

数字散斑相关方法及应用进展

王永红^{1*}, 梁恒¹, 王硕¹, 张浩¹, 杨连祥^{1,2}
(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电学院, 安徽 合肥 230009;
2. 美国奥克兰大学 机械工程系, 密歇根 罗切斯特 48309)

摘要:数字散斑相关方法(DSCM)是一种可以测量变形和应变的光学非接触测量方法,其通过对变形前后物体表面的图像进行灰度信息相关计算来获取被测物的力学性能。本文叙述了数字散斑相关方法近年来在国内外的应用现状,详细论述了基于自适应遗传算法、智能神经网络方法、小波变换法的一系列新型相关搜索方法。文章指出,近年来,数字散斑相关技术已发展到相对成熟,目前的研究重点是提高测试精度和图像处理速度,而提高散斑图像质量和研究高效的算法是需要努力的方向。

关键词:数字散斑相关;相关搜索;精度;效率

中图分类号:0436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130604.0470

Advance in digital speckle correlation method and its applications

WANG Yong-hong^{1*}, LIANG Heng¹, WANG Shuo¹, ZHANG Hao¹, YANG Lian-xiang^{1,2}
(1. *School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*
2. *Department Mechanical Engineering Oakland University, Rochester, Michigan, USA 48309*)
* *Corresponding author, E-mail: yhwang@hfut.edu.cn*

Abstract: Digital speckle correlation (DSCM) is a noncontact measuring method for displacements and strains, which obtains the mechanical properties of an object by calculating the gray information correlation of the object images before and after deformations. The method has been applied successfully in mechanical measurements in the past twenty years. This paper introduces the developing states of the DSCM and gives application examples. Some new technologies involved in the DSCM are reviewed, such as genetic algorithm, neural networks and wavelet transform. Finally, it points out that DSCM research will focus on improving measuring accuracy and image processing speeds in the future, including improving speckle image quality and researching higher effective algorithms.

Key words: digital speckle correlation; search algorithm; accuracy; efficiency

收稿日期:2013-04-13;修订日期:2013-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075116);安徽省国际科技合作计划资助项目(No. 12030603012);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2011JYLH1150)

1 引言

数字散斑相关方法(DSCM)是一种可以测量变形和应变的光学非接触测量方法,其通过计算变形前后物体表面图像的灰度信息相关来获取被测物的力学性能。上世纪80年代,人们在激光散斑相关性分析的基础上提出了DSCM,经过不断深入的研究发展,目前该技术在各领域的应用已经日臻成熟。同实验力学中的其它方法相比较,该方法具有测量光路相对简单、测量环境要求低、非接触测量等优点。基于以上优点,该方法在材料力学的性能测量研究中具有非常重要的意义。数字散斑相关技术的测量过程是记录物体变形过程的散斑图,通过结合高速视频记录或高速摄影系统来采集变形过程连续序列图像信息,即可实现动态实时的测量。

近年来,国内外研究人员围绕数字散斑相关做了大量研究工作,针对如何提高测试精度和图像处理速度两个目标,提出了一系列搜索算法、亚像素算法、系统误差分析和应变场求取等理论和技术。目前,DSCM的研究主要集中在应用研究领域,并以提高精度和速度两个指标为重点。本文介绍新型相关搜索方法以及国内外数字图像相关技术在各个领域的研究进展。

2 相关搜索方法

自上世纪80年代初,I. Yamaguch 和 W. H. Peters、W. F. Ranson 等人^[1-3]提出DSCM以来,经过众多的国内外学者不断的深入探讨,该方法已日趋成熟。伴随着如何提高测量结果的精度和计算速度的众多研究,大量新的相关搜索算法随之产生,基于经典数学理论产生的相关搜索算法有双参数法^[4]、粗细搜索^[4-5]、十字搜索^[6]、牛顿拉斐逊偏微分修正法^[4,7]、爬山搜索法^[4,8]等。现代数学理论的发展也有助于改善数字散斑相关的主要问题,现代数学理论逐渐的引入,即可形成新的搜索算法,如频域FFT方法^[9-10]、自适应遗传算法^[11-17]、智能神经网络^[18-20]、滤波、降噪效果较好

的小波变换^[21-24]等,位移映射方法也从传统的一阶映射变成二阶位移映射^[25]。新算法的产生使得数字散斑相关发展有着质的飞跃,因为其中有的算法对于速度和精度有着数量级的提高。

2.1 基于遗传算法的相关搜索

遗传算法开创性的提出者是美国密西根大学的John Holland教授,以后经过后人不断深入和丰富的研究,其应用研究更为广泛和完善^[26-28]。遗传算法是借鉴生物的自然选择和遗传进化机制而开发的一种全自适应概率搜索算法。遗传算法是将问题的求解表示成“染色体”,从中选择出适应环境的“染色体”进行复制,通过交叉、变异两种基因操作产生出新一代更适合环境的“染色体”群,这样一代代不断改进,最后收敛到一个最适合环境的个体上,从而求得问题的最佳解^[26-28]。

数字散斑相关变形分析中要求解的就是物体表面的变形,变形可以用下面的向量 S 来表示:

$$S = [u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}]. \quad (1)$$

遗传算法首先对参数进行编码处理,把问题空间的参数转换成遗传空间中,并由基因按一定结构组成的染色体。初始种群生成后,直接采用相关系数的函数作为适用度函数:

$$f(s) = \frac{\sum \sum [(f - \bar{f})(g - \bar{g})]}{\sqrt{\sum \sum (f - \bar{f})^2} \times \sqrt{\sum \sum (g - \bar{g})^2}}. \quad (2)$$

遗传算法的核心就是遗传操作,包括3个运算:选择运算、交叉运算、变异运算。遗传操作对个体根据适应度进行优胜劣汰,也进行相互配对的染色体相互交换部分基因,同时替换染色体中的某些基因形成新的基因。当适应度接近1或者达到最大进化世代数,则终止迭代操作^[29]。

国内外将遗传算法引入数字散斑相关,并取得了相应的成果。2000年,美国南伊利诺伊斯大学的Mahajan Ajay将遗传算法应用于数字图像相关来估计物体表面的位移及应变^[11]。2003年,马少鹏和金观昌采用遗传算法进行相关运算,克服了传统方法需要合理的初值和图像导数信息的缺点^[12]。2004年,天津大学的王怀文和亢一澜

结合数字散斑相关和遗传算法建立了一种自适应数字散斑相关方法,并用来做铜箔断裂力学实验和尺寸效应的研究^[13]。2005年,天津大学的唐晨在传统灰度散斑图像相关基础上提出了彩色散斑图像相关的遗传算法,针对RGB色彩空间定量分析彩色图像相似程度^[14]。2007年,哈尔滨工业大学的陈华将遗传算法应用于三维数字散斑相关,减少了计算复杂度并提高了搜索质量^[15]。2008年,台湾雲林科技大学的Hwang SF将模拟退火和自适应机制添加到遗传算法中,利用数字散斑相关方法计算SU-8光刻胶的应力应变^[16]。2011年,Zhang T克服了传统的遗传算法的过早收敛的缺点,采用多父体杂交和自适应变异概率的遗传操作对复合板的变形进行测量,验证了时间效率有所提升^[17]。

在数字散斑相关的搜索中采用遗传算法避免阈值和合理初值的选择,减少计算量以及求解的复杂程度,同时与传统的搜索方法(如爬山法)相比精度有所改善,搜索速度有很大的提高。

2.2 基于智能神经网络的相关搜索

1943年,心理学家W. S. McCulloch和数理逻辑学家W. Pitts建立了神经网络和数学模型,由此提出人工神经网络^[30]。经过近70年发展,神经网络算法已经被应用到各个领域,以此对问题进行优化处理,数字散斑相关也逐渐引入人工神经网络。

人工神经网络通过预先提供一批输入和输出数据,通过神经网络的学习,掌握其中的潜在规律,利用这些规律计算后面输入数据的结果^[30]。对于数字散斑相关技术,先在散斑图上取网格点,计算出这些网格点的相关点,利用这些预先算出的输入输出结果通过人工神经网络掌握其中相关的规律,再将全场的散斑图作为输入就可以较快地计算全场位移场^[19]。

2001年,Mark. C. Pitter等人运用人工神经网络搜索亚像素位移,位移精度达到了0.03 pixel^[18]。2009年,天津大学的唐晨和常一鸣在梁的三点弯曲实验的散斑图中,利用数字散斑图像相关法计算均匀分布在梁表面中心矩形区域的点的位移作为样本来训练神经网络,利用神经网络计

算该中心区域的位移场^[19]。2010年,吉林大学的Xiaoyong Liu和Qingchang Tan利用傅里叶变换和人工神经网络进行亚像素搜索,得到精度与其他搜索算法精度相当,但速度有很大提高^[20]。

人工神经网络通过采集训练样本,集中训练,用神经网络计算大大提高计算效率,并不需要再对位移场进行平滑处理。由于算法具有较强的自适应性、学习能力和大规模并行计算能力,使得该算法稳定性较好,精度较高。该算法的缺点是计算的结果受网络参数选择影响较大。

2.3 基于小波变换的相关搜索

1989年,Mallat巧妙地将计算机视觉领域的多尺度分析思想引入到小波函数的构造以及信号的小波分解与重构中,形成了利用小波进行多分辨率图像分解^[31]。小波具有去噪的优势使得其对数字散斑相关有很大的作用^[32]。

图像信号可以表示为一个 $L^2(R^2)$ 空间的函数 $f(x)$,其在正方块二维正交小波基下的展开式如下:

$$A_{2i}f = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\phi_{j,m}(x)\phi_{j,n}(y)} dx dy, \quad (3)$$

$$H_{2i}f = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\varphi_{j,m}(x)\phi_{j,n}(y)} dx dy, \quad (4)$$

$$V_{2i}f = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\phi_{j,m}(x)\varphi_{j,n}(y)} dx dy, \quad (5)$$

$$D_{2i}f = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\varphi_{j,m}(x)\varphi_{j,n}(y)} dx dy, \quad (6)$$

式中: j 表示尺度; $H_{2i}f, V_{2i}f, D_{2i}f$ 为分别对应于小波空间 W_j^1, W_j^2, W_j^3 的小波展开系数; $A_{2i}f$ 为对应于尺度空间 V_j 的尺度展开式系数。按照二维正交小波基对原图像和目标图像进行多级分级,对于分级后的图像进行平滑滤波等,滤波后再对图像进行相关搜索。对得到的分解后概貌图进行相关计算,下一级的图像搜索得到的位移结果要乘2处理才可返回到上一级图像进行小范围的搜索^[22]。

2002年,天津大学的唐晨和李鸿琦等人基于小波多分辨率分析,对DSCM获得的位移场进行平滑处理,将含噪声的位移场进行小波分解,获得了在不同尺度上的小波系数;根据位移和噪声在频率上的区别,消除属于噪声的小波系数,从而实现噪声滤除^[21]。2003年,清华大学的简龙晖和

马少鹏等人利用二维离散正交小波技术对图像滤波去噪的同时进行多级分解,从最低的一级开始进行相关搜索计算,然后逐级回溯^[22]。2003年,清华大学简龙晖和林碧森等人提出了基于小波变换的DSCM,精度由0.05 pixel提高到了0.01 pixel以下,并利用该方法测量了编织结构复合材料板在三点弯曲载荷作用下的位移场^[23]。2007年,中国科学院的李新忠等人提出了一种基于多尺度小波降噪的数字散斑相关搜索方法,对散斑位移图像进行多级小波分解,采用不同的降噪策略处理后再进行相关搜索,其测量精度提高了一个数量级,相对误差可以控制在1%以内;同时,其计算效率提高了1倍^[24]。

小波理论的引入使数字散斑相关技术的精度和速度有了数量级的提高,由于小波本身在图像去噪方面的优势,使得数字散斑相关应用范围有所扩大,例如可以测得大位移和含噪声的图像相关位移场。所以,随着小波理论研究的不断深入,小波分析在数字散斑相关领域会有更加重要的意义。

2.4 其他的相关搜索算法

2009年,天津大学的唐晨将粒子群算法引入DSCM,并且通过模拟散斑图测试刚体位移和旋转位移场,并进行单向拉伸试验验证了算法稳定性、可靠性^[19]。2012年,辽宁工程技术大学的杜亚志和王学滨观察数字散斑相关运算中粒子运动轨迹,并研究样本子区尺寸、粒子数、粒子飞行的最大速度和最大迭代次数对计算时间的影响。由于粒子群理论的研究不断引入,从而形成了基于粒子群的相关搜索算法^[33]。

相关搜索不仅是在空间域中,而且也可以在频率域中进行,也就频域FFT方法。2000年,山东工业大学的周灿林在频率域对物体变形前后散斑图对应的子区域进行相关搜索,完成了测量物体的变形位移,避免了反复相关搜索,从而可快速提取信息^[9]。2011年,俄罗斯萨拉托夫州立大学的Anton A. Grebenyuk利用快速傅里叶变换进行数字散斑相关计算,可以计算大位移场且在保留空间域的准确性同时节省了计算时间^[10]。

除了以上提出新型的搜索算法,还有模拟退

火算法^[29]、最速下降法^[34]、变尺度法-BFGS法^[35]、分形相关法^[36]等,众多算法的提出就是为了提高精度和相关搜索的速度,未来的数字散斑相关的研究仍将集中在此方向上,同时提高算法的自适应性和柔性,以此不断丰富DSCM的理论。

3 国内外DSCM技术的应用发展

数字散斑相关技术由于具有实时性、非接触、全场性、光学系统简单等优点而更广泛地应用于科研和生产实践中的力学测量。数字散斑相关在材料力学的测量方面已属传统检测项目,其应用已经很成熟,国内外众多学者用其测试各个领域的材料力学性能。2009年,墨西哥国立自治大学的Sanchez-Arevalo F. M.采用白光和He-Ne激光器对加载的CuAlBe记忆合金分别用数字散斑相关计算平面应力和弹性模量并作比较^[37]。2009年,美国普渡大学的Srinivasan Venkatakrishnan利用印刷电路板的自然散斑点测量其在高温下形变和热膨胀系数随时间的变化^[38]。2011年,法国里昂大学的Wu T采用4个摄像机进行全场三维数字散斑相关测量,监控15-5PH不锈钢两面从初始到断裂的应力变化,推导出损伤的演化^[39],图1是15-5PH不锈钢的轴向应变场的变化过程。

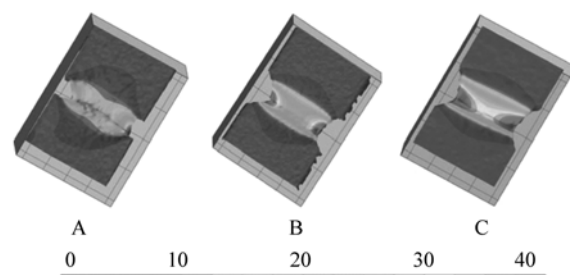


图1 15-5PH不锈钢的轴向应变场

Fig.1 Axial strain field of 15-5PH stainless steel

2011年,美国奥本大学的Lee Dongyeon利用高速摄像机记录在几何对称载荷配置和冲击载荷条件下单向碳纤维/环氧复合材料图像信息,再利用数字散斑相关计算出裂纹生长情况^[40]。2010年,英国伦敦帝国学院的Pavel Sztefek研究应力刺激对骨骼的适应性的影响,通过对小鼠胫骨施

压,通过数字图像相关记录两周应力变化从平均到平均的过程^[41],图2是小鼠胫骨在适应应力刺激前后的应力场。

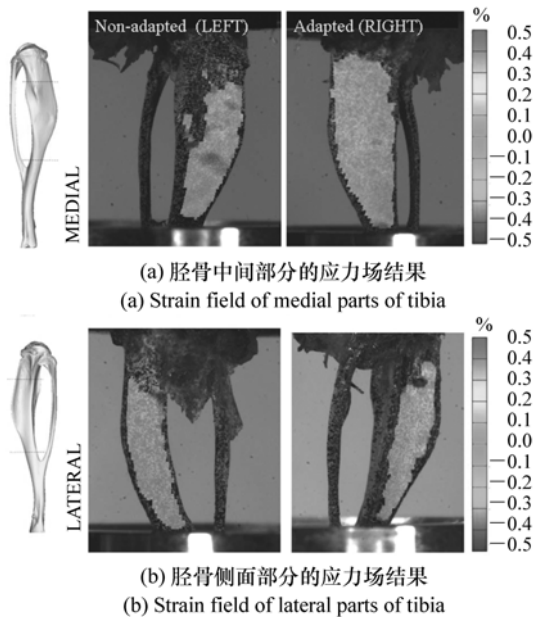


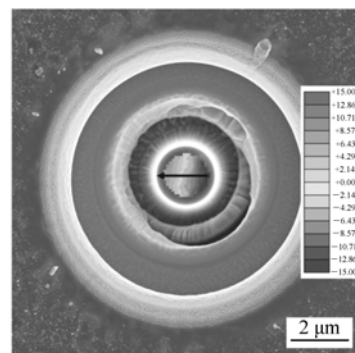
图2 小鼠胫骨适应应力刺激前后应力场结果图

Fig.2 Strain fields of mouse tibia in adapted and non-adapted

2012年,海军航空工程学院的李高春和刘著卿对粘接界面对拉伸过程的变形和破坏过程进行了观察,并对粘接界面在拉伸过程中的图像进行数字图像相关分析,得到了界面的位移场分布,揭示了界面在拉伸过程中力学性能变化的深层次原因^[42]。2012年,中国科学院武汉岩土力学研究所的邹飞和李海波以石膏试件的单轴压缩试验为基础,通过试件表面数字图像相关系数的变化来表征试件表面损伤状态的演化过程^[43]。2012年,东南大学的杨福俊和何小元对闭孔泡沫铝为夹心的夹心板和夹心为开孔泡沫铝两种结构材料静态三点加载使其弯曲,并用CCD记录弯曲变形过程,利用相关计算获取弯曲变形过程数据,并做力学性能分析比较^[44]。2011年,华南理工大学的胡斌、贺玲凤和张蕊对圆柱体橡胶单轴压缩,利用数字图像相关方法测量了小变形范围内柔性橡胶材料受压时的弹性模量^[45]。2010年,山东理工大学代祥俊、云海和蒲琪将透明材料的厚度测量转化为透明材料面内点的位移,用CCD采集激

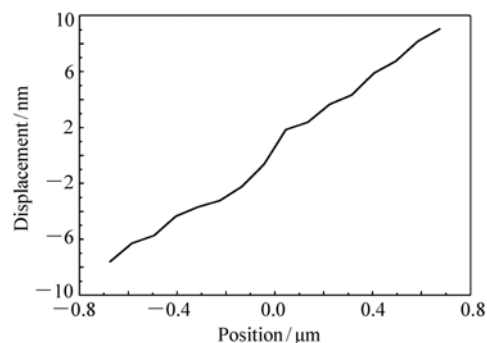
光透过透明材料折射后形成的光斑,由于透明材料形变后光斑也会发生位移,通过相关计算光斑的位移量,通过几何计算即可得到其厚度^[46]。

对于散斑图的采集,不光只是采用工业相机,由于数字散斑的光路系统简单,所以将其与SEM,TEM,STM,AFM结合,可以研究微小尺度的力学性能测试。2011年,北京理工大学的Zhongbin Zhou使用扫描电子显微镜获取PBX模拟物的序列图片,用数字图像相关定量分析机械特性和裂纹尖端的应力集中^[47]。2010年,上海大学的安兵兵采用光学体视显微镜对微小尺寸的试件高倍放大,记录预制裂纹铝箔拉伸过程,并相关分析出裂纹附近的变形场^[48]。2012年,埃尔朗根-纽伦堡大学的M. Krottenthaler采用聚焦离子束铣削和数字图像相关测量薄涂层的残余应力,利用TEM记录应力松弛过程的图像^[49],图3是铣削柱的应力场和中心方向为位移图。



(a) 铣削柱的应力场

(a) Strain field of pillar milling



(b) 铣削柱的位移结果

(b) Displacement of pillar milling

图3 铣削柱的应力场和位移结果图

Fig.3 Displacement and strain field of pillar milling

2010年,美国伊利诺伊大学的 N. J. Karanjgaokar 利用光学显微镜、数字图像相关和显微红外成像技术,实验比较微尺度试件在电阻加热和均匀加热时温度场和应力场的变化^[50]。

数字图像的处理,散斑图质量好坏直接影响数字图像相关技术后续算法的准确性。由于周围测量环境对于采集的散斑图的质量的影响,例如高温的热辐射和振动等,国内外学者也做出了在高温和振动环境数字散斑相关的一些研究成果。2010年,北京航空航天大学的潘兵结合瞬态气动热试验模拟系统和数字图像相关方法发展出了一种用于高温环境下全场高温变形测量新技术。当物体表面温度超过 500 °C 时,高温物体表面的热辐射会导致相机成像质量明显下降,出现“退相关效应”。为了减少热辐射的影响,采用了带通光学成像技术^[51-52]。2012年,美国奥克兰大学的杨连祥研究了涂层在高温情况的不开裂和承受变形能力,为了减少黑体辐射的影响也采用了滤波片^[53],图4为采用单色照明并添加 BP470 过滤器,以及固化涂层的散斑进行数字图像相关的三向应力场。

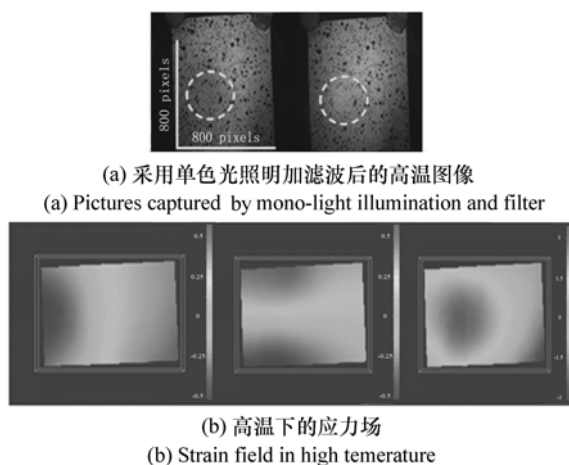


图4 高温下的应力场
Fig. 4 Strain field in high temperature

2009年,曼彻斯特大学的 Grant B. M. B 采用低照明度和滤波以及蓝色照明减少黑体辐射的影响,能够准确得到在 1 100 °C 下的测量结果^[54]。2012年,里昂大学的 Paul Leplay 利用扫描电子显微镜采集图片确定陶瓷从室温到高温(25 ~

900 °C)的机械行为^[55],图5为结合 SEM 在高温下的机械弯曲实验装置。

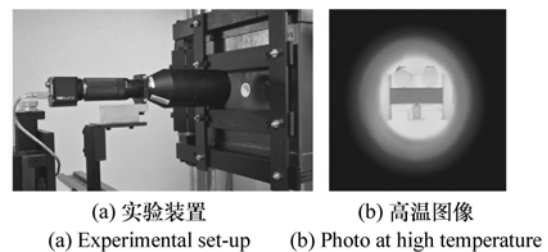


图5 结合 SEM 在高温下的弯曲实验装置
Fig. 5 Experimental set-up for mechanical bending tests at high temperature with SEM

2010年,扬州大学的郑翔采用高速摄影成像技术,根据时序动态散斑跟踪相关测量柴油机在自由状态下固有频率,并与电测试验结果、有限元数值计算结果进行对比^[56]。2011年,麻省大学洛威尔分校的 Mark N. Helfrick 利用的三维数字图像相关测量振动结构全场的形貌和形变,其测量结果也和有限元结构一致,并和传统加速度计,扫描激光测振仪作了对比^[57]。

4 结束语

随着光电子技术、计算机技术、图像处理技术的飞速发展,数字散斑相关技术结合数字图像技术、亚像素技术,迅速朝着快速、方便、准确和自动化方向迈进,现已具有能够直接得到位移全场信息、结果形式直观、非接触、高精度等特点,并且可以按设计者的需要进行合理的后处理^[58]。数字散斑相关技术的精度和速度是一对矛盾体,国内外众多学者在提高这两个指标上付出很多努力。

关于数字散斑相关的精度和速度提高:

提高散斑图的质量。散斑图的相关系数随着位移的增大而下降,相关性随着散斑颗粒的大小增加而减小,同时散斑的灰度形貌易受环境变化(如:振动,高温,气流等)的影响^[59]。结合研读文献可知系统采照明采用白光照明比激光照明更好,散斑颗粒大小处于 4 pixel 左右最佳,高温辐射影响可以通过带通滤波和蓝光照明,振动可以

采用高速摄像机减少影响。

从算法方面提高准确和速度也是众多学者研究努力的方向。在引进现代应用数学理论后,遗传算法、智能神经网络、粒子群算法、小波变换等被引入数字散斑相关中,有的算法可以以数量级提高精度和速度。更高精度的算法是基于亚像素搜索方法的提出,梯度法、牛顿-拉斐逊、插值法,

拟合法等都能很好地进行亚像素搜索。通过文献可知目前数字散斑的精度可达0.01~0.05 pixel。

数字散斑相关技术自提出以来,经过20多年的发展,以其独有的优势在实际工程实践中已经具有很重要的意义。经过众多学者的研究,其精度和速度已经有很大的提高,并且其研究领域也在不断的扩大,其应用前景必将更加广阔。

参考文献:

- [1] YAMAGUCHI I. Laser-speckle strain gauge[J]. *J Physics E:Scientific Instrument*,1981,14(11):1270-1273.
- [2] PETERS W H,RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Opt. Eng.*,1982,21(3):427-431.
- [3] PETERS W F,RANSON M A,SUTTON T C C,*et al.*. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. *Opt. Eng.*,1983,22(6):226738.
- [4] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京:清华大学出版社,1997:98-174.
JIN G CH. *Computer-aided Optical Measurement*[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1997:98-174. (in Chinese)
- [5] CHU T C,RANSON W F,SUTTON M A,*et al.*. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics[J]. *Exp. Mech.*,1985,25:232-244.
- [6] 芮嘉白,金观昌,徐乘业. 一种新的数字散斑相关方法及应用[J]. *力学学报*,1994,26(5):599-607.
RUI J B,JIN G CH,XU B Y. A new improved digital speckle correlation method and its application[J]. *Acta Mechanica Sinica*,1994,26(5):599-607. (in Chinese)
- [7] SUTTON M A,BRUCK H A,MCNEILL S R. Determination of deformations using digital correlation with the newton-raphson method for partial differential corrections[J]. *Exp. Mech.*,1989,29:261-267.
- [8] ZHAO W ZH,JIN G CH. An experimental study on measurement of Poisson's ratio with digital correlation method[J]. *J. Appl. Polymer Science*,1996,60:1083-1088.
- [9] 周灿林,元东平. 频率域数字散斑相关法及其应用[J]. *光电工程*,2000,27(3):65-68.
ZHOU C L,QI D P. Frequency domain digital speckle correlation method and its applications[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2000,27(3):65-68. (in Chinese)
- [10] GREBENYUK A A,RYABUKHO V P. Digital image correlation with fast Fourier transform for large displacement measurement[J]. *SPIE*,2010,7999:79990B.
- [11] MAHAJAN A,PILCH A,CHU T. Intelligent image correlation using genetic algorithms for measuring surface deformation in the autonomous inspection of structures[C]//Proceedings of the American Control Conference,Jun 28-30,2000,Chicago,USA,2000,1:460-461.
- [12] MA SH P,JIN G CH. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*,2003,16(4):366-373.
- [13] 王怀文. 自适应数字散斑相关方法与铜箔材料断裂中的尺寸效应研究[D]. 天津:天津大学,2004.
WANG H W. Adaptive digital speckle correlation method with copper foil material fracture size effect[D]. Tianjin:Tianjin University,2004. (in Chinese)
- [14] 唐晨,刘铭,张芳. 彩色散斑图像相关技术的改进遗传算法[C]//第十一届全国实验力学学术会议,大连,中国,2005.
TANG CH,LIU M,ZHANG F. The improved genetic algorithm for color digital speckle correlation technique[C]//Dalian, Eleventh National Conference of Experimental Mechanics, Dalian, China, 2005. (in Chinese)
- [15] CHEN H,CHEN G, YE D,*et al.*. 3D deformation measurement by digital speckle correlation method and stereo vision

- [J]. *SPIE*,2007,6723:783189.
- [16] HWANG S F,HORN J T,WANG H J. Strain measurement of SU-8 photoresist by a digital image correlation method with a hybrid genetic algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2008,46(3):281-289.
- [17] ZHANG T,CHEN H Y,YANG X K,*et al.* Investigation for digital speckle correlation method based on improved genetic algorithm[J]. *SPIE*,2011,8025:80252m.
- [18] PITTER M C,SEE C W,SOMEKH M G. Subpixel microscopic deformation analysis using correlation and artificial neural networks[J]. *Optics Express*,2001,8(6):322-327.
- [19] 常一鸣. 数字散斑图像相关亚像素搜索算法的研究及应用[D]. 天津:天津大学,2009.
CHANG Y M. Research and application of digital speckle image sub-pixel search algorithm[D]. Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [20] LIU X Y,TAN Q CH. Subpixel in-plane displacement measurement using digital image correlation and artificial neural networks[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics,Jun 19-21,2010,Chengdu,China,2010:1-4.
- [21] 唐晨,闫海青,佟景伟,等. 小波变换用于数字图像相关法位移场的平滑处理[J]. 天津大学学报,35(5):577-580,2002.
TANG CH,YAN H Q,TONG J W,*et al.* Smoothing process of the displacement noise obtained by digital image correlation with wavelet transform[J]. *J. Tianjin University*,2002,35(5):577-580. (in Chinese)
- [22] 简龙晖,马少鹏,张军,等. 基于小波多级分解的数字散斑相关搜索方法[J]. 清华大学学报,43(5):680-683,2002.
JIAN L H,MA SH P,ZHANG J,*et al.* Wavelet-transform-based hierarchical search algorithm for the digital speckle correlation method[J]. *J. Tsinghua University*,2002,43(5):680-683. (in Chinese)
- [23] 简龙晖,林碧森,刘宁,等. 基于小波变换的新型数字散斑相关方法[J]. 光学技术,2003,29(2):216-218.
JIAN L H,LIN B S,LIU L,*et al.* New method of digital speckle correlation based on wavelet transform[J]. *Optical Technology*,2003,29(2):216-218. (in Chinese)
- [24] 李新忠,岱钦,王希军,等. 多尺度小波降噪的数字散斑相关搜索[J]. 光学精密工程,2007,15(1):58-63.
LI X ZH,DAI Q,WANG X J,*et al.* Digital speckle correlation method of multi-scale wavelet noise reduction[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(1):58-63. (in Chinese)
- [25] LU H,CARY P D. Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*,2000,40(4):393-400.
- [26] HOLLAND J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor[M]. University of Michigan Press,1975:15-32.
- [27] 玄光男,程润传. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1-40.
XUAN G N,CHENG R CH. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2004:1-40. (in Chinese)
- [28] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999:1-64.
ZHOU M,SUN SH D. *Principle and Application of Genetic Algorithms*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999:1-64. (in Chinese)
- [29] 刘铭. 数字散斑图像相关技术的改进遗传算法[D]. 天津:天津大学,2005.
LIU M. Improved Genetic Algorithm of Digital Speckle Images[D]. Tianjin:Tianjin University,2005. (in Chinese)
- [30] 张铃,张钊. 人工神经网络理论及应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1997.
ZHANG L,ZHANG B. *Theory and Applications of Artificial Neural Networks*[M]. Hangzhou:Zhejiang Science and Technology Press,1997. (in Chinese)
- [31] MALLAT S. A theory multiresolution signal decomposition:the wavelet representation[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*,1989,11(7):674-693.
- [32] 刘伟宁. 基于小波域扩散滤波的弱小目标检测[J]. 中国光学,2011,4(5):503-508.
LIU W N. Dim target detection based on wavelet field diffusion filter[J]. *Chinese Optics*,2011,4(5):503-508. (in Chinese)

- [33] 杜亚志,王学滨. 基于粒子群算法的整像素数字图像相关方法[J]. 计算机工程与应用,2012,48(6):200-204.
DU Y ZH, WANG X B. Digital image correlation method based on particle swarm optimization algorithm without subpixel Interpolation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(6):200-204. (in Chinese)
- [34] 何秋霖. 数字散斑相关法用于热应力测试的研究[D]. 天津:天津大学,2007.
HE Q L. Digital speckle correlation method for thermal stress tests[D]. Tianjin:Tianjin University,2007. (in Chinese)
- [35] 钟健. 数字散斑相关法的研究和应用[D]. 天津:天津大学,2006.
ZHONG J. Research and Application of digital speckle correlation method[D]. Tianjin:Tianjin University,2006(in Chinese)
- [36] 季坤. 数字散斑相关方法和分形理论在木材力学研究中的运用[D]. 合肥:安徽农业大学,2008.
JI K. Use of digital speckle correlation method and fractal theory in the study of wood mechanical[D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2008. (in Chinese)
- [37] SANCHEZ-AREVALO F M, GARCIA-FERNANDEZ T, PULOS G. Use of digital speckle pattern correlation for strain measurements in a CuAlBe shape memory alloy[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(8):775-782.
- [38] SRINIVASAN V, RADHAKRISHNAN S, RATANAWILAI T, et al. . Nguyen LT. A robust digital image correlation technique for high-resolution characterisation of microelectronic packaging materials[J]. *International J. Materials and Product Technology*, 2009, 34(1):139-157.
- [39] WU T, CORET M, COMBESURE A. Strain localisation and damage measurement by full 3D digital image correlation: application to 15-5PH stainless steel[J]. *Strain*, 2011, 47(1):49-61.
- [40] LEE D, TIPPUR H, KIRUGULIGE M, et al. . Experimental study of dynamic crack growth in unidirectional graphite/epoxy composites using digital image correlation method and high-speed photography[J]. *J. Composition Materials*, 2009, 43(19):2081-2108.
- [41] SZTEFEK P, VANLEENE M, OLSSON R. Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia[J]. *J. Biomechanics*, 2010, 43(4):599-605.
- [42] 李高春,刘著卿,唐波,等. 基于数字图像相关方法的粘接界面微观破坏分析[J]. 宇航材料工艺,2012,42(3):82-85.
LI G CH, LIU ZH Q, TANG B, et al. . Investigation on adhesive failure using digital image correlation method[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(3):82-85. (in Chinese)
- [43] 邹飞,李海波,周青春,等. 基于数字图像灰度相关性的类岩石材料损伤分形特征研究[J]. 岩土力学,2012,33(3):731-737.
ZOU F, LI H B, ZHOU Q CH, et al. . Fractal features study of rock-like material damage based on gray correlation of digital images[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(3):731-737. (in Chinese)
- [44] 杨福俊,王辉,杜晓磊,等. 泡沫铝夹心板静态三点弯曲变形行为及力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012,42(1):120-124.
YANG F J, WANG H, DU X L, et al. Deformation behavior and mechanical properties of aluminium foam sandwiches under static three-point bending[J]. *J. Southeast university* (Natural Science Edition), 2012, 42(1):120-124. (in Chinese)
- [45] 胡斌,贺玲凤,张蕊. 橡胶材料弹性模量数字图像相关测定法[J]. 实验力学,2011,26(2):151-157.
HU B, HE L F, ZHANG R. Digital image correlation method for rubber elastic modulus measurement[J]. *J. Experimental Mechanicals*, 2011, 26(2):151-157. (in Chinese)
- [46] 代祥俊,云海,蒲琪. 基于数字图像相关的透明材料厚度测量[J]. 光学技术,2010,36(4):525-529.
DAI X J, YUN H, PU Q. Thickness measurement of transparent material by digital image correlation method[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(4):525-529. (in Chinese)
- [47] ZHOU ZH B, CHEN P W, HUANG F L, et al. . Experimental study on the micromechanical behavior of a PBX simulant using SEM and digital image correlation method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3):366-370.
- [48] 安兵兵,吴佳,张俊乾,等. 微尺度塑性大应变测量[J]. 实验技术与管理,2010,27(3):32-35.

- AN B B, WU J, ZHANG J Q, *et al.*. The determination of plastic strain in microscale[J]. *Experimental Fechnology and Management*, 2010, 27(3):32-35. (in Chinese)
- [49] KROTTENTHALER M, SCHMID C, SCHAUFLEER J, *et al.* A simple method for residual stress measurements in thin films by means of focused ion beam milling and digital image correlation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 215:247-252.
- [50] KARANJGAOKAR N J, OH C S, CHASIOTIS I. Microscale experiments at elevated temperatures evaluated with digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, (2011)5:609-618.
- [51] 潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统[J]. *航空学报*, 2010, 31(10).
PAN B, WU D F, GAO ZH T. Hot deformation of non-contact measurement system based on digital image correlation method[J]. *Aeronautics*, 2010, 31(10). (in Chinese)
- [52] 潘兵, 吴大方, 高镇同, 等. 1200 °C 高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J]. *强度与环境*, 2011, 38(1):52-58.
PAN B, WU D F, GAO ZH T, *et al.*. Study of non-contact optical metrology for full-field deformation measurement at 1200 °C[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(1):52-58. (in Chinese)
- [53] CHEN X, XU N, YANG L X, *et al.*. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23:125603.
- [54] GRANT B M B, STONE H J, WITHERS P J, *et al.* High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *J. Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, 44(4):263-271.
- [55] LEPLAY P, RETHORE J, MEILLE S, *et al.*. Identification of asymmetric constitutive laws at high temperature based on Digital Image Correlation[J]. *J. European Ceramic Society*, 2012, 32:3949-3958.
- [56] 郑翔, 高建和, 杨福俊, 等. DICM 在发动机模态参数识别中的试验研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(3):280-286.
ZHENG X, GAO J H, YANG F J. Experimental study of DICM engine modal parameter identification[J]. *J. Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(3):280-286. (in Chinese)
- [57] HELFRICK M N, NIEZRECKI C, AVITABILE P, *et al.*. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(3):917-927.
- [58] 陈志新, 梁晋, 郭成. 数字散斑相关法在变形测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1480-1485.
CHEN ZH X, LIANG J, GUO CH. Application of digital speckle correlation method to deformation measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1480-1485. (in Chinese)
- [59] 刘晓辉, 汪敏, 李芄. 噪声对数字图像相关法计算结果的影响研究[J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(4):90-94.
LIU X H, WANG M, LI P. Relationship between the noise and the calculation results of the digital image correlation method[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(4):90-94. (in Chinese)

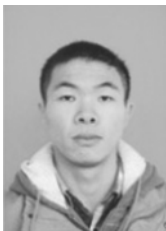
作者简介:



王永红(1972—),男,安徽合肥人,博士后,教授,研究生导师,1994年于合肥工业大学获得学士学位,1997年于中科院安徽光机所获得硕士学位,2004年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail: yhwang@hfut.edu.cn



张浩(1988—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事数字散斑相关的研究。E-mail:469053005@qq.com



梁 恒(1989—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,2011年于湖北工业大学获得学士学位,主要从事机器视觉、数字散斑等相关等方面的研究。E-mail: henley.liang@outlook.com



王 硕(1988—),男,河南周口人,硕士研究生,2011年于河南理工大学获得学士学位,主要从事机器视觉及智能控制的研究。E-mail: wangshuo@mail.hfut.edu.cn



杨连祥(1959—),男,浙江绍兴人,教授,博士生导师,教育部长江学者。1982年、1986年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,1997年于德国 Kassel 大学获得博士学位。从2001年至今担任 Oakland University 机械工程系教授,光学测量实验室主任,国际汽车工程师学会(SAE)材料建模及测试委员会主席。主要从事全场光学检测、散斑测量技术、机器视觉等方面的研究。E-mail: yang2@oakland.edu

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862,84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org