数字图像相关技术的一些进展

苏勇, 张青川*, 伍小平

中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230027

*联系人, E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

收稿日期: 2018-04-30; 接受日期: 2018-07-04; 网络出版日期: 2018-08-09

国家自然科学基金(编号: 11332010, 11472266, 11627803, 11702287), 中国科学院战略性先导技术专项(编号: XDB22040502)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: WK2480000004)资助项目

摘要 中国科学技术大学光力学实验室近年来专注于数字图像相关方法的原理研究和应用拓展, 有效提升该方法测量精度和计算速度的同时, 在数字散斑标准化、二维补偿技术、生物医学工程以及锯齿型塑性屈服等领域取得了一系列研究成果. 本文拟对课题组的研究进展做一个概述: (1)提出了局域变形下形函数误差的理论模型与估计算法, 建立了保证测量精度的子区尺寸选取准则; 提出了计算速度是传统算法两倍的二阶反向高斯牛顿算法; 研究开发了三维数字图像相关高效算法、基于反向迭代算法的左右系列变形图匹配的优化策略, 开发出三维数字图像相关通用软件包和硬件系统, 为国内高校、研究所和工程单位提供了有效的科研分析方法和工程测量手段. (2)揭示了插值偏差的深层机制并发展了实验测量手段, 提出了综合考虑系统误差和随机误差的散斑质量评价标准, 建立了散斑尺寸优化的理论模型. (3)发展了基于预标定的二维数字图像相关补偿技术. (4)建立了实时的颅颌面手术导航系统; 研发了具有高时空分辨率的脉搏测量系统, 推动了传统中医的数字化和科学化. (5)通过高速数字图像相关技术首次观测到剪切带的萌生、演化过程, 证明了带外收缩现象的存在; 通过相互正交的两套数字图像相关系统首次观察到厚度方向的应变局域化现象. (6)基于数字散斑相关方法实现了振动和应变的高精度实时测量.

关键词 光测实验力学, 数字图像相关, 散斑标准化, 生物医学, 锯齿型塑性屈服

PACS: 42.30.Ms, 42.30.Sy, 42.30.Tz, 42.30.Va, 42.30.Wb

1 引言

中国科学技术大学光力学实验室在伍小平院士和张青川教授的领导下, 长期从事光测实验力学(Photo-mechanics)领域的研究. 在早期的实验理论方面, 取得过激光散斑空间运动规律, 部分相干光散斑特征和规

律, 以及疲劳表面与激光散斑衍射谱关联等研究成果^[1-3]. 在实验技术方面, 有丰富的全息散斑三维位移全场测量和处理技术, 在结构光三维形状测量研究和应用方面有丰富经验. 近年来, 面向工程应用实际和国家重大需求, 实验室在数字图像相关技术的理论和应用方面开展了一系列研究, 取得了丰硕的研究成果,

引用格式: 苏勇, 张青川, 伍小平. 数字图像相关技术的一些进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 094604

Su Y, Zhang Q C, Wu X P. Progress in digital image correlation method (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 094604, doi: 10.1360/SSPMA2018-00156

获得了国内外同行的认可.

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术最早由Yamaguchi和Peters等人^[4,5]于20世纪80年代提出, 为提高该算法的测量精度和计算速度, 学者们在亚像素匹配算法、插值算法、图像噪声抑制等方面进行了一系列工作^[6-8]. 如今, 数字图像相关由于设备简单、测量精度高、隔振要求低等一系列优势, 已广泛应用于航空、航天、材料、生物等领域, 成为了光测实验力学领域最受欢迎的形貌、变形和应变测量方法.

虽然数字图像相关技术已获得广泛应用, 然而其在基本原理方面仍存在一些不足: 1)无法有效估计形函数误差; 2)对于复杂变形, 传统算法无法兼顾速度和精度; 3)插值偏差的深层机制不明, 同时缺乏实验测量手段; 4)缺乏完备的散斑质量评价标准; 5)缺乏散斑优化的理论模型; 6)传统的二维DIC补偿法对图像噪声非常敏感. 针对上述问题, 本课题组开展了一系列基础研究.

基础研究的目的是为了服务于工程应用实际和国家重大需求. 立足于上述基础研究成果, 本课题组研发了通用三维数字图像相关测量系统PMLAB DIC-3D. 基于该系统, 课题组进行学科交叉研究, 将数字图像相关技术应用于生物医学和锯齿型塑性屈服等领域, 取得了一些新成果.

2 复杂变形下的精度与速度

真实变形场可能异常复杂, 从而导致变形后的子区形状难以描述. 如图1所示, 由于非均匀变形, 参考子区 Ω_r 在变形图中变化为 Ω_g . Ω_g 的形状可能非常复杂, 以至于难以完全精确描述. 为了解决这个问题, 通常使用形函数(Shape Function)近似真实变形. 常用的形函数有一阶形函数和二阶形函数, 本质上均是对变形做泰勒级数展开. 设参考子区中心坐标为 (x_0, y_0) , 一阶形函数将参考图中的点 (x, y) 映射到变形图中的点 (x', y') , 满足

$$\begin{cases} x' = x_0 + u + (1 + u_x)\Delta x + u_y\Delta y, \\ y' = y_0 + v + v_x\Delta x + (1 + v_y)\Delta y, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\Delta x = x - x_0$ 和 $\Delta y = y - y_0$ 是 (x, y) 相对于子区中心 (x_0, y_0)

图1 (网络版彩图)形函数欠匹配示意图. 一阶形函数描述的变形子区 Ω_s 是真实变形子区 Ω_g 的一个近似

Figure 1 (Color online) Schematic of shape function under-match. The deformed subset Ω_s described by the first-order shape function is an approximation of the actual subset Ω_g .

的相对坐标, $(u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)$ 是形函数参数. 一阶形函数可以表征平移、旋转、正应变和剪应变. 如图1所示, 如果采用一阶形函数, 真实的变形子区 Ω_g 将由一个平行四边形 Ω_s 近似. 显然, 如果变形非常复杂或者子区很大, 一阶形函数将难以精确描述真实变形, 引起形函数欠匹配. 形函数欠匹配是指形函数阶数小于变形场阶数. 因此, Lu等人^[9]提出了二阶形函数

$$\begin{cases} x' = x_0 + u + (1 + u_x)\Delta x + u_y\Delta y \\ \quad + \frac{1}{2}u_{xx}\Delta x^2 + u_{xy}\Delta x\Delta y + \frac{1}{2}u_{yy}\Delta y^2, \\ y' = y_0 + v + v_x\Delta x + (1 + v_y)\Delta y \\ \quad + \frac{1}{2}v_{xx}\Delta x^2 + v_{xy}\Delta x\Delta y + \frac{1}{2}v_{yy}\Delta y^2, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $(u, u_x, u_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v, v_x, v_y, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy})$ 是二阶形函数的参数. 比较公式(1)和公式(2), 二阶形函数相当于在一阶形函数的基础上添加了二阶变形项. 由于引入了额外的参数, 二阶形函数可以描述更复杂的变形, 不过同时对噪声更加敏感^[10]. 此外, 还有零阶形函数

$$\begin{cases} x' = x + u, \\ y' = y + v. \end{cases} \quad (3)$$

零阶形函数只能描述平移, 所以实际中很少采用. 但是, 得益于其形式的简单, 零阶形函数广泛应用于数字图像处理技术的误差分析领域.

2.1 形函数误差

形函数只是真实变形的近似(图1), 这会导致一个系统性误差, 称为形函数误差(Systematic Error Due to Shape Function Under-Match)^[10]. 由于形函数欠匹配在实际中难以避免, 形函数误差被广泛关注. 然而, 长期

以来, 并不存在简单、有效、可靠的形函数误差估计方法.

针对形函数欠匹配的问题, 本课题组进行了深入研究^[11,12], 发现对于一阶形函数, 形函数误差可以近似表示为

$$\begin{cases} u_e = \frac{M(M+1)}{6} \nabla^2 u(x, y), \\ v_e = \frac{M(M+1)}{6} \nabla^2 v(x, y), \end{cases} \quad (4)$$

其中 u_e 和 v_e 分别是 x 方向和 y 方向的形函数误差, M 是子区尺寸的一半, $\nabla^2 = \partial_x^2 + \partial_y^2$ 是拉普拉斯算子, $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 分别是 x 和 y 方向真实的位移场. 由于形函数更难以描述大子区变形, 所以形函数误差与子区尺寸平方近似成正比(公式(4)). 同时, 考虑到一阶泰勒展开的余项同原始函数的二阶导数相关, 形函数误差依赖于真实位移场的二阶导数(公式(4)).

基于形函数误差的理论分析, 并考虑到数字图像相关的测量精度通常为0.01像素, 本课题组提出了一种保证测量精度的子区尺寸选取准则: 子区尺寸必须使得形函数误差不大于0.01像素, 相应的子区范围可以通过公式(4)根据应变梯度 $\nabla^2 u$ 和 $\nabla^2 v$ 反算. 如图2所示, 对于应变梯度为286 $\mu\text{e}/\text{pixel}$ 的变形, 应该选择29像素及以下的子区, 否则, 仅仅形函数误差就会大于0.01像素这一数字图像相关方法精度的典型值.

估计形函数误差需要位移的二阶导数(公式(4)),

图2 (网络版彩图)保证测量精度的子区尺寸选取准则. 横坐标为子区尺寸, 纵坐标为该子区尺寸对应的最大应变梯度. 如果真实的应变梯度大于此值, 则无法保证测量精度达到0.01像素这一数字图像相关的典型值.

Figure 2 (Color online) A subset chosen criterion that can ensure the measurement accuracy. The x -axis is the subset size and the y -axis is the maximum of allowable strain gradient. If the actual strain gradient is larger than that value, the measurement performance cannot reach 0.01 pixel, which is the typical accuracy of digital image correlation.

然而现实情况下其数值难以计算. 为了解决该问题, 本课题组提出了一种通过比较不同子区下位移场计算差异估计应变梯度的算法. 根据公式(4), 选择不同的子区尺寸 M_1 和 M_2 , 可得应变梯度

$$\begin{cases} \nabla^2 u(x, y) \approx \frac{6[u_{M_1}^{\text{DIC}}(x, y) - u_{M_2}^{\text{DIC}}(x, y)]}{M_1(M_1+1) - M_2(M_2+1)}, \\ \nabla^2 v(x, y) \approx \frac{6[v_{M_1}^{\text{DIC}}(x, y) - v_{M_2}^{\text{DIC}}(x, y)]}{M_1(M_1+1) - M_2(M_2+1)}, \end{cases} \quad (5)$$

其中, 上标表示通过DIC计算求得, 下标表示子区尺寸. 例如, 对图3所示的裂纹扩展实验, 可以分别计算 $M=9$ 和 $M=14$ 情况下的位移场和应变场. 根据公式(5), 即可估计出位移场的应变梯度 $\nabla^2 u$ (图4(a)); 根据公式(4), 可以估计不同子区下的形函数误差(图4(b)和(c)).

2.2 二阶反向高斯牛顿法

数字图像相关计算通常比较耗时, 因此, 提升数字

图3 (网络版彩图)实验原始数据以及DIC测量的位移和应变. (a) 参考图. (b) 变形图. (c) 当 $M=9$ 时DIC测量的位移场 u . (d) 当 $M=14$ 时DIC测量的位移场 u . (e) 当 $M=9$ 时DIC测量的应变场 e_{xx} . (f) 当 $M=14$ 时DIC测量的应变场 e_{xx} .

Figure 3 (Color online) Experimental raw data and the displacement and strain results measured by the DIC method. (a) The reference image. (b) The deformed image. (c) Displacement u measured by DIC when $M=9$ pixels. (d) Displacement u measured by DIC when $M=14$ pixels. (e) Strain e_{xx} measured by DIC when $M=9$ pixels. (f) Strain e_{xx} measured by DIC when $M=14$ pixels.

图 4 (网络版彩图) 裂纹扩展实验中形函数误差的估计. (a) 根据公式(5)估计的位移二阶导数 Δu . (b) 当 $M=14$ 时根据公式(4)估计的形函数误差. (c) 当 $M=9$ 时根据公式(4)估计的形函数误差

Figure 4 (Color online) Estimation of systematic errors due to shape function under-match in a physical crack experiment. (a) Second-order displacement gradients Δu measured by eq. (5). (b) Displacement error estimated by eq. (4) when $M=14$ pixels. (c) Displacement error estimated by eq. (4) when $M=9$ pixels.

图像相关的计算速度是学者长期以来的不懈追求. 2001年, 计算机视觉领域的Baker和Matthews^[13]提出了反向组合型算法(Inverse Compositional Algorithm), 并且证明了反向策略与传统正向策略的等价性. 反向策略和正向策略的本质不同在于: 正向策略的迭代增量直接叠加到变形图上(图5), 而反向策略迭代增量施加在参考图上, 然后通过逆变换映射到变形图(图6). 由于消除了传统正向策略中海森矩阵的反复计算, 反向策略的计算速度远超正向策略. 2009年, Sutton等人^[14]在其专著中将反向算法引入数字图像相关领域. 2013年, 潘兵等人^[6]将反向组合型高斯牛顿算法与可靠性导向策略、插值系数查找表技术相结合, 进一步消除了数字图像相关中的冗余计算.

传统的反向组合算法基于一阶形函数, 然而, 一阶形函数不仅难以描述不同视角引起的投影变换, 更无法描述复杂的局域变形. 为此, 本课题组提出了基于二阶形函数的反向高斯牛顿算法(Inverse Compositional Gauss-Newton Algorithm with the Second-Order Shape Function, IC-GN²)^[15].

二阶反向高斯牛顿算法的核心是建立恒等式使得形函数矩阵可逆. 不失一般性, 认为子区中心在坐标原点. 对于传统的一阶形函数, 使用广义坐标, 公式(1)可以改写为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+u_x & u_y & u \\ v_x & 1+v_y & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

形函数矩阵三行三列, 从而可逆. 然而, 对于二阶形函数, 使用广义坐标, 公式(2)化为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}u_{xx} & u_{xy} & \frac{1}{2}u_{yy} & 1+u_x & u_y & u \\ \frac{1}{2}v_{xx} & v_{xy} & \frac{1}{2}v_{yy} & v_x & 1+v_y & v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ xy \\ y^2 \\ x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

形函数矩阵为三行六列, 无法求逆. 为了使形函数矩阵可逆, 必须添加额外的恒等式. 考虑到 x'^2 , $x'y'$, y'^2 与 x' , y' 不独立, 由公式(2)可以证明

$$\begin{cases} x'^2 = (1+S_1) \cdot x^2 + S_2 \cdot xy + S_3 \cdot y^2 \\ \quad + S_4 \cdot x + S_5 \cdot y + S_6 + o(h^2), \\ x'y' = S_7 \cdot x^2 + (1+S_8) \cdot xy + S_9 \cdot y^2 \\ \quad + S_{10} \cdot x + S_{11} \cdot y + S_{12} + o(h^2), \\ y'^2 = S_{13} \cdot x^2 + S_{14} \cdot xy + (1+S_{15}) \cdot y^2 \\ \quad + S_{16} \cdot x + S_{17} \cdot y + S_{18} + o(h^2), \end{cases} \quad (8)$$

其中, S_1 至 S_{18} 是形函数参数的函数, 具体形式参见文献[15]. 通过建立额外的恒等式, 二阶形函数可以写作

$$\begin{bmatrix} x'^2 \\ x'y' \\ y'^2 \\ x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \\ S_7 & 1+S_8 & S_9 & S_{10} & S_{11} & S_{12} \\ S_{13} & S_{14} & 1+S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ \frac{1}{2}u_{xx} & u_{xy} & \frac{1}{2}u_{yy} & 1+u_x & u_y & u \\ \frac{1}{2}v_{xx} & v_{xy} & \frac{1}{2}v_{yy} & v_x & 1+v_y & v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ xy \\ y^2 \\ x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

形函数矩阵为六行六列, 从而可逆. 值得注意的是, 虽然将形函数写作公式(9)的形式, x'^2 , $x'y'$, y'^2 并不是独立参量, 添加这些项的目的是使得形函数矩阵可逆, 而这是导出二阶反向高斯牛顿算法的关键.

采用正弦变形和单应性变换对二阶反向高斯牛顿

图 5 (网络版彩图)使用(a)一阶形函数和(b)二阶形函数的正向增量型高斯牛顿法

Figure 5 (Color online) Forward additive Gauss-Newton algorithm using (a) first-order and (b) second-order shape functions.

图 6 (网络版彩图)使用(a)一阶形函数和(b)二阶形函数的反向组合同型高斯牛顿法

Figure 6 (Color online) Inverse compositional Gauss-Newton algorithm using (a) first-order and (b) second-order shape functions.

算法的精度和速度进行验证. 正弦形式的变形为

$$x' - x = U(x) = bT \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right), \quad (10)$$

其中 $T = 250$, $b = 0.001, 0.002, \dots, 0.01$; 单应性变换为

$$\begin{bmatrix} \alpha x' \\ \alpha y' \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ p & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $p = 250$, $\alpha = 6 \times 10^{-5}, 7 \times 10^{-5}, \dots, 15 \times 10^{-5}$. 分别采用一阶正向增量型高斯牛顿法(FA-GN¹)、二阶正向增量型高斯牛顿法(FA-GN²)、一阶反向组合同型高斯牛顿法(IC-GN¹)和二阶反向组合同型高斯牛顿法(IC-GN²)进行计算. 正弦变形和单应性变换的计算误差和计算速度

分别如图7和8所示.

图7(a), (c)和图8(a), (c)表明, 随着变形量增大和子区增大, 一阶形函数(FA-GN¹和IC-GN¹)的计算误差快速增大, 而二阶形函数(FA-GN²和IC-GN²)对应的计算误差基本不变. 由于二阶形函数可以更精确描述子区变形, 其计算精度远高于一阶形函数. 图7(b), (d)和图8(b), (d)表明计算速度随着子区增大明显减小, 同时计算速度基本不随变形参数变化. 如果采用同阶形函数, 反向策略的速度要快于正向策略; 如果采用相同的策略, 一阶形函数的计算速度要快于二阶形函数.

综上所述, 二阶反向高斯牛顿算法计算精度比一阶反向高斯牛顿算法提升一个数量级, 计算速度则是正向高斯牛顿法的两倍. 所以, 在计算复杂变形时, 本

图 7 (网络版彩图)对于正弦变形四种算法的计算误差和计算速度. (a), (b) 固定子区大小为49像素×49像素, 不同变形参数 b 下计算误差和计算速度. (c), (d) 固定变形参数 $b=0.005$, 不同子区大小下计算误差和计算速度

Figure 7 (Color online) Displacement errors and computational speed of the four algorithms for the sinusoidal deformation image sets. (a), (b) The errors and speed as a function of parameter b with a fixed subset size 49 pixels×49 pixels. (c), (d) The errors and speed as a function of subset size with a fixed parameter $b=0.005$.

图 8 (网络版彩图)对于单应性变换四种算法的计算误差和计算速度. (a), (b) 固定子区大小为49像素×49像素, 不同变形参数 p 下的计算误差和计算速度. (c), (d) 固定变形参数 $p=0.0001$, 不同子区大小下的计算误差和计算速度

Figure 8 (Color online) Displacement errors and computational speed of the four algorithms for the sinusoidal deformation image sets. (a), (b) The errors and speed as a function of parameter p with a fixed subset size 49 pixels×49 pixels. (c), (d) The errors and speed as a function of subset size with a fixed parameter $p=0.0001$.

课题组提出的二阶反向高斯牛顿法是兼顾计算速度与计算精度的最佳选择.

2.3 高效高精度的左右匹配策略

在3D DIC中, 由于视角差异, 左右相机拍摄的图

片有明显不同. 因此, 为了实现高精度测量, 左右匹配应该使用二阶反向高斯牛顿算法(IC-GN²). 对于同一个序列的相关, 通常只有均匀变形, 所以一阶反向高斯牛顿法(IC-GN¹)足以确保测量精度^[15].

因此, 在3D DIC中通常有3种匹配策略. 第一种匹

配策略如图9(a)所示, 仅进行一次左右匹配, 即只在参考图的左右匹配时使用IC-GN². 随后, 变形左图与参考左图使用IC-GN¹, 变形右图与参考右图使用IC-GN¹进行相关. 第二种匹配策略如图9(b)所示, 所有图与参考左图进行相关匹配, 对于变形左图使用IC-GN¹算法与参考左图相关, 所有右图使用IC-GN²算法与参考左图相关. 第三种匹配策略如图9(c)所示, 参考左图与变形左图相关, 此时使用IC-GN¹算法; 同时, 变形左图与对应的变形右图进行相关, 此时左右匹配使用IC-GN²算法.

一阶形函数的优势在于速度, 二阶形函数的优势在于精度. 第一种策略中, 变形左图与参考左图匹配, 变形右图与参考右图匹配; 由于同组匹配相对变形较小, 即使使用一阶形函数也可以保证较高的精度. 由于视角影响变形较大的左右匹配仅在参考阶段进行一次, 可以在发挥二阶形函数高精度优势的同时降低对计算速度的影响. 综合而言, 第一种策略是综合考虑测量精度和速度的最佳选择.

3 数字散斑优化

提升数字图像相关的测量精度是研究者和应用者的不懈追求. 通过优化散斑图案质量提升测量精度是

当下研究的关键热点, 高质量散斑的生成依赖于客观可靠的散斑质量评价标准, 而散斑质量评价标准则基于对数字图像相关计算误差的深入分析. 因此, 针对插值偏差、散斑质量评价及数字散斑优化问题, 本课题组开展了一系列研究工作.

3.1 插值偏差

插值偏差(Interpolation Bias)是由于插值导致的数字图像相关测量的系统性误差, 通常由亚像素平移实验表征.

从较简单的一维情况入手. 如图10所示, 原始函数为 $h(x)$, 对原始函数采样得到参考序列 $f[n]$; 将原始函数沿 x 轴方向平移 u_0 单位得到平移函数 $h(x-u_0)$, 对平移函数采样得到目标序列 $g[n]$; 为得到亚像素测量精度, 需要对目标序列插值, 若插值基函数为 $\varphi(x)$, 则重构的平移函数为

$$g(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g[k]\varphi(x-k). \quad (12)$$

图10(e)显示了线性插值算法的插值基函数, 图10(f)为对应的重构函数. 由于插值误差的存在, 重构函数(图10(f))与平移函数(图10(c))存在明显差异, 这会导致数字图像相关测量的系统性误差, 称为插值偏差^[7].

模拟实验表明插值偏差随图像的亚像素平移量 u_0

图9 (网络版彩图)3D-DIC中的三种匹配策略. 红线表明立体匹配应该使用IC-GN²算法; 蓝线表明使用IC-GN¹算法. (a) 变形左图与参考左图相关, 变形右图与参考右图相关, 参考阶段左右相关. (b) 所有图片与参考左图相关. (c) 变形左图与参考左图相关, 同阶段左右相关

Figure 9 (Color online) Three kinds of strategies for the correlations in 3D-DIC. The red dashed lines indicate the stereo correspondence using IC-GN² algorithm and the blue lines indicate the correlation using IC-GN¹ algorithm. (a) Deformed left images correlate with the reference left image; deformed right images correlate with the reference right image; the reference right image correlate with the reference left image. (b) All images correlate with the reference left image. (c) Deformed left images correlate with the reference left image; at the same stage the right image correlates with the left image.

图 10 (网络版彩图)亚像素平移实验. (a) 参考函数 $h(x)$. (b) 参考函数在整数位置采样得到参考序列 $f[n]$. (c) 参考函数平移 u_0 单位得到平移函数 $h(x-u_0)$. (d) 平移函数在整数位置采样. (e) 线性插值基函数. (f) 线性插值对应的重构函数

Figure 10 (Color online) Subpixel translation experiment. (a) Reference function $f(x)$. (b) Reference sequence $f[n]$ by sampling reference function. (c) Translated function $f(x-u_0)$ by translating reference function u_0 unit. (d) Sampled values of translated function. (e) Interpolation basis function. (f) Reconstructed function by linear interpolation algorithm.

呈正弦形式变化, 其幅值由散斑图案和插值算法共同决定^[7]. 然而, 长期以来, 在理论上, 由于数学处理上的困难, 插值偏差的深层机制不明, 插值偏差的正弦形式无法被解释; 在实验上, 由于插值偏差难以从其他误差中分离, 故而缺乏有效的实验测量手段. 针对理论和实验中遇到的瓶颈, 本课题组开展了一系列研究.

考虑到插值偏差呈正弦形状, 本课题组基于傅里叶分析, 通过一系列数学推导, 获得了简单、有效的插值偏差解析表达式^[16].

$$e_b \approx C_b \sin 2\pi u_0, \quad (13)$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi} \frac{\int_{-1/2}^{1/2} E_{ib}(v) |\hat{h}(v)|^2 dv}{\int_{-1/2}^{1/2} v^2 \hat{\varphi}(v) |\hat{h}(v)|^2 dv},$$

$$E_{ib}(v) = (v-1)\hat{\varphi}(v-1) - (v+1)\hat{\varphi}(v+1) + \hat{\varphi}(v)\hat{\varphi}(v+1) + \hat{\varphi}(v)\hat{\varphi}(v-1),$$

其中 e_b 表示插值偏差, u_0 表示亚像素平移量, C_b 表示插值偏差的振幅, $\hat{\varphi}(v)$ 表示插值传递函数, $|\hat{h}(v)|^2$ 表示信号功率谱, $E_{ib}(v)$ 表示插值偏差核(Interpolation Bias Kernel). 值得强调的是, 插值偏差核在插值偏差分析中起核心作用.

图11(a1)–(c1)显示了半径分别为1.5、2.0及3.0像素的一维高斯散斑; 图11(a2)–(c2)显示了对应的理论估计与数值计算的插值偏差. 可以观察到, 理论估计与

数值模拟结果高度一致, 证明了理论模型的正确性. 同时, 可以观察到: 随着散斑半径的增大, 插值偏差减小; 对于相同的散斑图案, B样条和O-MOMS插值算法的插值偏差远小于Keys插值算法, 同时O-MOMS的插值偏差略小于B样条.

上述现象均可由本课题组提出的理论模型予以解释. 在公式(13)中, 插值偏差的振幅 C_b 主要由插值偏差核 $E_{ib}(v)$ 与图像功率谱 $|\hat{h}(v)|^2$ 乘积的积分决定. 图12显示了图11所示三种散斑的功率谱以及Keys、B样条和O-MOMS算法的插值偏差核. 随着散斑半径的增大, 空域的扩张导致频域的收缩, 从而更多的能量集中在低频区域, 而插值偏差核具有高通滤波的特性, 故而插值偏差减小(图12). 图像的能量通常集中在低频区域, 故而在低频区域插值偏差核的数值越小, 通常对应的插值偏差也就越小. 由图12可见, 在低频区域Keys插值算法的插值偏差核远大于B样条和O-MOMS算法, 从而Keys算法的插值偏差更大. 同时, 可以观察到O-MOMS算法的插值偏差核在低频区域略小于B样条算法, 故而对应的插值偏差也略小于B样条算法.

通过引入插值偏差核这一概念, 本课题组揭示了插值偏差的深层机制. 近来, 本课题组进一步分析了相关准则和亚像素匹配算法对插值偏差的影响, 指出了反向算法中梯度算子的重要作用^[17,18], 然而相关准则和匹配算法并没有改变问题的物理本质, 只是改变

图 11 (网络版彩图)一维模拟高斯散斑与插值偏差. (a1)–(c1)半径为1.5, 2.0及3.0像素的一维高斯散斑. (a2)–(c2)采用Keys, B样条和O-MOMS三种插值算法的插值偏差

Figure 11 (Color online) 1-dimensional Gaussian speckle patterns and corresponding interpolation biases. (a1)–(c1) 1-dimensional Gaussian speckle patterns with speckle radii 1.5, 2.0, and 3.0 pixels, respectively. (a2)–(c2) Interpolation biases using Keys, B-spline, and O-MOMS interpolation algorithm, respectively.

了插值偏差核的具体数学形式.

插值偏差的实验测量长久以来都是一个难题. 如果采用位移台进行机械平移, 必须严格保证相机光轴与试件表面垂直, 同时必须保证试件的移动方向与相机光轴垂直. 由于这些垂直性在实际实验中难以保证, 所以长久以来完整的插值偏差曲线不曾被实验测量.

为了解决插值偏差实验测量的难题, 本课题组提出了一种全新的平移方法: 电子平移^[8]. 将散斑图显示在显示器上, 通过散斑图在显示器上的整像素平移实现相机采集的亚像素平移. 具体过程如图13所示. 由于采用电子平移, 只需保证相机光轴与显示屏表面垂

直即可, 大大降低了实验难度.

在电子平移实验中, 三种半径不同的散斑图案被采用, 如图14(a1)–(c1)所示, 散斑直径约为4, 6及8个像素. 图14(a2)–(c2)显示了实验测量的亚像素平移曲线. 图14(a3)–(c3)绘制了实验测量的插值偏差以及根据理论(公式(13))估计的误差, 可以观察到理论模型有效估计了插值偏差.

电子平移为精度表征提供了一种全新的思路, 其具有极高精度, 不存在回程误差, 且能在物理上保证图像运动方向与屏幕平面一致. 可以预见, 电子平移技术不仅仅局限于插值偏差的测量, 由于其提供了一

图 12 (网络版彩图)一维模拟高斯散斑功率谱与插值偏差核

Figure 12 (Color online) Power spectrum and interpolation bias kernels.

图 13 (网络版彩图)实验原理图. (a) 实验装置图. (b) 散斑图案显示在电脑屏幕上, 然后通过图像处理软件对散斑图进行平移. (c) 电子平移的原理: 通过显示器上图像的整像素移动实现相机采集的亚像素移动

Figure 13 (Color online) Subpixel translation experiment. (a) Experiment set-up. (b) A speckle pattern was displayed on a computer screen, then the pattern was translated using an image processing software. (c) Schematic of the principle: integer pixel translation on the computer screen will introduce a subpixel position in the camera sensor plane.

个精确的基准, 故而可用于诸多测量方法的精度标定. 例如, 本课题组使用电子平移对镜头畸变进行了高精度标定^[19].

3.2 散斑质量评价

亚像素平移实验中, 数字图像相关的误差包括系统误差和随机误差. 对于反向高斯牛顿法, 系统误差即插值偏差^[20], 而随机误差根据邵新星等人的研究可

以表示为

$$\text{Var}(u_e) \approx \frac{\sigma_f^2 + \sigma_g^2}{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M (f_x[i, j])^2}, \quad (14)$$

其中 u_e 表示数字图像相关的计算误差, 由于图像噪声的随机性, u_e 是随机变量, 其标准差表征了随机误差的大小; σ_f 和 σ_g 分别是参考图和变形图的图像噪声标准差; M 是子区大小的一半; $f_x[i, j]$ 是参考图在 $[i, j]$ 处 x 方向的导数^[20].

传统的散斑质量评价参数着眼于降低随机误差, 所以倾向于使用细密的散斑. 然而过于细密的散斑会增大插值偏差, 导致实验效果不理想. 综合考虑系统误差和随机误差, 本课题组提出采用亚像素平移实验的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)表征散斑图案质量^[17]. 均方根误差表征了测量值和真实值之间的差异, 可以定义为

$$\text{RMSE}^2 = \text{Var}(u_e) + E(u_e)^2. \quad (15)$$

$\text{Var}(u_e)$ 是随机误差, 可由公式(14)进行估计; $E(u_e)$ 是系统误差, 对于反向算法即是插值偏差^[20], 可由3.1节的理论模型进行估计. 由于均方根误差与亚像素平移量相关, 本课题组提出了两个散斑质量评价参数: 均方根误差的最大值和均方根误差的平方平均

$$\begin{cases} V_1^2 = \max(\text{RMSE}^2), \\ V_2^2 = \text{mean}(\text{RMSE}^2) = \int_0^1 \text{RMSE}^2(u_0) du_0, \end{cases} \quad (16)$$

其中RMSE表示亚像素位置的均方根误差^[17].

为了验证提出散斑评价标准的优越性, 对如图15所示的十种散斑图案进行模拟实验, 其中图15(a)–(e)来源于本课题组的实验, 图15(f)–(g)来自DIC Challenge数据库. 图16显示了10种图片的自相关曲线和平均灰度梯度(Mean Intensity Gradient, MIG)^[21]. 传统观点认为平均灰度梯度越大, 散斑质量越好, 所以按照传统观点最优散斑应该是图15(b).

对原始图像分别添加标准差为2.55和1.80的高斯白噪声, 进行亚像素的平移计算, 得到散斑质量评价参数如图17所示. 可见虽然散斑2的灰度梯度大, 但是由于插值偏差很大, 所以总体效果不佳. 综合来说, 最优的散斑图案应该是图15(a)所示, 而非传统观点认为的图15(b).

图 14 (网络版彩图)(a1)–(c1) 散斑半径不同的三种散斑图案. (a2)–(c2) 数字图像相关计算的平移量. (a3)–(c3) 实验测量以及根据公式(13)估计的插值偏差

Figure 14 (Color online) (a1)–(c1) Correlation subsets of fine, medium and coarse patterns; (a2)–(c2) translations calculated by digital image correlation; (a3)–(c3) interpolation bias by digital image correlation and theoretical prediction by sinusoidal approximation using eq. (13).

图 15 (网络版彩图)散斑图案. (a)–(e) 来自本课题组实验. (f)–(j) 来自DIC Challenge数据库

Figure 15 (Color online) Speckle patterns, (a)–(e) from our daily experiment, (f)–(j) from the DIC Challenge Database.

图 16 (网络版彩图)散斑图案的(a)自相关和(b)平均灰度梯度. 散斑索引1-10对应图15中的(a)-(j)

Figure 16 (Color online) (a) Autocorrelation, (b) mean intensity gradient (MIG). Pattern index 1-10 corresponds to speckle patterns (a)-(j) in Figure 15.

图 17 (网络版彩图)散斑图案质量评价参数. (a) 噪声标准差2.55的结果. (b) 噪声标准差1.80的结果

Figure 17 (Color online) Speckle assessment parameters. (a) Results for noise standard deviation 2.55. (b) Results for noise standard deviation 1.80.

3.3 数字散斑优化

通过优化散斑图案提升测量精度是当前的研究热点. 但是, 由于散斑最优化问题的复杂性, 学者通常针对特定类型的散斑进行优化^[22,23]. 一种选择是图18所示的数字散斑, 其由位置完全随机分布的散斑基元组成, 数学形式可以表示为

$$h(x, y) = \sum_{k=1}^N \psi(x - x_k, y - y_k), \quad (17)$$

其中 $h(x, y)$ 是数字散斑的亮度, $\psi(x, y)$ 是散斑基元的亮度分布, (x_k, y_k) 是第 k 个散斑的中心位置. 数字散斑的统计特性由占空比、随机度等散斑生成参数表征, 这引出一个问题: 如何确定最优的散斑生成参数?

确定最优的散斑生成参数是一个相当复杂的问题, 因为必须考虑空间随机性. 空间随机性由散斑位置的随机性导致. 图18(a)和(b)所示的散斑图案统计性质完全相同, 然而由于散斑空间位置不同, 它们是不同的

散斑. 也就是说, 即使采用相同的散斑生成参数, 每次生成的散斑也是不同的.

空间随机性会导致系统误差和随机误差成为随机变量, 给理论分析带来困难. 因此, 长久以来并没有关于散斑优化的理论模型.

针对上述问题, 实验室开展了相关研究^[24]. 研究表明, 如果散斑中心位置完全随机, 那么数字散斑生成过程实际是一个过滤泊松过程(Filtered Poisson Process). 通过过滤泊松过程的相关性质可以得到系统误差的空间期望为

$$\begin{aligned} E\{e_b\} &\approx E\{C_b\} \sin 2\pi u_0, \\ E\{C_b\} &\approx \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} E_b(\omega_x, \omega_y) |\bar{\varphi}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \omega_x \bar{d}(\omega_x, \omega_y) \bar{\varphi}(\omega_x, \omega_y) |\bar{\varphi}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y}, \\ E_b(\omega_x, \omega_y) &= \bar{d}(\omega_x, \omega_y) [\bar{\varphi}(\omega_x - 2\pi, \omega_y) - \bar{\varphi}(\omega_x + 2\pi, \omega_y)], \end{aligned} \quad (18)$$

图 18 (网络版彩图)由随机分布的散斑基元组成的数字散斑. 这些散斑基元的中心位置是随机变量, 在一定空间均匀分布. 因此, 即使(a)和(b)所示的散斑图案统计参数完全相同, 由于散斑中心位置不同, 仍然是不同的散斑图案

Figure 18 (Color online) A schematic of speckle patterns which are composed of random positioned speckles. These speckles are randomly scattered over a region, and thus the speckle positions are random variables. Due to this spatial randomness, patterns shown in (a) and (b) are different, though the generation parameters are identical.

其中 e_b 为系统误差, C_b 表示系统误差的振幅, u_0 表示真实的亚像素平移量, $E_b(\omega_x, \omega_y)$ 是反向高斯牛顿法的插值偏差核, $\hat{\varphi}(\omega_x, \omega_y)$ 是变形图插值算法的插值传递函数, $\hat{d}(\omega_x, \omega_y)$ 是参考图梯度算子的幅值响应, $|\hat{\varphi}(\omega_x, \omega_y)|^2$ 是单个散斑的功率谱. 值得注意的是, 公式

(18)表明系统误差与散斑个数、散斑密度无关, 更多依赖于散斑基元本身的性质.

随机误差的空间期望可以近似为

$$E\{e_n\} \approx \frac{\sigma}{M\sqrt{q}} \left(1 + \frac{3}{4M^2q} \right), \quad (19)$$

$$q = \frac{\lambda}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{d}(\omega_x, \omega_y)|^2 |\hat{\varphi}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y,$$

其中, $\sigma^2 = \sigma_f^2 + \sigma_g^2$ 表征图像噪声量级, M 表示子区大小的一半, q 表示单个散斑的灰度梯度平方和, λ 表示散斑密度.

为验证理论分析的正确性, 采用二维高斯散斑进行数值模拟. 图19显示了不同散斑半径下的系统误差、随机误差和均方根误差, 其中理论结果由公式(18)和(19)计算得出. 可见理论结果与数值模拟结果获得了较好的一致性. 当散斑较小时, 系统误差起主要作用. 随着散斑尺寸的增大, 系统误差减小, 随机误差增大. 当散斑较大时, 随机误差起主要作用, 系统误差的影响可以忽略不计. 因此, 存在一个最优的散斑半径, 使得总误差最小, 即3.2节的散斑质量评价参数最小.

根据对系统误差和随机误差的理论分析, 可以得到散斑评价参数的解析表达式, 进一步可以推导出最

图 19 (网络版彩图)散斑半径为(a) $R = 1.3$, (b) $R = 1.5$, (c) $R = 2.0$ 和 (d) $R = 3.0$ 情况下高斯散斑的系统误差 e_b , 随机误差 e_n 和均方根误差 e_r . 理论估计根据公式(18)和(19). 数值结果的波动是由于空间随机性

Figure 19 (Color online) Systematic errors e_b , random errors e_n , and root mean squared errors e_r of Gaussian speckle patterns with speckle radii (a) $R = 1.3$, (b) $R = 1.5$, (c) $R = 2.0$, and (d) $R = 3.0$. The theoretical estimates are evaluated using eqs. (18) and (19). The variability of the numerical results is due to the spatial randomness.

优的散斑半径满足方程

$$E\{C_b\} \frac{dE\{C_b\}}{dR} - \frac{\sigma^2}{M^2 q^2} \left(1 + \frac{4}{M^2 q} \right) \frac{dq}{dR} = 0, \quad (20)$$

其中, 系统误差的期望 $E\{C_b\}$ 由公式(18)给出, q 由公式(19)给出, R 是散斑半径. 如果采用的是高斯散斑

$$\psi(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right), \quad (21)$$

上述公式可以近似为

$$\begin{aligned} & \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} E_b(\omega_x, \omega_y) \tilde{\psi}^2(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y \\ & \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} E_b(\omega_x, \omega_y) \tilde{\psi}(\omega_x, \omega_y) \frac{d\tilde{\psi}(\omega_x, \omega_y)}{dR} d\omega_x d\omega_y \\ & + \frac{8\pi^6 \sigma^2 R}{\rho M^2} = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

公式(22)可以通过数值方法进行求解.

图20显示了不同散斑半径下理论估计与数值模拟得到的散斑质量评价参数, 可以观察到理论与数值结果获得了较好的一致性. 同时, 理论模型可以有效确定最优的散斑尺寸.

4 基于预标定的二维DIC补偿技术

相对于三维DIC, 二维DIC实验要求更加简单, 然而传统的二维DIC对离面位移和面外旋转非常敏感, 使得其测量精度难以保证. 有学者提出使用补偿法提升二维DIC的精度^[25]. 然而, 传统的补偿法对图像噪声敏感所以随机误差很大. 此外, 传统的补偿法要求初始情况下光轴必须与试件表面垂直, 而在实际情况下垂直性通常难以精确保证. 针对上述问题, 本课题组提出了两种新的补偿策略^[26,27].

4.1 畸变预标定

离面位移和面外旋转会降低二维DIC的测量精度. 采用图21所示的补偿板可以补偿离面位移和面外旋转引起的虚位移. 对于补偿板上的 (x_{ci}, y_{ci}) , 其虚位移可以近似为^[25]

$$\begin{aligned} u_{ci} &= a_0 + a_1 x_{ci} + a_2 y_{ci} + a_3 x_{ci}^2 + a_4 x_{ci} y_{ci} \\ &+ k_1 [x'_{ci} (x'^2_{ci} + y'^2_{ci}) - x_{ci} (x_{ci}^2 + y_{ci}^2)], \\ v_{ci} &= b_0 + b_1 x_{ci} + b_2 y_{ci} + b_3 x_{ci} y_{ci} + b_4 y_{ci}^2 \\ &+ k_1 [y'_{ci} (x'^2_{ci} + y'^2_{ci}) - y_{ci} (x_{ci}^2 + y_{ci}^2)], \end{aligned} \quad (23)$$

图 20 (网络版彩图)散斑图案质量评价参数与散斑半径之间的关系: (a) 子区大小 $M=31$, 散斑占空比50%. (b) 子区大小 $M=31$, 散斑占空比80%. (c) 子区大小 $M=91$, 散斑占空比50%. (d) 子区大小 $M=91$, 散斑占空比80%. 最优散斑半径根据公式(20)计算

Figure 20 (Color online) Relationship between pattern quality measure and speckle radius: (a) subset size $M=31$, speckle coverage 50%; (b) subset size $M=31$, speckle coverage 80%; (c) subset size $M=91$, speckle coverage 50%; (d) subset size $M=91$, speckle coverage 80%. The optimal speckle radii R_{opt} are evaluated using eq. (20).

图 21 (网络版彩图)补偿法示意图

Figure 21 (Color online) Schematic map showing the principle for compensation.

其中 (u_{ci}, v_{ci}) 表示补偿板上 (x_{ci}, y_{ci}) 点的虚位移, a_0 和 b_0 是面内位移分量, $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ 是离面位移分量, k_i 是镜头畸变参数. 公式(23)中有11个未知参数, 所以需要至少6个点的对应信息. 但是, 由于实验中存在噪声, 会导致拟合参数的剧烈波动, 尤其是镜头畸变参数 k_i . 考虑到 k_i 表征的是镜头畸变, 其具体数值应当为常数.

为此, 实验室提出了一种改进的补偿方法^[26]: 通过预先标定确定参数镜头畸变 k_i , 然后认为在实验过程中 k_i 为常数. 这样不仅可以简化计算, 更可以提高测量精度. 为了验证改进补偿法的效果, 本课题组比较了二维DIC, 三维DIC, 传统补偿方法(C0)和改进补偿方法(C1)的测量精度.

拉伸实验装置如图22所示, 采用两个相机, 其中左相机垂直于试件表面, 两个相机夹角约为 20° . 补偿板与试件之间用快固化环氧胶粘剂(AB胶)进行连接. 图23(a)显示了应变片和四种DIC方法测量的应变. 由于应变片精度很高, 可以认为是真实值. 图23(b)显示了二维DIC, 三维DIC, 传统补偿法C0和改进补偿法C1的计算误差. 可见由于离面位移和面外旋转的影响, 二维DIC的测量误差远远大于其他三种方法. 图23(c)显示了四种DIC方法应变计算误差的均值与标准差. 图23(d)显示了分别以应变片和3D DIC为基准, 四种DIC算法应变计算结果的均方根误差. 可以看出相对于传统的补偿法($RMS=23 \times 10^{-6}$), 改进补偿法具有更高精度($RMS=15 \times 10^{-6}$).

4.2 标记点补偿

传统的补偿方法要求初始情况下试件与相机光轴垂直, 而在实际实验中, 绝对的垂直性难以实现. 因此, 本课题组提出了基于标记点的补偿方法^[27].

标记点补偿法与传统补偿法的比较如图24所示.

图 22 (网络版彩图)实验装置图, 包括拉伸机, PMLAB DIC-3D测量系统以及应变计. 左相机垂直于试件放置, 两个相机之间的夹角约为 20°

Figure 22 (Color online) The experimental setup with a tensile machine, a PMLAB's DIC-3D measurement system and a strainometer. The left camera was placed vertically to the specimen while the two cameras were mounted at an angle of about 20° .

图 23 (网络版彩图)拉伸实验结果与统计分析. (a) 应变片和四种DIC方法测量的应变. (b) 以应变片结果为基准, 四种DIC方法的测量误差. (c) 四种DIC方法应变计算误差的均值与标准差. (d) 分别以应变片和3D DIC为基准, 四种DIC算法应变计算的均方根误差

Figure 23 (Color online) The results and statistical analyses of the tensile experiment. (a) Strain results measured by the strain gauge and the four DIC methods. (b) Strain errors compared with the results measured by the strain gauge for the four DIC methods. (c) The mean values and standard deviations of the strain errors. (d) The RMS errors of the strain results compared with the results measured by the strain gauge and by 3D DIC, respectively.

标记点补偿法的实验流程如下: (1) 通过预标定获得相机的内参和镜头的畸变参数; (2) 使用刚性的补偿板, 板上有位置已知的标记点, 补偿板被黏附在试件上; (3) 试件的刚体位移可以通过补偿点坐标经由坐标变换得到.

图 24 (网络版彩图)传统补偿法和标记点补偿法. (a) 已有的补偿法. 补偿板上预制了散斑图案. (b) 提出的标记点补偿法. 补偿板上黏附了位置确定的标记点

Figure 24 (Color online) Principles for the two compensation methods. (a) The existing compensation method. The compensation panel is marked with speckle patterns. (b) The proposed compensation method. The compensation panel is marked with several markers located at known positions.

为了验证测量精度, 进行了拉伸实验, 实验装置如图25所示. 分别采用三维DIC, 传统二维DIC和基于标记点补偿的二维DIC计算引伸计L0和L1在拉伸实验中的线应变, 结果显示在图26和图27中. 实验表明, 标记点补偿法比传统补偿法具有更高的精度.

标记点补偿法的更大优势在于, 该算法适用于比较大的刚体位移: 即使对于离面变形达到百分之几、离面旋转达到十几度的极端情况, 标记点补偿法都是适用的.

5 生物医学的应用

数字图像相关技术由于具有设备简单、测量精度高、全场测量等一系列优势, 所以特别适用于工程应用. 近年来, 本课题组将数字图像相关技术应用于生物医学领域.

5.1 颅颌面手术导航

拥有健康整齐的牙齿是每个人的心愿, 然而某些牙齿不齐的症状必须通过颅颌面手术矫正. 传统的地包天、天包地矫正, 都属于颅颌面手术中的正颌手术. 该类手术的一般流程分为以下三步: (一) 对颅骨进行CT或MRI扫描, 建立颅骨的三维模型. (二) 术前手术规划, 确定截骨线及手术方案. (三) 进行手术, 术中主要操作包括截骨、就位、缝合. 该手术的难点在于根据医生术前规划将骨块精确的移动到术前设计位置. 目前主流的红外导航系统面临着: 小型物体安装支架困难、无法实时跟踪位姿等问题. 因此, 本课题组考虑

图 25 (网络版彩图)实验装置. 右上角插图是参考图

Figure 25 (Color online) Experimental setup. The inset in the right top is the reference image.

图 26 (网络版彩图)引伸计L0在拉伸实验中的线应变. (a) 通过三维DIC, 传统二维DIC和补偿后的二维DIC得到的线应变. (b) 与三维DIC相比, 线应变的计算误差

Figure 26 (Color online) Line strains for extensometer L0 during the tensile experiment. (a) Line strains measured by 3D DIC, 2D DIC (before compensation), and after compensation. (b) Line strain errors compared with 3D DIC.

图 27 (网络版彩图)引伸计L1在拉伸实验中的线应变. (a) 通过三维DIC, 传统二维DIC和补偿后的二维DIC得到的线应变. (b)与三维DIC相比, 线应变的计算误差

Figure 27 (Color online) Line strains for extensometer L1 during the tensile experiment. (a) Line strains measured by 3D DIC, 2D DIC (before compensation), and after compensation. (b) Line strain errors compared with 3D DIC.

使用三维数字图像相关中的离散标记点跟踪技术来进行术中导航^[28].

图28显示了颅颌面手术导航的示意图. 首先, 医生通过CT构建患者的颅骨坐标 S_{ct_skull} , 根据手术计划确

图 28 (网络版彩图) 颌颌面手术导航示意图

Figure 28 (Color online) The scheme of the navigation system for orthodontics surgery.

定目标位置 S_{ct_tar} . 第二步, 在手术刚开始时, 将 CT 坐标系映射到导航坐标系. 第三步, 实时追踪颅骨的位置 S_{n_skull} , 然后计算上颌骨在导航坐标系中实时的目标位置 S_{n_tar} . 第四步, 比较目标位置 S_{n_tar} 和当前位置 S_{n_rt} , 通过闭环控制将上颌骨导航到目标位置. 如图 29 所示, 将四个标识点黏附在 3D 打印的上颌骨模型表面, 通过这四个标记点可以完全确定 CT 坐标系和颅骨坐标系之间的关系.

图 30 显示了静止情况下标记点 p3 在 20 FPS 下 60 s 内的位移噪声, 可见 z 方向位移噪声要大于 x 和 y 方向, 噪声量级最大在 $1 \mu\text{m}$ 左右. 为进一步验证该方法的测量精度, 使平移台沿 x, z 方向平移和沿 y 轴旋转. 沿 x, z 方向平移情况下每次位移量为 0.5 mm ; 沿 y 轴旋转情况下每次旋转角度为 0.5° . 图 31 所示的实验结果表明导航系统的精度可达 0.03 mm , 完全满足临床手术的需求.

本课题组正与北京大学口腔医院以及山东大学开展进一步的合作, 争取早日将本技术用于临床实践.

5.2 脉搏测量

脉诊是中医最具有特色的诊断方法, 在传统的脉

图 29 (网络版彩图) 实时追踪的目标是有标记点的 3D 打印上颌骨模型. 为了测量导航系统的精度, 采用了可以沿 x, z 方向平移和沿 y 轴旋转的位移台

Figure 29 (Color online) A 3D-printed maxilla segment model with markers is chosen as the tracking object. A manual translation stage which can move along x, z direction and rotate about y axis is used to measure the accuracy of the navigation system.

诊过程中, 医生通过三根手指不断调节手指的压力, 来感受手腕区域三个穴位, 即“寸、关、尺”的脉搏跳动情况. 脉诊素来有“心中易了, 指下难名”的说法. 其需要长时间的训练和丰富的经验, 要准确掌握和运用有着相当的难度. 因此, 本课题组提出采用数字图像相关方法对脉搏进行测量^[29].

实验平台的示意图如图 32(a) 所示, 图 32(b) 为实拍图, 其测量的噪声在图 32(c) 中显示. 在实验平台搭建时, 若要模拟传统脉诊过程中使用不同指压来获得脉搏信号的反馈, 则首先需要保证对于穴位施加压力时, 相机不能被施压物体所遮挡, 因此只能使用透明物体施加压力. 本课题组使用一个塑料气袋进行施压, 为减少气袋对于散斑清晰成像的影响, 透明塑料膜的厚度仅为 0.3 mm .

图 33 展示了一组一定参数下脉搏波形的计算结果. 设置采集时间为 2.5 s , 子区大小为 29, 图像数量为 1180 张, 网格点间距为 7 像素, 压力为 60 mmHg . 图 33(a) 表示了三个穴位的位置及计算区域. (b) 为三个穴位在

图 30 (网络版彩图) 采样频率为 20 FPS 情况下 60 s 内导航系统在 (a) x, (b) y 和 (c) z 方向的测量噪声

Figure 30 (Color online) Records of 3D-coordinates noise in (a) x, (b) y, (c) z direction within 60 s at 20 FPS.

图 31 (网络版彩图) (a)–(c) DIC导航系统测量和平台显示的位移量. (d)–(f) DIC与平台结果的差

Figure 31 (Color online) (a)–(c) denote the offset for stereo-based DIC navigation system (p1, p2, p3, p4) and the translation stage (standard). (d)–(f) show the error compared to the offset of translation stage.

图 32 (网络版彩图) 脉搏信号测量系统和实验测量的噪声量级. (a) 测量系统示意图. (b) 测量系统实拍图. 透明的气囊用于提供压力, 同时保证清晰成像. 有机玻璃盒子用于限制气囊, 从而保证气囊与皮肤的紧密接触. (c) 测量噪声的量级. 没有气囊情况下图像具有更高的对比度, 从而测量噪声更小. 不过考虑到有气囊情况下波动范围小于3%, 我们认为精度对于脉搏测量是足够的

Figure 32 (Color online) Pulse signal acquisition device and noise floor measurement experiment. (a) A sketch map of components of the system. (b) The real pulse acquisition device. Transparent air bag was used to provide pressure while ensuring clear imaging. Acrylic box was used to restrict the air bag and keep tight contact between skin and the air bag. (c) Results of the noise floor measurement. The captured image without shelter (right in the figure) has a higher contrast, thus leading to a smaller noise compared to the other group. We think it is tolerable for pulse signals acquisition, because the noise standard deviation is less than 3% of the amplitudes of the fluctuations in the following analysis.

2.5 s内的波形图. (c)–(f)分别对应于一个周期内不同时刻下 z 方向位移的分布图, 这些时刻在(b)图中标识.

医生使用不同的指压来获得脉搏信号的反馈, 故研究不同压力下的脉搏信号, 实验中选取振幅与压力数据进行分析. 如图34(a)所示, 压力范围为10–

120 mmHg, 采样间隔为5 mmHg. 脉搏跳动的幅度随着压力而变化. 起初脉搏振幅随着压力增大, 至极大值后快速跌落至零. 使得“寸、关、尺”到达各自极大值的对应压力不同, 分别为60, 75和90 mmHg. 对于寸穴, 其压力要小于尺穴. 图34(b)–(d)描绘了当全局压力

图 33 (网络版彩图)在 60 mmHg 压力下脉搏的离面位移. (a) 图像中“寸、关、尺”穴的位置. (b) 脉搏波形. (c)–(f) 图 (b) 标识的不同时刻脉搏的全场离面位移

Figure 33 (Color online) Full-field 3D reconstruction for Z-displacements of pulse fluctuations under global pressure 60 mmHg. (a) positions of “Cun Guan Chi” in the captured image. (b) Pulse signals wave form. (c)–(f) Displacement maps for different moments marked with dashed line in (b), which shows displacements map at wave crest.

为 30, 75 和 90 mmHg 时的位移场和波形(图 33(d) 描述了压力为 60 mmHg 时的位移场). 这四种情况表明随着压力增大, 脉动的最大值从寸穴移至尺穴. 这验证了传统中医中“寸浮尺沉”的说法, 也就是说为了达到最大搏动幅度, 通常尺穴比寸穴需要更大的压力.

本课题组通过现代光测技术, 实现了脉搏变形全场测量, 验证了传统中医“寸浮尺沉”的观点, 推动了中医的数字化、科学化.

6 剪切带跳跃的局域塑性失稳现象

合金在成型或服役等条件下会产生局域塑性失稳现象, 在应力-应变曲线出现锯齿形屈服, 或导致材料表面粗糙化、疲劳寿命缩短和延展性降低, 大大限制了合金材料在汽车、航空、航天等工业上的应用. 其微观机制被认为是动态应变时效, 即位错和溶质原子间的相互作用, 但微观机制和宏观变形的联系尚未明确. 主要是因为局域塑性失稳变形复杂, 应变梯度高, 变形范围大, 难以精确全场测量. 本课题组针对合金材料局域塑性失稳的多尺度实验技术开展了十余年的

图 34 (网络版彩图)不同压力下脉搏振幅分析. 为了获得最大振幅, 通常“尺”穴比“寸”穴需要更大的压力, 这与传统中医中“寸浮尺沉”的说法一致. (a) 不同压力下的振幅曲线. “寸、关、尺”三个穴位达到最大振幅所需的压力是不同的, 分别为 60, 75 和 90 mmHg. (b) 30 mmHg 压力下的全场位移和波形. (c) 75 mmHg 压力下的全场位移和波形. (d) 90 mmHg 压力下的全场位移和波形

Figure 34 (Color online) Amplitude analysis of pulse signals under different global pressures. Larger pressure is usually applied at “Chi” acupoint than that of the “Cun” acupoint to obtain maximum amplitude, which is agreed with the viewpoint in TCM. (a) Curve of amplitude related with pressure. the global pressures are different when the amplitudes of “Cun, Guan, Chi” reaches their maximum, and are 60, 75 and 90 mmHg, respectively; (b) the displacement map and signal waveforms under pressure 30 mmHg; (c) the displacement map and signal waveforms under pressure 75 mmHg; (d) the displacement map and signal waveforms under pressure 90 mmHg.

图 35 实验测量光路图

Figure 35 A schematic illustration of the experimental setup.

研究.

本课题组在世界上首次将数字图像相关方法用于测量局域高应变梯度Portevin-Le Chatelier (PLC)带^[30], 并首次将高速数字图像相关法用于测量PLC带的瞬态萌生、演化^[31]. 其实验装置如图35所示. 分别通过数字散斑干涉法(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)和数字图像相关法测量铝合金拉伸变形. 通过DSPI实时观察变形, 当出现PLC带时, 触发高速相机开始采集, 然后通过数字图像相关计算变形.

通过使用高速相机, 观察到了PLC带的瞬态萌生和演化过程. 在图36(a)中, 还未出现PLC带. 在图36(b)中, PLC带开始萌生, 但是PLC带并不完全. 随后PLC带逐渐发展, 经过图36(c)最终在图36(d)形成了一条完整的PLC带. 这是世界上首次观测到PLC带的萌生和演化过程.

近些年来, 光力学实验室开发了商用DIC软件PMLAB DIC-3D. 该软件的研发进一步促进了本课题组对PLC效应的研究^[32-34].

传统对PLC效应的观测仅仅局限于试件正面, 而且往往简化为一个平面应力问题. 本课题组近来使用两套正交的DIC系统观察PLC效应, 表明平面应力假设并不成立^[32].

实验装置如图37所示, 通过两套二维数字图像相关系统分别测量试件的正面和侧面. 图38(a)和(c)标识了具有相同y坐标的4个测量点. 图38(b)和(d)显示了轴向应变(P1和P3)以及局部应变率(P2-P4). 无论在正面还是侧面, 加载曲线均呈阶梯状变化, 表明在厚度方向应变局域化也是关键特征. 在P1和P3点的局部应变率(图38(b))表明在厚度方向局域化效应更强烈. 进一步的, 图38(d)表明时域应变率演化对于侧面的三个观测点均是相似的. 图39显示了正面(图39(a)-(d))和侧面(图39(e)-(h))的位移场分布. 实际上, 在正面, PLC带的

图 36 一个B型PLC带在演化过程中轴向累积应变的空间分布. (a) $\Delta t = 666$ ms, (b) $\Delta t = 668$ ms, (c) $\Delta t = 670$ ms, (d) $\Delta t = 674$ ms

Figure 36 Spatial distributions of axial cumulative strain of a type B PLC band during the growth of the band. (a) $\Delta t = 666$ ms, (b) $\Delta t = 668$ ms, (c) $\Delta t = 670$ ms, (d) $\Delta t = 674$ ms.

上端和下端沿不同的方向滑移(图39(b)和(c)); 在侧面, 局域变形的区域是轴对称的(图39(e)和(f)). 图像表明在正面应变局域化区域为带, 而在侧面表现为一个椭圆. 根据上述结论, PLC带的变形模式可以获得. 如图38(d)所示, 正向的变形可以表征为剪切叠加上小幅的滑动. 在侧面, 局域区域的变形可以表征为双轴压缩.

图 37 (网络版彩图) DIC 测量系统的原理图, 该系统包括两个使用 50 mm 镜头经过同步的相机和同步触发器。电脑 1 用于控制加载, 电脑 2 用于采集变形图片和进行相关计算

Figure 37 (Color online) Schematic of the DIC system consisting of two synchronized cameras with standard f50-mm lens, a collection trigger. PC-1 is used to control the loading process, while PC-2 is used to capture the deformed images and perform correlation calculations.

本课题组发展动态数字散斑干涉法和数字图像相关法, 解决局域大塑性全场动态测量难题, 并将这些方法引入到锯齿型塑性失稳的研究中。这些实验测量结

果首次直观地展示局域变形带细致的动态变形特征, 拓宽和加深了对锯齿型塑性失稳的认识。

7 图像光学相关动态位移与应变测量

振动的测量对分析试件的振型有重要的意义。本课题组负责人张青川教授通过使用液晶显示屏, 提出了一种新的散斑图像光学相关动态位移与应变测量方法^[35]。

该动态散斑相关方法的原理如图 40 所示。通过激光照亮粗糙物体的表面。散射光场在空间中形成散斑场。在传统方法中, 当物体不动时, 通过照相版记录散斑图案, 然后在曝光完成后替代原来的散斑场。张青川教授提出通过液晶显示屏替代照相版, 并将液晶显示器平移, 使测得的散斑图光学自相关曲线到图 40 中 Q 点所示的位置。变形前的散斑图(记录显示在液晶显示屏上)与变形后的空间动态散斑图的相关运算以光学的方式进行后, 以光强的方式被探测器 D 记录, 从而实现了极高速的散斑图相关计算。这样情况下, 试件的位移值同亮度的变化成正比, 通过测量亮度的变化即可反算位移场。

图 38 (网络版彩图) (a), (c) DIC 计算区域和 4 个测量点(P1-P4)。 (b) P1 和 P3 点轴向应变的时序曲线。 (d) P2-P4 测量点局部应变率的演化

Figure 38 (Color online) (a), (c) Schematic showing selected points (P1-P4) and regions where DIC calculations were performed; (b) temporal curves of the axial strain corresponding to P1 and P3; (d) evolution of the local strain rate corresponding to the three points shown in (c).

图 39 (网络版彩图)在试件正面((a)–(d))和侧面((e)–(h))的位移场. (a), (e)位移云图. (b), (f)位移等高线. (c), (g)向量场. (d), (f)正面和侧面的变形模式

Figure 39 (Color online) Results for the widthwise ((a)–(d)) and thickness ((e)–(h)) planes showing the resultant displacement: (a), (e) mappings; (b), (f) contours; (c), (g) vector fields; (d), (h) schematic showing deformation mode in the widthwise and thickness planes, respectively.

图 40 散斑相关原理. O: 振动物体, H: 空间阴影滤波器, L: 镜头, D: 图像探测器

Figure 40 Principle of speckle correlation. O: vibrating object, H: spatial shadow filter, L: lens, D: photo-detector.

在此基础上, 张青川教授进一步发展了双通道的动态振动测量仪和动态应变测量仪^[36,37].

8 结论

本文总结了中国科学技术大学光力学实验室在数

字图像相关领域的理论研究及应用进展. 在基础研究方面, 实验室建立了形函数误差的理论模型与估计算法, 提出了保证测量精度的子区尺寸选取准则; 提出了二阶反向高斯牛顿算法; 提出了左右系列变形图匹配的优化策略; 揭示了插值偏差的深层机制并建立了实验测量手段, 提出了综合考虑系统误差和随机误差的散斑质量评价标准, 建立了散斑尺寸优化的理论模型; 发展了基于预先标定的二维数字图像相关补偿技术. 在应用方面, 建立了实时的颅颌面手术导航系统; 研发了高速全场的脉搏测量系统; 通过高速数字图像相关技术首次观察到剪切带的萌生和演化过程, 证明了带外收缩现象的存在; 通过相互正交的两套数字图像相关系统首次观察到厚度方向的应变局域化现象; 研制了动态振动和应变测量仪; 研究开发三维数字图像相关通用软件包和硬件系统, 为国内高校、研究所和工程单位提供了有效的科研分析方法和工程测量手段.

未来, 实验室将面向科技前沿和国家重大需求, 进一步发展和应用光测实验技术, 服务于国计民生.

致谢 感谢国家自然科学基金委和中国科学技术大学长期以来对光力学实验室的支持. 感谢实验室创建者伍小平院士长期的关怀和指导. 感谢光力学实验室毕业生高越、徐小海、蔡玉龙、薛远对本文所做的贡献.

参考文献

- 1 Wu X P, He S P, Li Z C. Movement of space speckle (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 1980, 29: 1142–1150 [伍小平, 何世平, 李志超. 空间散斑的运动规律. *物理学报*, 1980, 29: 1142–1150]
- 2 Wu X P, He S P, Li Z C. Movement of space speckle (continued) (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 1983, 32: 973–981 [伍小平, 何世平, 李志超. 空间散斑的运动规律(续)—物表面位移微分量的影响. *物理学报*, 1983, 32: 973–981]
- 3 Xu B Q, Li L, Wu X P. Fatigue detection based on the change of laser-produced diffraction patterns (in Chinese). *Appl Laser*, 1986, 6: 210–212 [续伯钦, 李力, 伍小平. 利用激光衍射谱变化作疲劳检测. *应用激光*, 1986, 6: 210–212]
- 4 Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge. *J Phys E-Sci Instrum*, 1981, 14: 1270–1273
- 5 Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt Eng*, 1982, 21: 213427
- 6 Pan B, Li K, Tong W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations. *Exp Mech*, 2013, 53: 1277–1289
- 7 Schreier H W, Braasch J R, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Opt Eng*, 2000, 39: 2915–2921
- 8 Gao Z, Xu X, Su Y, et al. Experimental analysis of image noise and interpolation bias in digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2016, 81: 46–53
- 9 Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Exp Mech*, 2000, 40: 393–400
- 10 Schreier H W, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Exp Mech*, 2002, 42: 303–310
- 11 Xu X, Su Y, Zhang Q. Theoretical estimation of systematic errors in local deformation measurements using digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2017, 88: 265–279
- 12 Xu X, Su Y, Cai Y, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC. *Exp Mech*, 2015, 55: 1575–1590
- 13 Baker S, Matthews I. Equivalence and efficiency of image alignment algorithms. In: *Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, 2001, CVPR 2001, 1: 1090–1097
- 14 Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. New York: Springer Science & Business Media, 2009
- 15 Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement. *Opt Lasers Eng*, 2015, 65: 73–80
- 16 Su Y, Zhang Q, Gao Z, et al. Fourier-based interpolation bias prediction in digital image correlation. *Opt Express*, 2015, 23: 19242
- 17 Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors. *Opt Lasers Eng*, 2016, 86: 132–142
- 18 Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Interpolation bias for the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2018, 100: 267–278
- 19 Gao Z, Zhang Q, Su Y, et al. Accuracy evaluation of optical distortion calibration by digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2017, 98: 143–152
- 20 Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2015, 71: 9–19
- 21 Su Y, Zhang Q, Gao Z. Statistical model for speckle pattern optimization. *Opt Express*, 2017, 25: 30259–30275

- 22 Pan B, Lu Z, Xie H. Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation. [Opt Lasers Eng](#), 2010, 48: 469–477
- 23 Chen Z, Shao X, Xu X, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency. [Appl Opt](#), 2018, 57: 884
- 24 Lecompte D, Sol H, Vantomme J, et al. Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation. In: Proceedings of SPIE. Nimes: SPIE, 2006. 63410E
- 25 Pan B, Yu L, Wu D. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses: Implementation of a generalized compensation method. [Meas Sci Technol](#), 2014, 25: 025001
- 26 Xu X, Zhang Q, Su Y, et al. High-accuracy, high-efficiency compensation method in two-dimensional digital image correlation. [Exp Mech](#), 2017, 57: 831–846
- 27 Lv Z, Xu X, Yan T, et al. High-accuracy optical extensometer based on coordinate transform in two-dimensional digital image correlation. [Opt Lasers Eng](#), 2018, 100: 61–70
- 28 Xue Y, Cheng T, Xu X, et al. High-accuracy and real-time 3D positioning, tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation. [Opt Lasers Eng](#), 2017, 88: 82–90
- 29 Xue Y, Su Y, Zhang C, et al. Full-field wrist pulse signal acquisition and analysis by 3D digital image correlation. [Opt Lasers Eng](#), 2017, 98: 76–82
- 30 Zhang Q, Jiang Z, Jiang H, et al. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: an experimental study with digital speckle pattern metrology. [Int J Plast](#), 2005, 21: 2150–2173
- 31 Xiang G F, Zhang Q C, Liu H W, et al. Time-resolved deformation measurements of the Portevin-Le Chatelier bands. [Scripta Mater](#), 2007, 56: 721–724
- 32 Cai Y L, Yang S L, Wang Y H, et al. Characterization of the deformation behaviors associated with the serrated flow of a 5456 Al-based alloy using two orthogonal digital image correlation systems. [Mater Sci Eng-A](#), 2016, 664: 155–164
- 33 Cai Y, Zhang Q, Yang S, et al. Experimental study on three-dimensional deformation field of Portevin-Le Chatelier effect using digital image correlation. [Exp Mech](#), 2016, 56: 1243–1255
- 34 Cheng T, Xu X, Cai Y, et al. Investigation of Portevin-Le Chatelier effect in 5456 Al-based alloy using digital image correlation. [Opt Lasers Eng](#), 2015, 65: 89–92
- 35 Zhang Q, Toyooka S, Kadono H. Dynamic speckle correlation method using liquid crystal TV panel for vibration analysis of light weight structure. [Opt Commun](#), 1992, 89: 126–130
- 36 Zhang Q C, Toyooka S, Kadono H. Multiple dynamic speckle correlation method with a LCTV panel. [Opt Commun](#), 1993, 96: 195–201
- 37 Zhang Q C, Toyooka S, Yamaguchi I. Dynamic strain measurement by optical speckle correlation method using LCTV panels. [Opt Commun](#), 1993, 101: 133–138

Progress in digital image correlation method

SU Yong, ZHANG QingChuan^{*} & WU XiaoPing

CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Photomechanics Laboratory in the University of Science and Technology of China has concentrated on principles and applications of digital image correlation (DIC) recent years. Photomechanics Laboratory not only has improved the accuracy and efficiency of DIC but also has achieved research findings on speckle pattern standardization, compensation method for 2D DIC, biomedical engineering, and serrated yielding phenomenon. This paper provides a review: (1) a theoretical model and an estimation algorithm were presented for shape function error in local deformations, and a subset size chosen criterion was presented to ensure the measurement performance; inverse compositional Gauss-Newton method using second order shape function was presented, which is two-times faster than the traditional method. (2) The inherent nature of interpolation bias was revealed, an experimental approach was developed to measure the interpolation bias, a speckle pattern assessment that considering the effects of both the systematic error and random error was presented, and a theoretical model for the speckle pattern optimization was built. (3) Compensation methods for 2D DIC based on pre-calibration were presented. (4) A system for orthognathic surgery navigation was built; full-field pulse vibration measurement system was developed. (5) The emergence and evolution of PLC band was observed, and the phenomenon of out-of-band shrink is found. The strain localization in the width-wise direction was observed using two 2D DIC systems. (6) The vibration and strain were dynamically measurement using the speckle correlation method.

photo-mechanic, digital image correlation, speckle pattern standardization, biomedicine, serrated yielding

PACS: 42.30.Ms, 42.30.Sy, 42.30.Tz, 42.30.Va, 42.30.Wb

doi: [10.1360/SSPMA2018-00156](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00156)