-1480-06

数字散斑相关法在变形测量中的应用

陈志新^{1,2}, 梁 晋¹, 郭 成^{1*}

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 东华理工大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了克服传统的变形测量方法的局限性, 实现整体变形和测量范围内各点在一时刻具体位移的全面测量, 以得到完整的变形数据, 本文采用数字相关散斑法(DSCM)对变形进行了精确测量。首先, 通过与传统变形测量方法进行比较, 归纳出 DSCM 具有非接触、精度高、操作简单灵活、测量全面等优点。然后, 描述了散斑法的基本理论, 建立了相关的数学模型, 并根据相关理论开发了相应的测量分析软件 XJTUDIC。利用该软件结合相应的硬件设备, 对具体的拉伸变形过程进行了测量试验, 并将结果与使用引伸计的传统测量方法进行了比较。得到的结果显示两种测量方法的误差在 $\pm 0.2\%$ 之内, 验证了该方法及相应软件和硬件的可靠性及可行性, 为变形的全面精确测量提供了一种有效的工具。

关键词: 数字散斑相关法; 变形测量; XJTUDIC

中图分类号: TH823; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1480

Application of digital speckle correlation method to deformation measurement

CHEN Zhi-xin^{1,2}, LIANG Jin¹, GUO Cheng^{1*}

(1. *Mechanical Engineer College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

2. Mechanical & Electrical Engineering Department,

East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

** Corresponding author, E-mail: gch@mail.xjtu.edu.cn*

Abstract: To overcome the limitations of traditional deformation measurement methods and complete the comprehensive measurements of the general deformation and the various point displacements within a measurement scope in any time, the Digital Speckle Correlation Method(DSCM) was used in accurate deformation measurement. Firstly, by comparison with traditional methods, it summarized the advantages of the method in non-contact, high precision, simple and flexible operation, overall measuring and so on. And then the principles of the DSCM were elaborated on the five aspects, the relevant mathematical models were established and the corresponding measurement and analysis software XJTUDIC was developed. By using this software with the relevant hardware devices, a tensile deformation process was tested and obtained results were compared with that of traditional measurement method using an extensometer. Obtained results indicate that the error is within 0.2% , which fully

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975219); 苏州市应用基础研究计划(工业部分)资助项目(No. SYG201014)

validates that the method and corresponding software and hardware are reliability and feasibility and it provides an effective and reliable tool for the precise and comprehensive deformation measurement.

Key words: Digital Speckle Correlation Method(DSCM); deformation measurement; XJTIDIC

1 引言

变形及应变测量的应用相当广泛,在力学研究中该项测量尤为重要。目前成熟的测量方法很多,但主要分为阻抗式传感器测量和光学测量两种方式。由于现有的测量方法均有较大的局限性,新的改进和提高该项测量技术的方法仍很受关注。

数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)是一种光学测量方法,是由日本的山口一郎和美国 South Carolina 大学的 W. H. Peters 和 W. F. Ranson 等人在 20 世纪 80 年代提出的^[1]。DSCM 是对变形前后采集的物体表面的两幅图像(散斑场)进行处理,通过计算来实现对物体变形场(位移场)的测量。将数字散斑相关方法应用到变形及应变的测量中具有其独特优势,弥补了当前变形测量方法的不足,特别适合于移动或变形物体的运动或变形信息的测量^[2],并且随着图像处理技术、计算机技术、信号处理技术以及图像采集设备的发展,DSCM 可在测量领域发挥更大的作用。国外已经将该技术较好地应用于测量的很多方面,如美国的 CSI 公司,丹麦的 Dantec Dynamics 公司。国内许多学者对散斑方法的基础理论方面有了较深的研究,如清华大学金观昌教授等,但尚未进行系统研究后的产品开发。

随着对位移和变形测量的要求不断提高,将散斑理论用于实际,得到一种全新的测量工具对提高位移和变形的测量水平很有意义。本研究就是在系统研究散斑理论的基础上,研发出了一种新的变形和应变测量工具,并验证了其性能和数据可靠性,本研究的意义在于将先进的基础理论系统化,实用化,产品化。

2 DSCM 测量方法的特点

传统的变形或位移测量多用阻抗式传感器测量,例如引伸计和线性位移传感器 LVDT 等,相对阻抗式传感器,基于数字散斑相关技术的变形测量方法表现出巨大的技术优势:

1) 非接触测量

不需要应变计及繁复线路,不需要为获得完整结果而做精准设置,样品没有机械力交互作用,可在几分钟内准备完成,也不会受到夹片、应变规及化学涂布的影响。

2) 全场测量

能测量整场区域各点变形,并不局限在单点量测,即使对复杂结构或是复杂荷重情形,都可以较容易地寻找到临界破坏点。

3) 实时测量

可以测量变形过程中任意时刻的变形量或位移量。

4) 测量到的数据准确度高,不需要长时间等待分析,操作简单便利。

5) 针对振动物体、高速物体及微小物体的变形可以特殊配备分析模块,以完成测量任务。

现代光测力学的研究和发展提供了多种测试方法,如光贴片法、云纹法、云纹干涉法、全息干涉法和散斑干涉法等,但是,这些方法各有优点和不足。分析和研究表明,光贴片法和云纹法是较为成熟和有效的方法,但灵敏度不够理想,尤其是光贴片法的强制效应不可忽视。云纹干涉法具有很高的灵敏度,但实验费用和技术要求是较高的。至于全息干涉法,虽然灵敏度高且非接触,但用来测量离面位移最为有效,因此其实用价值受到一定限制^[3-4]。

根据比较,本研究采用散斑干涉法来进行变形的测量,并通过实验表明,它是一种较为理想的光学测量方法。

3 DSCM 的技术理论

完整的 DSCM 理论体系主要包括以下几个重要方面:用何种位移表征模式来描述一个区域的变形,确定相关运动参数;建立合适的目标函数;采用优化的搜索方法;为提高精度进行亚像素求解;通过相关计算得到变形或位移场的有效数据^[5]。

$$\begin{cases} x^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \Delta y \\ y^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \Delta y \end{cases}, \quad (1)$$

由图 1 经推导计算可得式 1(各参数含义表

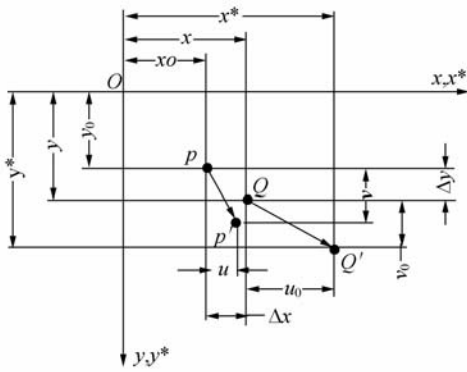


图 1 散斑子区域内变形(位移)

Fig. 1 Speckle deformation (displacement) in sub-region

示见图),式(1)表明,样本子区的位移和变形可以用其中心点的位移 u, v 和它们的 4 个偏导数 $\frac{\partial u}{\partial x},$

$\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 来表示。也就是说,子区中心点的位移和它的 4 个偏导数完全可以用来描述物体的面内变形。目前用来比较精确描述 DSCM 位移表征模式的是区域变形模式,基本形式可用式(2)表示^[6]:

$$\mathbf{d}(x; a) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{111} & a_{112} & a_{11n} \\ a_{211} & a_{212} & a_{222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\Delta x)^2 \\ \Delta x \Delta y \\ (\Delta y)^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

用 DSCM 方法处理数字散斑图时,为了判断所找到的目标子区与样本子区是否相对应,必须

用数学手段建立一个衡量图像相似过程的标准。由于相关系数是两个变量之间相互关系的定量描述,因此,这个标准可以用样本子区与目标子区的相关系数(Distribution of Correlation Coefficient, DCC)来表示^[7],定义图像的相关系数为

$$DCC = \frac{\left\{ \sum \sum [(f - \bar{f})(g - \bar{g})] \right\}^2}{\sum \sum (f - \bar{f})^2 \sum \sum (g - \bar{g})^2}, \quad (3)$$

其中 $f = f(i, j), g = (i + u, j + u)$ 分别是以源点和目标点为中心的散斑图的灰度值。

DSCM 中使用的搜索方法有:三步法,爬山法,十字搜索法,分级搜索和 Newton-Rephson 方法等^[8]。

DSCM 亚像素位移求解是提高数字相关技术精度的主要手段,基本的方法是插值和拟合。主要包括:像素灰度插值,相关系数多项式插值,对相关系数取自然对数后插值,多项式拟合,基于梯度的计算方法等^[9]。

DSCM 变形或应变计算的关键问题是从含噪声的位移场如何得到平滑的估计变形或位移场。因此,采用何种方法及假设对含噪声的位移场进行平滑便是极为重要的问题。采用的方法有分区最小二乘拟合方法、分段最小二乘拟合方法、广义交互验证方法(Generalized Cross Validation, GCV)^[10]等。

可以采用有限元平滑技术,使位移场转换成应变场来减小误差。有限元平滑就是要得到一个平滑函数,使下面函数值最小化:

$$R(d) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^J (d_i - \hat{d}_i)^2 + \frac{\lambda}{2} \iint_A \left(\left(\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 d}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 d}{\partial x \partial y} \right) \right) dA, \quad (4)$$

式(4)中,用 \hat{d} 统一表示通过 DSCM 方法获得受噪声污染的变形或位移实验数据 u 或 v, d 表示待求的平滑位移。 J 表示实验数据的总点数, λ 为平滑参数, \hat{d}_i 表示所求第 $i(u$ 或 $v)$ 个实验数据点处的位移分量, d_i 表示对应于实验值为 \hat{d}_i 的第 $i(u$ 或 $v)$ 个数据点处的光滑函数 d 的值, A 表示包含所有实验数据点的最小区域,这个区域一般是矩形区域^[11]。

4 软件及系统

根据上述基本理论,采用 DSCM 方法,开发

了 XJTUDIC 三维数字散斑变形测量分析系统。其中通过双目立体视觉技术采集数据,即通过两个高速摄像机,实时采集物体各个变形阶段的散斑图像,利用图形相关算法进行物体表面变形点的立体匹配,并重建出匹配点的三维空间坐标。然后对位移或变形场数据进行平滑处理和变形信息的可视化分析,从而实现快速、高精度、实时、非接触式的变形或应变测量^[12]。

整个系统具体包括 2 个分辨率为 1280 × 960pixel 的工业 CCD 摄像机 MVVD078SM,1 个 LED 光源,1 台高性能计算机,三维数字散斑变形测量分析系统控制和数据处理软件,三角架及其它辅助器件。

整个开发的系统技术路线如图 2:

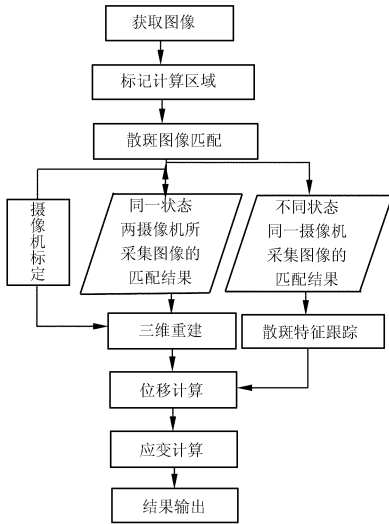


图 2 DSCM 技术路线图

Fig. 2 Roadmap of DSCM technology

5 实验及验证过程

用 XJTUDIC 系统测试拉伸试验中试件各点的精确变形情况,并采用引伸计进行数据验证,证明了该测量系统的准确性、可行性、可靠性。

(1)用线切割按标准加工出试件,材料为 Q235 钢,厚度为 2 mm。

(2)散斑制作,随机喷漆在试件上制作图案(散斑),使数据采集效果更好。

(3)在拉伸机上先装夹试件,再在试件上固定引伸计。

(4)安装测量设备并对其进行调整,打开光

源,进行摄像机标定,视场 128 mm × 96 mm。

(5)布置其它测量设备,测量距离为 300 mm,并保证被测试件在整个测量过程中都不超出视场。如图 3 所示。



图 3 试件加上引伸计且布置好光学测量设备

Fig. 3 Specimen added extensometer and finished optical measuring equipment

(6)启动拉伸机拉伸试件,拉伸速度为 6 mm/min,引伸计同时开始工作。

(7)同时开启相机进行图像采集,采集速度为 2 frame/s。

(8)由于引伸计测量距离的限制,试件最大拉伸距离为 5 mm,达到此距离后拉伸自动停止。

(9)数据采集完毕,进行图像数据处理,利用上述原理开发的软件处理数据,可得到被测试件表面轮廓各点变形量。如图 4 所示

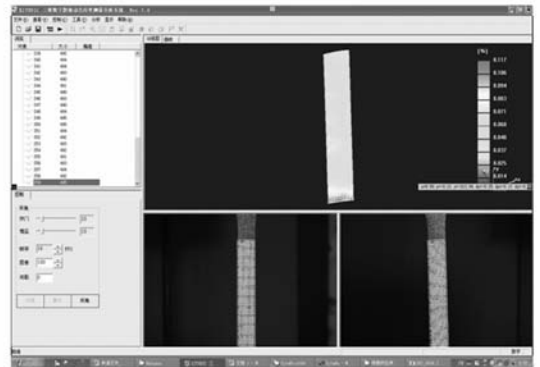


图 4 试件选取范围内各点的变形量

Fig. 4 Every point deformation value in selected scope of specimen

(10)将引伸计测得数据与光学测量数据进行对比。由于所用引伸计测量距离为 5 mm,因此比较的范围也为 5 mm。结果显示两者误差很小,这是因为两种方法都是精确测量方法,误差都

可控制在很小的范围内,实验数据计算得两种方法测量的相对误差在 $\pm 0.2\%$ 之内,如图 5 所示。

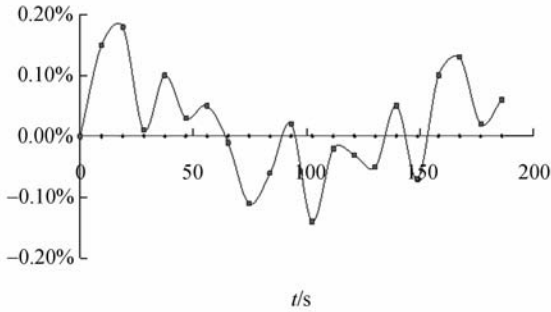


图 5 两种测量方法得到的数据对比

Fig. 5 Comparison of two kinds of measurement data

(11)用该测量手段对焊接过程进行材料的变形测量,得到的结果如图 6 所示,图中显示了各点在整个焊接过程中的变形规律,得到了各点在焊接过程中任意时刻的变形量。

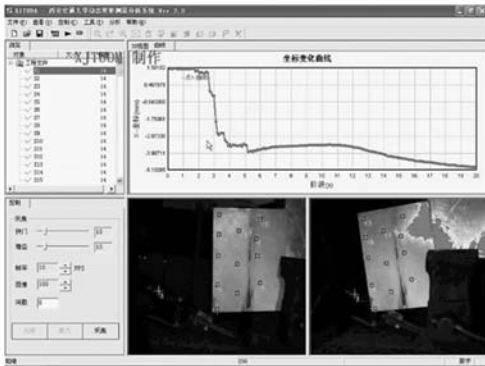


图 6 焊接过程中的变形测量

Fig. 6 Deformation measurement in welding process

参考文献:

- [1] PETERS W H, RANSON W F, SUTTON M A, *et al.*. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. *Opt. Eng.*, 1983, 22(6): 738-742.
- [2] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京:清华大学出版社, 2007. 9.
JIN G CH. *Computer-aided Optical Measurement* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 9. (in Chinese)
- [3] VENDROUX G, KNUASS W G. Submicron deformation field measurements; part III. demonstration of deformation determination[J]. *EXP. Mech.*,

6 结 论

本文采用 DSCM 技术对变形进行了测量。实验结果表明采用该方法进行变形测量是行之有效的,结果与高精度引伸计得到的结果的测量误差很小,在 $\pm 0.2\%$ 之内。分析造成误差的原因主要有(1)引伸计本身的测量误差;(2)由测量系统硬件配置引起的误差;(3)由与测量系统的像机参数校准、特征定位、对应匹配及运动测量等算法有关的因素造成的误差,其中后者是散斑测量系统测量误差的主要来源。

从最后结果可见所采用的相关原理是合适可行的,开发出的软件也是可靠的,显然该设备有非接触、精度较高、操作简单灵活、测量全面等诸多优点。同时由于该数据采集是用双目立体视觉技术,可以得到三维的位置数据,即可以在三维空间范围内测量变形,准确得到现实中复杂变形的变形量。DSCM 具有很多优点,但由于各种原因,目前在测量速度及测量精度方面仍不能完全满足当今高速高效高精度的工程测量要求,需要在硬件和软件方面都不断地提高和完善,进行更加深入的应用研究。

1998. 38:154-160.

- [4] YAO X F, MENG L B, JIN G C. Full-field deformation measurement of fiber composite pressure vessel using digital speckle correlation method[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(2): 245-251.
- [5] SÁNCHEZ-ARÉVALO F M, GARCÍA-FERNÁNDEZ T, PULOS G, *et al.*. Use of digital speckle pattern correlation for strain measurements in a CuAlBe shape memory alloy[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(8): 775-782.
- [6] 陈俊达. 数字散斑相关方法理论和应用研究[D]. 北京:清华大学, 2007.
CHEN J D. *Studies on Theory and Application of Digital Speckle Correlation Method* [D]. Beijing:

Tsinghua university, 2007. (in Chinese)

- [7] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学发展, 2005, 35(2): 195-203.
WANG H W, KANG Y L, XIE H P, Advance in digital speckle correlation method and its application [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(2): 195-203. (in Chinese)
- [8] 潘兵, 续伯钦, 谢惠民, 等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 643-647.
PAN B, XU B Q, XIE H M, *et al.*. In-plane displacement measurement by gradient-based digital image correlation[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 643-647. (in Chinese)
- [9] 韩建栋, 吕乃光, 王锋, 等. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 45-51.
HAN J D, LÜ N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 45-51. (in Chinese)

- [10] 陈华. 基于数字散斑相关方法的视觉变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
CHEN H. *Study of Vision Deformation Measurement Technologies Based on Digital Speckle Correlation Method* [D]. Beijing: Tsinghua university, 2008. (in Chinese)
- [11] 李建荣, 高慧斌, 王志乾, 等. 光电测量设备的实时调平补偿方案[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1543-1547.
LI J R, GAO H B, WANG ZH Q *et al.*. Real-time compensative leveling in photoelectric measuring equipment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1543-1547. (in Chinese)
- [12] 姜伟伟, 高云国, 冯栋彦, 等. 大型光电设备基准平面自动调平系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1309-1045.
JIANG W W, GAO Y G, FENG D Y, *et al.*. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1309-1045. (in Chinese)

作者简介:



陈志新(1973—), 男, 湖南益阳人, 博士研究生, 讲师, 2004年于昆明理工大学获硕士学位, 主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM, 复层材料的力学分析, 三维测量技术等。E-mail: czx-chen2008@sina.com



梁晋(1968—), 男, 河南郑州人, 教授, 博士, 博士生导师, 于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位, 现任西安交通大学机械工程学院模具研究所副所长, 主要研究方向为计算机应用, 测量技术等。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

导师简介:



郭成(1949—), 男, 山东潍县人, 教授, 博士, 博士生导师, 于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位, 现任西安交通大学机械工程学院模具研究所所长, 主要研究方向为模具CAD/CAE, 先进材料的力学分析等。E-mail: gch@mail.xjtu.edu.cn