

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412728

一种基于重投影和 3D-DIC 的曲面变形测量方法*

郑 好¹, 段发阶¹, 白子博¹, 牛广越¹, 梁春疆²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 善测(天津)科技有限公司 天津 300000)

摘 要:传统双目立体视觉测量基于立体校正进行三维重建,测量精度受标定参数精度、插值精度以及双目传感器结构的影响很大。在进行曲面尤其是大曲率 ROI 变形测量时,立体校正过程会导致立体图像对中不均匀变形信息的损失或者过度拟合,进而影响测量精度。为此,本文发展了一种基于重投影和 3D-DIC,适用于曲面变形测量的无需立体校正或外极几何约束校正的高精度立体匹配方法。同时,这种方法也可推广用于含有不均匀变形的时序图像对的高精度匹配。具体地,本文提出了二阶变形参数初值估计方法,二阶变形参数初值生长匹配策略,全局立体匹配和时序匹配策略;进一步,给出了不依赖于立体校正和极线校正的特征点三维重建方法,全局变形场及局部应变场的计算方法。实验证明本文所提方法可实现一定曲率曲面的高精度变形测量,测量系统在一定景深内能够实现小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的平均测量误差。

关键词: 立体视觉测量; 立体匹配; 3D-DIC; 曲面变形测量

中图分类号: TH822

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

A surface deformation measurement method based on reprojection and 3D-DIC

Zheng Hao¹, Duan Fajie¹, Bai Zibo¹, Niu Guangyue¹, Liang Chunjiang²

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Smartmens (Tianjin) Science and Technology Ltd, Tianjin 300000, China)

Abstract: The traditional binocular stereo vision measurement is based on stereo rectification for 3D reconstruction. The measurement accuracy is greatly influenced by the calibration parameter accuracy, interpolation accuracy and binocular sensor structure. When measuring the deformation of surface, especially large curvature ROI, the stereo rectification process could cause the loss or over-fitting of the non-uniform deformation information in the stereoscopic image pairs, which further affects the measurement accuracy. To address this issue, a high-precision stereo matching method is proposed based on reprojection and 3D-DIC, which is suitable for surface deformation measurement without stereo rectification or epi-polar geometric constraint correction. Meanwhile, this method can also be extended to high-precision matching of time series image pairs containing non-uniform deformation. Specifically, this article proposes the estimation method of second-order deformation parameters, the growth matching strategy of second-order deformation parameters, and the global stereo matching strategy and the time series matching strategy. Furthermore, the 3D reconstruction method of feature points independent of stereo rectification and epi-polar correction, and the calculation method of global deformation field and local strain field are given. Experiments show that proposed method can achieve high precision deformation measurement of a curved surface, and the measuring system can achieve an average measurement error of less than $1\text{ }\mu\text{m}$ in a certain depth of field.

Keywords: stereo vision measurement; stereo matching; 3D-DIC; surface deformation measurement

收稿日期: 2024-04-12 Received Date: 2024-04-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(52205573, U2241265, 92360306, 62231011)、中国博士后科学基金(2022M720106)、天津大学科技创新领军人才培养“启明计划”(2024XQM-0012)、精密测试技术及仪器全国重点实验室(天津大学)青年教师科研启动项目(Pilq2304)、国家科技重大专项(J2022-V-0005-0031)、航空科学基金(2022Z060048001)、青年人才托举工程(2021QNRC001)项目资助

0 引言

工程上各种复杂构件的强度和刚度以及其他力学性能的研究,均需要通过材料力学实验来验证和证明^[1]。航空发动机机匣、燃气轮机机匣、机翼蒙皮、发动机叶片等曲面构件往往是大型机械的主要承力、做功部件,在工作中往往承受着高温高压,高载荷的综合作用^[2]。气动、温度载荷甚至异物入侵等都会使这类薄曲面构件产生变形,而其受力、形变状况又往往会对旋转机械转速、整机振动、固有频率等造成影响^[3-4]。因此,研究曲面构件的整体、局部变形和应变场的全场高精度测量方法,对先进旋转机械的研制和材料力学特性分析提供原始数据支持,对该类大型先进机械的设计、制造和迭代升级具有重大意义。

在科研和工程实际中,不同材料的构件变形检测方法可以分为接触式和非接触式测量两大类型。

接触式测量技术主要基于传感器与被测试件表面的直接固态连接进行测量。比较有代表性的接触式测量方法有应变片测量方法,引伸计测量法,光纤布拉格光栅测量法等。

应变片测量法是最为常用的应变测量方法,其通常采用应变花或者应变片阵列分布的形式进行测量^[5]。应变片测量具有很高的测量精度,量程大,使用门槛较低,因此,在发动机叶片、机翼蒙皮、船底结构等部件的停机或在线检测时都有使用^[6-8]。在实际测量时,应变片测量由于自身传感器大小以及需要粘贴到物体表面的特性只能实现单点应变测量,难以实现区域的全场应变测量。若使用应变片阵列实现多点同时测量(也无法实现全场测量),则需布置繁琐的测量网络,线束非常复杂,难以安装和维护,这在很大程度上限制了其应用。

接触式引伸计则常用于单一简单构件的上机拉压实验中,一般与万能试验机配套使用,其结构简单、技术成熟,但是量程与标距可调性差、难以适应复杂实验环境^[9]。显然,引伸计只能实现构件量程范围的一维变形测量,也无法实现复杂构件变形的全场测量。

光纤布拉格光栅传感器(fiber Bragg grating, FBG)是一种新型传感器,可以实现构件应变场、温度场等的测量。FBG作为分立式传感器,在单点和多点的应变测量上,技术手段已经比较成熟,并且在航空航天、民用建设等领域的结构健康监测上得到了广泛的应用^[10-11]。为适应工程中测点密集的需求,FBG通过高复用技术进行准分布式测量的技术得到了关注和发展。有文献报道FBG已通过高复用技术应用于飞机机翼蒙皮表面的应变测量中,但其受光栅信号间串扰拍频和光谱阴影的影响,

复用容量也十分有限^[12]。与此同时,FBG传感器在使用前需要提前埋入被测物表面,不能对已在役的被测物进行测量。因此,FBG测量方法在使用上具有很高的环境、专业技术要求,现阶段同样难以实现被测物表面广泛区域的全场变形、应变测量。

非接触式测量技术包括电子散斑干涉法、云纹干涉法、全息干涉法与数字图像相关法等。

电子散斑干涉技术所记录的是两束相干光波相互干涉而形成的干涉条纹图,而被测物体的形变都与干涉条纹图的相位分布直接相关,因此根据相位信息可提取出被测物位移、变形、振动、三维形貌等物理量。电子散斑干涉测量具有很高的测量精度,可以在局部内实现优于1 μm 变形测量精度,其已经被用于在航天器外壳、航空发动机机匣等局部需要极高精度的微小形变测量^[13-14]。但是,电子散斑干涉法需要配置较为复杂的光路结构,光路极易受到环境干扰,并且该方法测量范围很小,只能用于小范围局部高精度变形测量,无法实现较大区域的全场变形测量。

云纹干涉法^[15]利用云纹图反映试件表面的变形信息,测量灵敏度高,但是需要在试件表面制作高密度栅,测量精度受试件平面度以及光栅制作水平影响^[16],成本高昂且不易实施;全息干涉法^[17]基于光的干涉和衍射原理将物体反射的光波以干涉条纹的形式记录下来,并在一定条件下复现被测物三维形貌及形变信息,使用时同样需布置复杂光路,使用门槛较高。

数字图像相关法(digital image correlation, DIC)通过摄像机采集充满纹理特征(通常为人工布置随机数字散斑形式,也可以是自然散斑纹理)的被测试样表面变形过程图像序列,对采集的图像序列进行DIC计算,通过参考图像子区与变形图像子区的局部区域灰度相关性来求解出被测参考子区的形变信息。数字图像相关法与立体视觉传感技术结合而形成的三维数字散斑相关法(3D-DIC)可通过同名点不同时刻的位移场信息实现对大型被测物兴趣区域的全场变形测量,其对测量环境以及测量人员的技术水平要求相对较低。目前,其已经应用在了实验室力学测试^[18-23]、鼓风机叶片动态应变检测^[24-25]、涡轮叶片振动特性监测^[26]、旋转叶片动态位移应变监测^[27]、航空航天大型构件材料的表面变形检测^[28-29]、土木结构力学性能试验^[30]等领域中。

由上分析可知,基于数字图像相关法与立体视觉传感的3D-DIC方法在理论上较为适合于曲面构件的局部变形和应变场的全场测量。但是,在曲面构件变形的实际测量中,无论是立体视觉传感,还是基于数字图像相关的图像特征匹配,仍有许多问题制约其实际测量精度的提升。

1 理论与问题分析

在工业检测中常用的立体视觉传感技术主要有结构光三维视觉传感技术,和基于仿生视觉视差原理的多目立体视觉技术^[31]。

常见的点、线、网格或者散点结构光视觉传感技术可以将结构光投射到物体表面,通过工业相机采集光点或者光条在相面上的投影坐标,结合预先标定好的光条、光平面与相机的相对位置信息参数,可实现拍摄时刻投射于被测物表面的光点或者光条三维形貌信息重构。由于实际检测对象为投射在被测物表面平面上的光点或者光条,与被测物表面无法固态连接。当物体表面发生形变以后,无法在变形时刻获取与未变形时刻的原始同名点匹配关系,因此不能用该方式直接测量物体表面的变形信息,本文也不再对此方法进行讨论。

多目视觉传感技术能与 DIC 技术进行很好的结合,从而衍生出 3D-DIC 技术,本文重点针对该技术进行讨论。

双目视觉传感技术是双目视觉传感技术的基础。双目视觉传感技术主要基于立体图像对中的匹配特征视差信息进行三维重建。图像特征的三维重建主要包括特征提取、特征立体匹配和基于三角测量原理的特征立体重建 3 个步骤。

若要实现被测物兴趣区域(region of interest, ROI)的全场变形检测,最理想状况是通过某种方法实现 ROI 在左、右相机投影的立体图像对中的全局立体特征匹配,再通过立体匹配信息结合特定的三维重建方法实现 ROI 区域在当前时刻的三维位置信息获取。

需要注意的是,图像特征提取精度、特征的立体匹配精度、双目相机的标定参数精度、以及三维重建算法精度都会影响最终物体表面三维形貌测量以及后续变形场测量的精度。本文首先关注特征的立体匹配精度问题。

1.1 双目立体视觉传感立体匹配精度提升方式解析

传统的全局立体匹配算法比较有代表性的有基于图像块灰度分布特征的块匹配算法(block matching, BM)和半全局块匹配算法(semi-global block matching, SGBM)^[32]。这两种方法通过“模板窗口”在立体图像对中全局滑动,来实现立体图像对中同名纹理特征的匹配。其匹配精度和速率与模板窗口大小和形状、被测物表面的纹理信息丰富程度、环境光照变化、ROI 尺寸等息息相关。传统全局匹配算法很难在弱纹理条件下实现稳定地亚像素级特征提取和立体匹配,因此,必须探索其他的全局立体匹配方式。

此外,曲面试件和平面试件 ROI 在双目系统中的投影得到的立体匹配对情况也制约了传统全局匹配方法的精度,如图 1 所示。

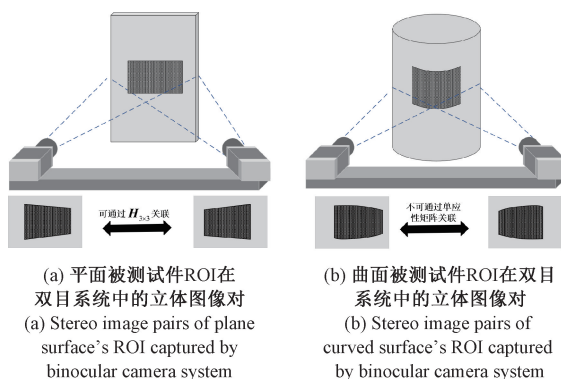


图 1 平面被测试件和曲面被测试件 ROI 在双目系统中的成像示意图

Fig. 1 Stereo image pairs of plane and plane surface's ROIs captured by binocular camera system

图 1(a)所示为平面被测试件 ROI 在双目系统中成像示意图。平面被测试件 ROI 是共面的,因此,平面特征点在左右相机立体图像对中的同名点图像坐标可通过一个单应性矩阵 $H_{3 \times 3}$ 相关联, $H_{3 \times 3}$ 具有 8 个自由度。在同一时刻,若已知被测试件平面上一点在左相机中的图像坐标,可以通过 $H_{3 \times 3}$ 单应性变换计算得到其在右图上的理论坐标,又因为 $H_{3 \times 3}$ 是可逆的,因此若已知特征点在右图的图像坐标,也能通过 $H_{3 \times 3}$ 计算得到其在左图上的理论像素坐标。

图 1(b)所示为曲面被测试件 ROI 在双目系统中成像示意图。曲面 ROI 上各点是非共面的,因此,其在左右相机上的投影图像坐标对应关系并不能通过单应性变换的 8 个自由度来表达,情况远比平面构件复杂。显然,曲面特征点在左右相机中立体图像对中的同名点坐标之间的对应关系是非线性不可逆的。

由以上分析可知,在同一时刻,ROI 在右图上的图案形状和位置可以看作是左图上的图案形状通过某种形变和位移生成的。仅为方便叙述,与物理意义无关,在本文中我们将这种能通过 $H_{3 \times 3}$ 单应性变换表达的形变和位移称为“均匀变形”,只能通过非线性变换方式表达的形变和位移称之为“不均匀变形”。值得注意的是,曲面构件除了在立体匹配中天然存在这种“不均匀变形”之外,若在不同时刻被测构件表面受到不同的激励发生了变形,或被测构件表面不同部位对同种激励的响应不同,那么各个时刻拍摄的时序图像序列也会存在这种“不均匀变形”。

而这两种变形其实也制约了上文所述“模板匹配”式的图像特征提取精度的提升。简单理解,平面上的矩形通过单应性变换可以变为梯形,而通过二阶非线性变换,矩形各边均可能变为二次曲线。传统方法使用相同形状的匹配模板在左右相机立体图像对中寻找匹配特征,匹配精度自然难以保障。

根据以上分析,若能提供一种能改变匹配模板形状的全局匹配方法,理论上就能够有效提升立体图像对的匹配精度。延续这一思路,DIC方法显然可以提供这种“变形模板”的立体匹配形式。

DIC方法是一种基于局部区域灰度信息相关的区域匹配方法,通过引入了“形函数”,使得其可以在变形前后的相关图像中通过非线性迭代优化的方法找到与参考局部子区最优相关的变形子区。通过可靠的变形参数初值传递路径规划,可以实现物体表面的连续变形测量。而将DIC方法的连续匹配能力用于不同时刻立体视觉图像对的立体匹配和时序匹配从而得出被测物表面的形貌和变形的技术就被称为立体数字图像相关方法(Stereo-DIC)或者三维数字图像相关方法(3D-DIC)^[33]。

显然,通过提升3D-DIC的匹配精度,有利于提升立体视觉的立体匹配精度,从而提升曲面构件的测量精度。因此,我们需进一步考虑3D-DIC技术针对曲面被测物的适用性问题。

1.2 针对曲面被测物立体图像对的DIC适用问题解析

在3D-DIC中,被测表面的局部区域在不同相机上的投影被称为“子区”,同一时刻将左右相机相对应的“子区”进行匹配就叫做“立体匹配”。一般情况下,我们将左相机拍摄图像的局部特征区域称为“参考子区”,右相机待匹配的子区称为“变形子区”。将不同时刻的左右相机拍摄图像分别进行特征匹配就叫做“时序匹配”。

为达到最好的测量效果和特征提取以及匹配精度,DIC方法的实施需要在被测物上布置便于实施和具有明显灰度变化信息的特征图样,比较常用的有伪随机分布的数字散斑特征,图样的生成和较为理想的散斑特征可以参考文献[34]。

基于局部子区灰度特征匹配的数字图像相关法原理如图2所示,具体原理阐述可以参考文献[35]。

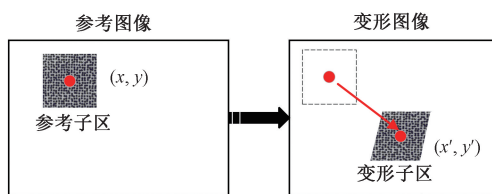


图2 基于局部子区灰度特征匹配的DIC方法原理

Fig. 2 Principle of subset based local DIC method

如前文所述,DIC与一般的基于图像相关配准子区算法的最大区别是其引入了基于多项式拟合能表示局部区域变形的“形函数”作为迭代参量,以选定的相关函数作为最小化目标函数来进行非线性迭代优化来求解数值最优解。

常用的一阶和二阶形函数可表征为式(1)和(2):

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{w}_1 = (x, y; \mathbf{p}_1) &= \begin{bmatrix} u_x + 1 & u_y & u \\ v_x & v_y + 1 & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_1 &= (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T \\ \mathbf{w}_2 = (x, y; \mathbf{p}_2) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}u_{xx} & u_{xy} & \frac{1}{2}u_{yy} & u_x + 1 & u_y & u \\ \frac{1}{2}v_{xx} & v_{xy} & \frac{1}{2}v_{yy} & v_x & v_y + 1 & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ xy \\ y^2 \\ x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2 &= (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy})^T \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$(2)$$

式(1)和(2)以参考子区中心为原点建立局部坐标, (x, y) 表示参考子区中一点坐标, $\mathbf{w}_1$ 、 $\mathbf{w}_2$ 分别表示使用不同阶次形函数时变形后的对应点坐标,也就是图2中的 (x', y') 。

$\mathbf{p}_1$ 和 $\mathbf{p}_2$ 分别表示在一阶和二阶形函数中待求解的微分形变系数向量。一阶形函数含有6个自由度的变形和位移分量,与射影几何仿射变换是等效的,因此一阶形函数能表示平面上二维图形的相似、位似、压缩和错切变换^[36]。显然,由一阶形函数表征的变形是线性可逆的。二阶形函数含有12个自由度的变形和位移分量,除了包含一阶形函数中的零阶和一阶变形分量外,还含有二阶变形分量。因此,使用二阶形函数除了能表示一阶形函数所能表征的射影变换外,还能表征更为高阶的弯曲、扭转等复杂变形在平面上的投影。显然,这些高阶变换在数学上是非线性且不可逆的。

通过上述分析可知,由于使用双目传感器拍摄的曲面立体图像对中不可避免的存在不均匀变形的状况,若使用DIC方法进行立体匹配,需要尽可能选用能表示非线性变换的形函数进行匹配操作。综合来看,二阶形函数是比较适合的选择,我们将在后文仿真实验中对这一推论进行验证。

Pan曾在文献[33]中归纳到,现阶段DIC技术发展有仍有5个关键问题需要解决:1)为弱纹理特征被测物或特殊测量环境准备的最优散斑制备技术;2)双目或者多相机测量系统的标定技术;3)子区大小及形函数的自适应选择办法;4)完全自动化和稳定的快速子区初值计算方法;5)基于多项式拟合的应变计算窗口尺寸、拟合多项式阶次选择。以上5个问题对本文所要研究的曲面变形测量问题也有一定的指导意义。

具体到本文主要解决的曲面测量的实际情况中,本文采用水转印技术制备并转印散斑图样到被测物表面;选用改进的仿射坐标校正非共面标定方法(improved

affine coordinate correction, IACC)^[37]对双目测量系统进行高精度标定;在无法完全自适应选择子区大小的前提下采用人工干预的多次试验,及参考以往研究者经验的方式选择一个较为合适的子区大小,选用二阶形函数进行立体匹配及时序匹配;选用二阶多项式以及多次试验选定的合适子区窗口大小进行位移场的局部拟合。

Pan 所提出的问题 4) 在曲面测量对象上也有体现。具体来说,对于二阶形函数的有效初值估计,目前研究的还不够深入。因此,本文研究的一个重点就是发展一种有效的二阶形函数初值估计方法。

1.3 立体匹配图像特征的三维重建算法选择问题

上文中提到,立体匹配图像特征的三维重建算法精度也会影响到最终的物体表面三维形貌测量以及后续变形场测量的精度。所以,一个稳定高效并且具有较高精度的三维重建算法对于 3D-DIC 来说也是非常重要的。

在双目视觉以及现阶段比较常见的 DIC 软件中,最常使用的三维重建算法是基于立体校正的三维重建方法。立体校正即根据双目系统的标定参数,通过投影关系使原图像投影到新建的虚拟平行双目坐标系中,从而使单侧图像特征对应的外极线平行于图像行(列)坐标轴。根据外极线约束,同名特征点在校正图像对中的坐标应在同一行(列)上。因此,可以直接通过立体图像对中匹配上的图像特征行(列)像素坐标差计算得到视差,进一步,通过视差及虚拟平行双目系统的内外参数计算得到被测物三维坐标信息的解析解。

常用的立体校正算法有 Hartley^[38]算法、Fusiello^[39]算法、集成于著名的 MATLAB 标定工具箱^[40]和计算机视觉算法库 OpenCV 中的 Bouguet 算法;Gu 等^[41]提出了一种基于双目外参,2 次旋转左右相机的校正方法,求解思路与 Bouguet 算法相近,但计算过程略有不同。就实际校正效果来说,Fusiello 算法、Bouguet 算法以及 Gu 算法由于均借助了双目相机的高精度标定参数,其实际校正的图像效果优于不依赖于标定参数的 Hartley 算法校正效果,Hartley 算法校正图像往往会产生更多的畸变。

立体校正尤其是依托高精双目标定参数的 Fusiello 算法、Bouguet 算法和 Gu 算法在数学模型上是较为完备的。但在实际施行过程中,这一过程实际上是原像平面到新的平行像平面的透视投影变换,并不是被测物体特征到新平行像平面的直接投影;并且这一投影过程不可避免的需要引入不同的图像插值算法来计算新像平面各像素点灰度值,图像插值能提供的精度是有限的;此外,由于图像校正直接使用双目相机的标定参数,因此标定误差也会很大程度影响立体校正的准确性。总结以上 3 点,可知校正后图像特征所在位置必然与理论值存在一定偏差,这种偏差在大多数时候对于测量的影响是消极的,随着原像平面与新像平面夹角的增大,这种误差也

会增大。Fusiello 算法文献[39]中的仿真实验可以体现以上结论。

因此,使用原像平面匹配特征直接计算被测物的三维信息,在理论上应该能有更高的精度。

在原像平面,若已知双目系统标定参数,和同名点在左右像平面的像素特征,根据三角几何关系,也能计算出被测特征点在相机坐标系下的三维坐标解析解^[42]。单宝华等在文献[43]指出,这种解析算法精度受相机标定参数和匹配图像特征提取精度的影响很大,其提出了一种基于外极线约束修正图像特征匹配点坐标,再通过解析计算三维坐标的方法,实验显示其三维重建精度和稳定性均优于传统解析算法,并且成功应用在了基于 DIC 和立体视觉的实际测量中。

显然,相机外极线参数的准确性也极大程度依赖于双目相机的标定精度,这与立体校正的其中一个限制条件是相似的。

本文研究的一个重点就是希望发展一种在原像平面提取图像特征,并探索一种不依赖于立体校正或外极线约束修正并可以应用于 3D-DIC 技术中的被测物三维重建方法。

1.4 本文的研究目标

综合以上分析可知,传统的 3D-DIC 方法大多针对平面或者类平面的测量对象进行研究,对于连续曲面的变形测量研究相对较少。

因此,本文的研究目标是:针对含一定曲率的曲面立体匹配图像对或含有不均匀变形的时序图像对为测量对象,提出一套新的基于重投影和局部特征匹配的可靠二阶初值计算方法;从曲面的物理特性和双目测量系统的投影特性出发,结合仿真试验数据,比较不同的形函数、迭代算法对不均匀变形的测量精度、效率的影响;提出一种种子点二阶变形参数初值生长策略,实现特征点二阶变形参数的初值传递和连续区域生长;给出一种基于本文所提初值计算算法和二阶反向迭代算法的全局立体匹配和时序匹配策略;给出一种基于二阶 DIC 特征匹配和最小二乘法求解的不依赖于立体校正和极线校正的特征点三维重建算法;最后通过真实曲面的离面位移实验,验证本文所提方法的测量精度和可行性。

2 基于立体视觉和 3D-DIC 曲面构件测量解决方案

2.1 DIC 算法中形函数、相关函数、非线性迭代优化算法选择方案

在 1.2 节中本文从理论上分析了针对曲面构件变形测量的 3D-DIC 方法最好使用二阶形函数作为非线性迭代优化参量的理论分析,此处不再赘述。

为了量化参考子区与其变形对应子区之间的相似(或差异)程度,引入相关函数来评价这一指标。在实际应用中,在不同测量环境下记录的图像之间的灰度强度分布可能是由各种原因引起的。使用一个鲁棒的相关函数来适应变形图像灰度强度分布可减小位移测量误差。基于这种考虑,零均值归一化互相关函数(ZNCC)和零均值归一化最小平方距离函数(ZNSSD)被多数学者推荐用于实际应用,因为它们对目标子区光照强度引起的灰度分布的潜在尺度和偏移变化不敏感^[33]。Pan等^[44]的理论分析表明这两个相关标准实际上是等价的,这很好地统一了数字图像匹配的相关标准。近年来也有学者选用其他的相关函数来评价子区相似程度,Liu等^[45]发展了一种 $PSSD_{abc}$ 相关函数,Xu等^[46]引入了一种基于灰度梯度的SSD相关函数来取代基于灰度强度的ZNSSD函数,来处理非线性的光照变化。以上相关函数均能在各自场景取得较好的评价效果。

本文选用ZNSSD相关函数作为相关子区的评价函数,ZNSSD的表达形式如下:

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \left[\frac{f(x_i, y_i) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x_i, y_i) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (3)$$

其中, f_m 和 g_m 分别表示对应参考子区和变形子区的灰度均值, Δf 和 Δg 表示为下式,与子区灰度标准差正相关:

$$\begin{cases} \Delta f = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [f(x_i, y_i) - f_m]^2} \\ \Delta g = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [g(x_i, y_i) - g_m]^2} \end{cases} \quad (4)$$

通过式(3)和(4)即可计算关联子区的相似程度。

以ZNSSD函数作为目标函数,引入形函数参量,即可利用非线性最小二乘优化方法对变形参数进行迭代优化。

主流的基于高斯-牛顿理论和ZNSSD相关函数的DIC正向迭代算法FA-NR的优化目标函数可以表示为下式:

$$C_{FA-NR}(\mathbf{p}_n) = \sum_{\xi} \left[\frac{f(\xi) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n + \Delta \mathbf{p})) - \bar{g}(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n))}{\Delta g(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n))} \right]^2 \quad (5)$$

反向迭代算法IC-GN的优化目标函数可以表示为下式:

$$C_{IC-GN}(\Delta \mathbf{p}_n) = \sum_{\xi} \left[\frac{f(\mathbf{w}_n(\xi, \Delta \mathbf{p}_n)) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n)) - \bar{g}(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n))}{\Delta g(\mathbf{w}_n(\xi; \mathbf{p}_n))} \right]^2 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{w}_n$ 表示使用的n阶形函数, $\mathbf{p}_n$ 表示使用n阶

形函数的变形参量, $\Delta \mathbf{p}$ 表示FA-NR算法的迭代增量, $\Delta \mathbf{p}_n$ 为IC-GN算法第N次迭代参考子区变形增量,需经过反向乘积过程更新变形子区的变形参数。FA-NR算法与IC-GN算法计算过程的区别可以参考文献[33-35],这里不再赘述。

值得注意的是,若使用二阶及以上阶别的形函数,IC-GN算法必须对参量矩阵进行扩展才能使用反向乘积进行参量更新,反向乘积的更新方法比较有代表性的有Gao^[47]方法和Bai^[48]方法。两种方法扩展原理相近,精度相差不大,本文采用Gao方法进行二阶IC-GN参量矩阵的反向迭代更新。

2.2 基于局部区域特征匹配和重投影的二阶形函数初值估计方法

较为准确的初值估计是实施基于DIC方法的局部区域匹配的必要条件。初值评估误差应小于非线性优化算法收敛域,否则会造成难以收敛的巨大匹配误差或者陷入局部最优。良好的初值估计会大幅提升优化算法的运算效率。实验表明,初值估计精度的提升能大幅提高运算效率,减少单个子区计算所需迭代次数^[42]。

针对使用一阶形函数的DIC方法的种子点初值计算,学者们提出了一些可行的方法。Zhou等^[49]提出了一种基于SIFT特征算子、RANSAC算法以及仿射变换基本原理的ROI区域多特征点一阶形函数初值计算方法,其在均匀变形的测量情形下有较好的初值提取精度;Zou等^[50]在Zhou等^[49]研究基础上,提出了一种基于SURF特征算子及仿射变换基本原理的ROI区域多特征点一阶形函数初值计算方法,并提出了一种基于单一SURF最优特征点一阶形函数初值估计方法,其在旋转变换的实物和仿真图像均取得了较好的初值计算精度。

以上方法均只适用于一阶形函数的初值估计,对于二阶形函数的初值估计方法,学者们往往采用一阶形函数初值计算方法提取一阶分量,然后将二阶分量置0。这样的做法在被测物只含有均匀变形的测量中往往是可行的,但在曲面物体立体匹配或者平面物体非均匀变形的时序匹配时直接使用一阶初值传递可能会产生较大偏差。

因此,本文针对曲面物体测量的立体匹配,或者非均匀变形的时序匹配提出了一种基于SIFT和SURF算子的局部特征提取和重投影的二阶形函数种子点初值估计方法。算法的流程图如图3所示。

首先,分别对参考图像及变形图像通过SIFT/SURF算子进行特征点查找及描述,并通过BruteForce/FlannBased方式匹配,筛选出10对最优的非共线特征点之后,利用这10对特征点及RANSAC算法计算原图像特征点到变形特征点的单应性矩阵 $\mathbf{H}$,通过 $\mathbf{H}$ 的逆矩阵将变形图像重投影到另一视角。注意,此时重投影的变形

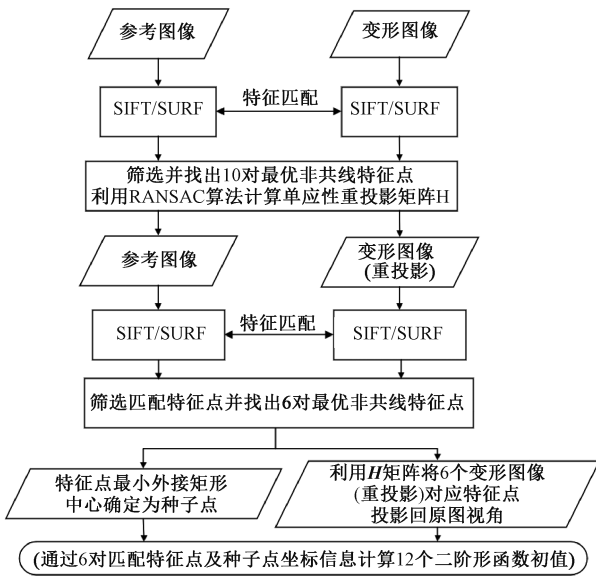


图 3 基于重投影和局部特征提取的二阶形函数初值估计方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the initial value estimation of 2nd order deformation function based on reprojection and local features extraction

图像和参考图像在匹配特征点区域会更为相似。值得一提的是,重投影图像与参考图像没有任何强几何约束,只存在与变形图像的单应性约束。这一操作是为了尽量缩小其变形程度,使之更为接近一阶变形的情形,增强后续特征点匹配的准确性。

使用参考图像和重投影图像再进行局部 SIFT/SURF 特征查找与匹配。二阶形函数具有 12 个变形参量,本文需筛选出 6 对最优匹配特征点代入后续计算。上述分析可知,重投影图像上的变形特征点,与原变形图像的特征点是存在单应性的。因此,本文可以通过 H 矩阵计算出筛选出的出现在重投影图像中的变形特征点在原变形图像中的位置。不失一般性的,本文取对应参考图像中的 6 个最优特征点的最小外接矩形中心作为初始种子点。最后,即可通过 6 组对应匹配点和初始种子点坐标计算出种子点附近区域的 12 个二阶形函数变形参数初值解析解。

2.3 基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向的种子点二阶初值生长匹配策略

在得到种子点坐标及对应的形函数变形参数初值后,即可通过相关性导向生长策略实现全场变形的时序匹配或者同一时刻的立体匹配,本文使用基于零均值归一化平方和相关系数导向的种子点生长匹配策略,种子点生长策略如图 4 所示。在选定的连续变形兴趣区域,种子点所在子区计算完毕后,将种子点变形参量计算结果作为初值传递给相邻 4 邻域,并进行变形参量的数字

图像相关计算,计算完毕后联同最终的 ZNSSD 相关系数压入候选子区种子点序列,将候选子区种子点根据 ZNSSD 相关系数数值进行排序,取 ZNSSD 系数最小值候选点作为新的种子点,将其变形参量作为初值传递给她 4 邻域未计算区域进行相关匹配运算,计算完毕后压入候选种子点序列,删除原种子点后,进行排序,选出新的种子点。重复上述操作直到图像兴趣区域均完成计算则全场变形参量计算终止。

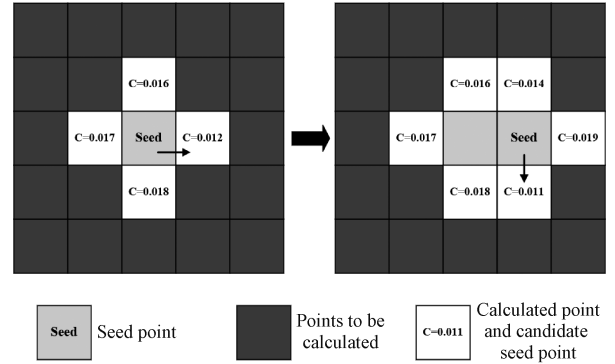


图 4 基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向的种子点生长匹配策略

Fig. 4 Seed point growth matching strategy based on zero-mean normalized sum of squared difference correlation function

二阶种子点初值传递根据式(7)进行:

$$\begin{cases}
 u_{si} = \frac{1}{2}u_{sxx}\Delta x^2 + u_{sxy}\Delta x\Delta y + \frac{1}{2}u_{syy}\Delta y^2 + \\
 \quad u_{sx}\Delta x + u_{sy}\Delta y + u_s \\
 v_{si} = \frac{1}{2}v_{sxx}\Delta x^2 + v_{sxy}\Delta x\Delta y + \frac{1}{2}v_{syy}\Delta y^2 + \\
 \quad v_{sx}\Delta x + v_{sy}\Delta y + v_s \\
 u_{sxxi} = u_{sxx} \\
 u_{sxyi} = u_{sxy} \\
 u_{syyi} = u_{syy} \\
 u_{sxi} = u_{sx} + u_{sxx}\Delta x + u_{sxy}\Delta y \\
 u_{syi} = u_{sy} + u_{sxy}\Delta y + u_{syy}\Delta x \\
 v_{sxxi} = v_{sxx} \\
 v_{sxyi} = v_{sxy} \\
 v_{syyi} = v_{syy} \\
 v_{sxi} = v_{sx} + v_{sxx}\Delta x + v_{sxy}\Delta y \\
 v_{syi} = v_{sy} + v_{sxy}\Delta y + v_{syy}\Delta x
 \end{cases} \quad (7)$$

式中; i 脚标分量表示待求的新子区形函数参数初值; Δx 和 Δy 表示生长步长的横纵坐标分量。

2.4 不依赖于立体校正或外极线修正的立体匹配、时序匹配策略以及基于最小二乘的三维重建算法

有了可靠稳定的二阶种子点定位及子区初值计算

方法,结合 DIC 技术与种子点生长匹配策略,本文进而提出一种不依赖于极线校正或外极线修正的立体匹配与时序匹配策略,并给出基于最小二乘的三维重建算法。

基于立体校正的校正平行像面三维重建算法或者基于极线修正的原视角图像三维重建存在的问题或者不足本文已在 1.3 节进行过讨论。

基于上述讨论,原视角图像包含了最多的原始特征信息,若能在原始图像中直接进行精准的特征匹配,能消除很多因为图像转换造成的不确定性。

得益于可靠稳定的二阶种子点定位及子区初值计算方法,结合 DIC 技术与种子点生长匹配策略,本文提出的立体匹配策略如图 5 所示。

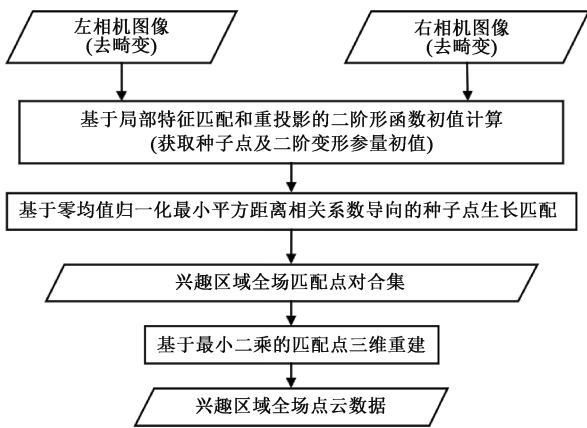


图5 不依赖于外极线约束校正的立体匹配策略

Fig.5 Flowchart of stereo matching strategy independence of epipolar constraint correction

基于本文提出的二阶初值计算方法和零均值归一化最小平方距离相关系数导向的种子点生长匹配方法能实现有一定二阶变形的立体匹配和时序匹配图像的连续全场特征匹配。使用这一匹配策略能在不经过立体校正或极线修正的情况下实现一定曲率的曲面在双目系统左右相机上投影的立体匹配。

实验表明,对于含有一定的高阶变形的时序图像,这一策略也是有效的。因此,在连续变形的时序匹配过程中,可以使用 T_1 时刻图像作为初始参考图像,后续时刻图像均作为变形图像与初始参考图像进行对比,结合上文提到的立体匹配策略,仅需在初始时刻进行一次立体匹配即可实现被测物的连续变形测量。本文使用的时序匹配策略如图 6 所示。

在立体匹配与时序匹配完成之后,利用计算所得的变形参数进行匹配特征在各个时序下的三维特征重建,三维重建采用基于最小二乘的三维重建方式^[51],在准确

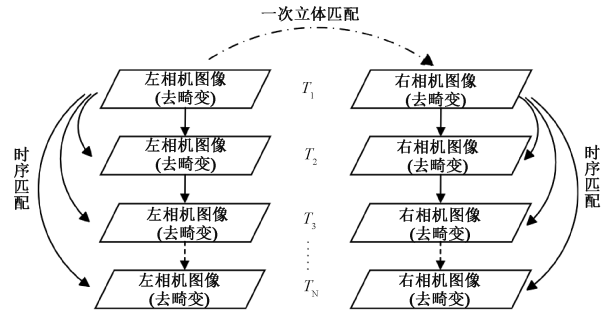


图6 只需一次立体匹配的时序匹配策略

Fig.6 Timing matching strategy with only one stereo matching

的标定参数及高精度匹配的情形下,这一方法计算简洁,易于编程,无需极线校正且具有很高的三维重建精度,基于最小二乘的三维重建公式如下:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_1 \\ 0 & 1 & -y_1 \\ (x_2 r_7 - r_1) & (x_2 r_8 - r_2) & (x_2 r_9 - r_3) \\ (x_2 r_7 - r_4) & (y_2 r_8 - r_5) & (y_2 r_9 - r_6) \end{bmatrix} \\ b = [0 \quad 0 \quad (T_x - x_2 T_2) \quad (T_y - y_2 T_2)]^T \\ [X_w \quad Y_w \quad Z_w]^T = (A^T A)^{-1} A^T b \end{cases} \quad (8)$$

式中: (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 为左右相机采集图像匹配特征点的归一化坐标; $r_1 \sim r_9$, $T_x \sim T_z$ 为双目系统标定外部参数。 $[X_w \quad Y_w \quad Z_w]^T$ 以左相机参考系建立的世界坐标系下的特征点坐标。

3 仿真验证实验

3.1 不均匀变形初值仿真验证实验

在本节中,基于以下变形函数利用一幅模拟出的 500 pixels×500 pixels 的散斑图像仿真生成对应的含有不同程度二阶变形的图像:

$$\begin{cases} x' = x + s \cdot x^2 \\ y' = y \end{cases} \quad (9)$$

式中: (x, y) 表示特征点在变形前图像坐标; (x', y') 表示变形后对应特征点在变形图像中的图像坐标; s 为可调节的二阶变形系数。

假设通过 2.2 节中所述的几种种子点初值获取方法获得了正确的初始种子点的坐标信息 (x_0, y_0) 以及一阶形函数或二阶形函数变形参数的初始估计,以该种子点建立局部坐标系,根据式(7)和(9),在该局部坐标系领域内分别采用一阶形函数和二阶形函数计算的形变量与式(9)中理论值的误差如下:

$$\begin{cases} u_{ideal} = s \cdot (x_0 + \Delta x)^2 \\ u_{x_ideal} = 2 \cdot s \cdot x_0 = u_{x_measured} \\ u_{xx_ideal} = 2 \cdot s = u_{xx_measured} \\ u_{1st_order} = u_{x_measured} \cdot \Delta x + s \cdot x_0^2 \\ u_{2nd_order} = \frac{1}{3} \cdot u_{xx_measured} \cdot \Delta x^2 + \\ u_{x_measured} \cdot \Delta x + s \cdot x_0^2 \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)中,使用 $(\Delta x, \Delta y)$ 表示选定种子点局部坐标系下的坐标。由于式(9)所示变形只在 x 方向存在不均匀变形,因此只需计算 x 方向分量。显然,使用一阶形函数和二阶形函数在处理式(9)变形状况时的该局部坐标系下计算得到的变形理论误差可以由下式表示:

$$\begin{cases} Error_u_{1st_order} = u_{1st_order} - u_{ideal} = -s \cdot \Delta x^2 \\ Error_u_{2nd_order} = u_{2nd_order} - u_{ideal} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

显然,式(11)示出二阶形函数可以无误差地表示式(9)所示不均匀变形,而一阶形函数对高阶非均匀变形表达能力的缺失必然会引入最终形变大小的计算误差,且随着局部坐标的增大而增大。在这里我们假设 $(x_0, y_0) = (250, 0)$,仿真得出在不同 s 值大小下一阶形函数表达变形误差与该局部坐标系下坐标的关系如图7所示, x 方向位移非线性误差随 s 值及 Δx 值增大的趋势。

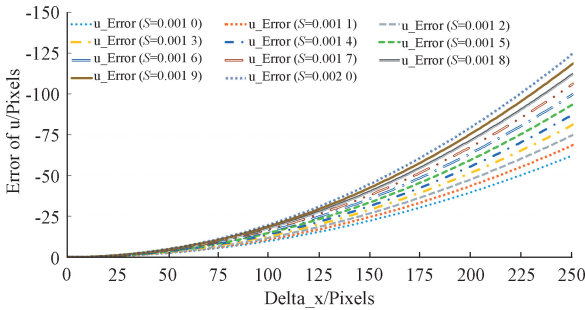


图7 一阶形函数在处理二阶形变时存在的理论误差

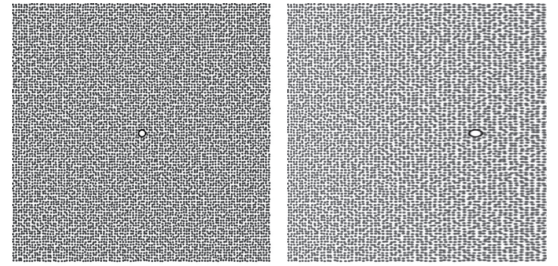
Fig. 7 Theoretical error curve of 1st order deformation function when dealing with 2nd order deformation

在实际测量中,曲面在双目相机投影的立体匹配图片,平面物体在不同时序下的离面变形都会在测量图片中引入类似的非均匀变形状况。因此,选用二阶形函数更有利于这类非均匀变形图像的高精度时序匹配与立体匹配。

但这种优势不是绝对的,主要体现在2个方面:1)若适当缩小匹配子区的尺寸,由于其更接近于一个平面变形,一阶形函数的精度也能有一定的提升;2)若曲面物体曲率不是很大,或者平面被测物不均匀变形程度较小,一阶形函数配合较为合适的匹配子区尺寸亦可以满足一定程度的测量需求。在实际测量中,同等子区大小的一阶DIC算法在效率上是优于二阶算法

的。因此,应根据实际测量精度及效率需求灵活选用不同阶次的DIC算法。

在本文中仿真生成的无变形数字散斑参考原图和对应的含二阶变形的变形图片对比示例如图8所示。



(a) 无变形参考原图

(b) 变形图像($s=0.0018$)

(a) Reference image

(b) Deformation image ($s=0.0018$)

图8 具有二阶变形的数字散斑仿真图像

Fig. 8 Digital speckle simulation image with 2nd order deformation

3.2 测量不均匀变形使用不同阶次初值对二阶IC-GN算法收敛特性的影响验证实验

与图8类似,将 s 的大小从0.0010逐渐增大到0.0020,分度值为0.0001,生成11组二阶变形逐渐增大的变形图像。基于式(7)和(9),可以计算出参考图像上的任一像素点相对于每组变形图像的理论变形参数。

假设测试种子点位置为 $P_{t_seed}(x_s, y_s)$ 。相应的,假设得到的该点位的不同阶次形函数参数的初始估计按照式(7)次序排列如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{0_init} = (x_s^2 \cdot s, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T \\ P_{1_init} = (x_s^2 \cdot s, 2 \cdot x_s \cdot s \pm 0.001, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T \\ P_{2_init} = (x_s^2 \cdot s, 2 \cdot x_s \cdot s \pm 0.001, 0, 0, 0, 0, 2 \cdot s \pm 0.001, 0, 0, 0, 0)^T \end{cases} \quad (12)$$

不同阶次的形函数计算方法所能获得的最高阶次的变形参数并不相同,对于其不能表征的高阶次变形参数初值,常用的方法是将其赋0带入后续的非线性优化中,上式即采用这种方法。为了更接近于实际情况,本文在仿真中对计算出的不为0的非0阶变形参数加入了0.001的偏置,代入后续的非线性优化。

在仿真实验中,设初始种子点为 $(100, 100)$,步进方向为 x 正向,每次步进1个像素,步进后重新计算种子点初值,在 $P_{t_seed} = (100, 100) \sim (200, 100)$ 区间内进行实验。

不失一般性的,本文取变形子区大小从 $11 \times 11 \sim 51 \times 51$ 像素区间分别进行多次实验。代入计算所得各阶初值,对11组图片分别进行二阶IC-GN变形计算。将相同子区大小的11组实验结果视为一个任务,设置相同的迭代终止条件,采用任务中每个子区的平均迭代次数和

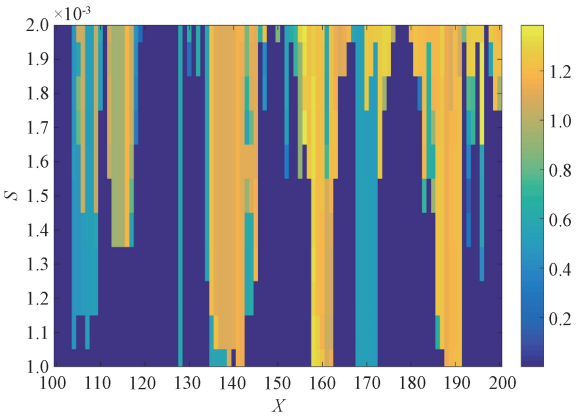
ZNSSD 相关系数来评定不同阶次变形参数初值对二阶 IC-GN 算法收敛特性的影响,结果如表 1 所示。

表 1 不同阶次初值对二阶 IC-GN 算法收敛特性的影响

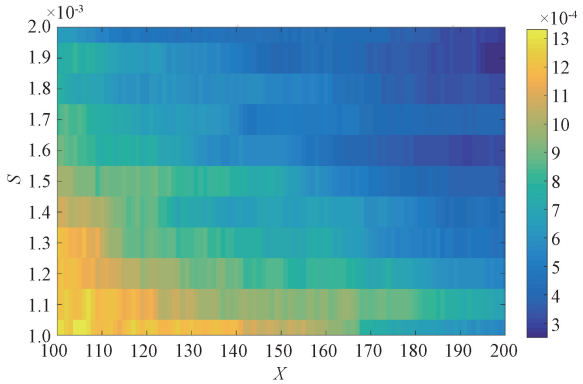
Table 1 Influence of different order initial values on convergence characteristics of second-order IC-GN algorithm			
子区大小	初值类型	平均迭代次数	平均 ZNSSD 系数
11×11	0 阶	10. 245	0. 000 916
	1 阶	5. 808	0. 000 624
	2 阶	5. 586	0. 000 624
21×21	0 阶	18. 490	0. 041 330
	1 阶	4. 848	0. 000 663
	2 阶	4. 451	0. 000 663
31×31	0 阶	49. 494	0. 232 900
	1 阶	5. 029	0. 000 648
	2 阶	4. 572	0. 000 648
41×41	0 阶	73. 753	0. 436 009
	1 阶	5. 130	0. 000 671
	2 阶	4. 691	0. 000 671
51×51	0 阶	93. 943	0. 915 642
	1 阶	5. 375	0. 000 677
	2 阶	4. 842	0. 000 677

由 ZNSSD 的定义来看,其范围应在 0~4 区间内,越接近于 0 相关性越高。一阶和二阶变形参数初值在经过二阶 IC-GN 算法优化后,匹配子区的平均 ZNSSD 系数在 0. 000 6~0. 000 7 区间范围内,而 0 阶变形参数即使在 11×11 的子区大小也难以收敛到这个区间,随着子区范围的增大,0 阶初始变形参数越来越难以使算法收敛。由于篇幅关系,这里仅给出在 41×41 子区大小时,导入 0 阶初值和 2 阶初值进行二阶 IC-GN 迭代任务优化得到的最终子区 ZNSSD 系数分布图如图 9 所示。图 9(a) 和 (b) 对比示出,在使用二阶 IC-GN 算法时,针对含有二阶变形的图像对,0 阶初值很难使子区相关系数收敛到较低的水平,这也意味着此时匹配精度很低。

同时,表 1 中平均 ZNSSD 数据显示准确的 1 阶初值和 2 阶初值均能使子区的变形参数收敛。但通过平均迭代次数可以清晰地反映出二阶初值能有效降低子区 2 阶 IC-GN 迭代算法的迭代次数,在实际工程应用中,子区相关性匹配迭代次数直接决定了算法的运行效率。表中数据显示在本实验中,子区大小为 11×11 时,二阶初值较一阶初值能使迭代效率提升约 3. 8%;子区大小为 21×21 时,迭代效率提升约 8. 2%;子区大小为 31×31 时,迭代效率提升约 9. 1%;子区大小为 41×41 时,迭代效率提升约 8. 6%;子区大小为 51×51 时,迭代效率提升约 9. 9%。



(a) 0阶初值代入二阶IC-GN计算所得ZNSSD系数分布
(a) The ZNSSD coefficient distribution was calculated by substituting the 0-order initial value into the 2nd order IC-GN



(b) 2阶初值代入二阶IC-GN计算所得ZNSSD系数分布
(b) The ZNSSD coefficient distribution was calculated by substituting the 2nd order initial value into the 2nd order IC-GN

图 9 具有二阶变形的数字散斑仿真图像

Fig. 9 Digital speckle simulation image with 2nd order deformation

3.3 基于局部区域特征匹配和重投影的二阶形函数初值估计方法有效性验证实验

本节采用 2. 2 节所述的 5 种初值提取算法进行对比。为了便于比较,本文根据算法性质及计算方式将 Zhou^[49]提出的一阶初值提取方法命名为 SIFT_REGION_MULTI_PTS 方法,Zou 等^[50]提出的两种基于 SURF 算子的一阶初值提取方法分别命名为 SURF_REGION_MULTI_PTS 方法和 SURF_SINGLE_PT 方法。相应的,本文提出的两种基于局部特征检测和重投影的二阶初值提取算法命名为 SIFT_REGION_REP_MULTI_PTS 方法和 SURF_REGION_REP_MULTI_PTS 方法。

基于式(7)、(9)和(10),可以获得不同初值提取方法提取出的种子点初值变形参数与理论值之间的误差值。本文对几种方法的初值计算准确度进行了实验。首先使用最为关键的 u, v 初值数据计算种子点位移量和理论值进行对比,误差如式(13)所示。

$$Error_D = \sqrt{(u_{init} - u_{ideal})^2 + (v_{init} - v_{ideal})^2} \tag{13}$$

仍然使用3.1节中仿真得到的11组变形图片来进行初始最优种子点查找及初值计算。为测试算法能力,本实验不对图片进行任何ROI区域限制,单纯依靠上述5种算法自由运行在全图范围内进行最优种子点查找及初值估计。计算得到的最优种子点初值位移误差如图10所示。图10(a)中示出,当 s 取值为0.0019和0.0020时,SIFT_REGION_MULTIPTS方法出现了明显超出其余4种方法的误差,这个数量级的初值误差已经远远超出了2阶IC-GN算法的收敛能力,可以判定其已经失效了。本文选取了误差较小的更清晰的 $s=0.0010\sim0.0018$ 区间段显示在图10(b)中,可以清晰的看出SIFT_REGION_MULTIPTS方法在这个区间段误差仍然偏高,最大误差超过1.2 pixels。相比较而言其他4种方法误差在这一区间段内能基本稳定在0.4 pixels以下,较为精准。

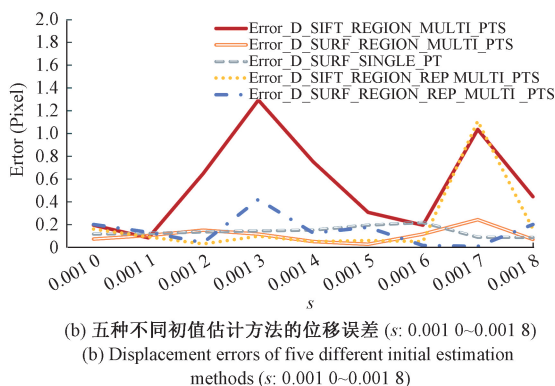
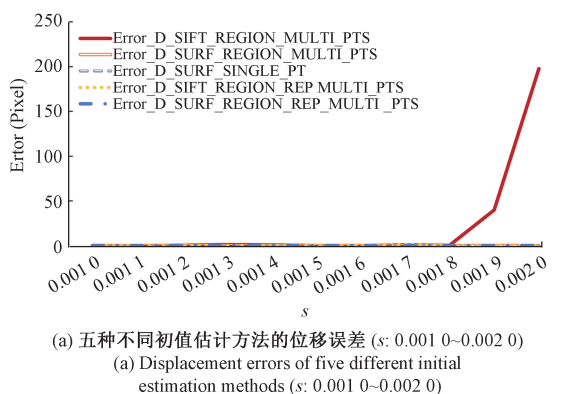


图10 5种不同初值计算方法刚性位移误差

Fig. 10 Displacement errors of five different initial estimation methods

本文提出的2种算法都较为稳定的完成了种子点位置的选取及初值计算任务。除了 $s=0.0017$ 时,SIFT_REGION_REP_MULTIPTS方法在 $s=0.0010\sim0.0020$ 区间内的最小误差为0.0066 pixels,整体误差小于0.2 pixels,优于另外4种方法。这充分说明了2.1节所

述基于局部特征提取和变形图像重投影的策略能抑制变形图像的非线性变形,从而使特征点提取,尤其是SIFT特征点提取更为精准。 $s=0.0017$ 时SIFT_REGION_REP_MULTIPTS方法出现的稍大误差和SIFT_REGION_MULTIPTS方法出现的误差近似,分析此时数据可知误差主要来源于SIFT特征点提取的精度在此时出现了波动,导致了最终的测量误差,这也说明了上述几种初值计算的方法对于局部特征提取精度的依赖性。

相比较而言,基于SURF特征提取的3种算法都较为稳定一些。SURF_REGION_MULTIPTS算法误差维持在0.05~0.3 pixels左右,最小误差为0.052 pixels;SURF_SINGLE_PT算法误差维持在0.08~0.2 pixels左右,最小误差为0.087 pixels;本文提出的SURF_REGION_REP_MULTIPTS算法误差维持在0.01~0.4 pixels左右,最小误差0.0076 pixels。

图8可以反映出这11组变形图片的特点,二阶不均匀变形量随 x 增大而增大,由于在实验中未对图片ROI进行任何限制,因此,算法自由计算所得的最优种子点 x 坐标的大小可以反映出该算法对不均匀变形的适应能力。

以 $s=0.0016$ 时的数据为例,此时种子点信息及上述5种算法的初值误差数据如表2所示。基于表2以及其他 s 值情况下的实测数据示出如下规律:SIFT局部特征提取相较于SURF算法对非均匀变形有更好的适应能力;区域内多特征点计算变形参数的算法比单点计算的算法有更好的适应能力;本文提出的重投影策略能进一步增强区域多特征点计算变形参数初值对非均匀变形的适应能力;上述5种算法中只有本文提出的2种算法具有估计二阶变形参数初值的能力。

值得一提的是,经实验验证,除了SIFT_REGION_MULTIPTS方法在 $s=0.0019$ 和 $s=0.0020$ 时计算出现的错误数据,上述5种方法在 $s=0.0010\sim0.0020$ 这一区间内的初值计算数据均能用于二阶IC-GN算法,并在相应的子区收敛,读者可根据自己的实际应用需求选择适合的初值估计算法。

3.4 基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向和二阶IC-GN的种子点生长匹配策略可行性验证实验

使用上述11组变形图片验证2.3节所述基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向和二阶初值传递的种子点生长法在二阶IC-GN算法中的应用可行性。

本节在参考图像上定义了顶点在(50, 50),宽200 pixels,高400 pixels的矩形ROI,使用基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向和二阶IC-GN的种子点生长与11组变形图像进行相关匹配,定义种子点生长步长为5 pixels,相关匹配子区大小为41 pixels×41 pixels,插值方法选用双三次B样条插值,种子点初值计算

表 2 种子点定位信息及初值估计误差数据($s=0.001\ 6$)

Table 2 Data of seed point location information and initial value estimation error

算法名称	种子点坐标	变形点坐标	初值误差数据
			($\Delta u, \Delta v, \Delta u_x, \Delta u_{xx}$ (if exists))
SIFT_REGION_MULTI_PTS	(71.025, 328.580)	(79.281, 328.580)	(0.196, 0.001, -0.045)
SURF_REGION_MULTI_PTS	(25.431, 202.025)	(26.548, 201.942)	(0.082, -0.083, -0.005)
SURF_SINGLE_PT	(14.868, 184.240)	(15.035, 184.129)	(-0.187, -0.111, -0.048)
SIFT_REGION_REP_MULTI_PTS	(86.778, 331.504)	(98.807, 331.550)	(-0.020, 0.046, -0.001, -1.101 $\times 10^{-5}$)
SURF_REGION_REP_MULTI_PTS	(27.470, 299.930)	(28.690, 299.918)	(0.012, -0.012, 0.005, 4.237 $\times 10^{-4}$)

采用 SIFT_REGION_REP_MULTI_PTS 方法,使用文献[42]中所述基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向的 1 阶 IC-GN 办法作为对照实验,两种方法设置相同的迭代终止条件。

11 组图像的平均 ZNSSD 系数,平均匹配误差,子区平均迭代次数如表 3 所示。表 3 数据示出,在当前子区参数及迭代终止条件下,基于零均值归一化最小平方距

离相关系数导向和二阶 IC-GN 的种子点生长策略能在仿真图像子区内取得较高的匹配精度,在 $s=0.001\ 0\sim 0.002\ 0$ 区间内,变形匹配精度优于 0.005 pixels,在当前子区大小下,无论从变形匹配误差还是相关系数来看,二阶 IC-GN 算法比一阶 IC-GN 算法都有显著的优势,实验结果也证明了本文提出的基于零均值归一化最小平方距离相关系数导向和二阶 IC-GN 的种子点生长匹配策略是可行的。

表 3 基于种子点生长的一阶、二阶 IC-GN 算法测试结果

Table 3 Test results of 1st and 2nd order IC-GN algorithm based on seed point growth

s	平均匹配误差 (Pixel)		平均 ZNSSD 系数		平均迭代次数	
	1 阶 IC-GN	2 阶 IC-GN	1 阶 IC-GN	2 阶 IC-GN	1 阶 IC-GN	2 阶 IC-GN
0.001 0	0.140 5	0.004 5	0.007 145	0.000 956	3.495	2.626
0.001 1	0.154 8	0.004 6	0.007 982	0.000 884	3.498	2.622
0.001 2	0.168 5	0.004 3	0.008 794	0.000 825	3.498	2.528
0.001 3	0.181 2	0.004 7	0.009 790	0.000 723	3.547	2.540
0.001 4	0.197 3	0.004 2	0.010 860	0.000 679	3.587	2.559
0.001 5	0.208 2	0.004 7	0.011 861	0.000 642	3.612	2.575
0.001 6	0.223 4	0.004 0	0.012 725	0.000 536	3.596	2.510
0.001 7	0.238 0	0.003 6	0.013 944	0.000 552	3.665	2.542
0.001 8	0.252 5	0.003 6	0.014 901	0.000 507	3.665	2.520
0.001 9	0.265 3	0.003 7	0.017 464	0.000 590	3.624	2.535
0.002 0	0.279 3	0.003 7	0.018 661	0.000 489	3.640	2.540

4 曲面物体连续非共面位移及变形场实测实验

实验选用 2 台海康 MV-CS020-10GM 相机搭配 12 mm HF1224M-10MP 镜头以及自行设计的工装组成双目相机测量系统,相机分辨率为 1 624 pixels $\times$ 1 240 pixels,单个像素尺寸为 4.5 μm $\times$ 4.5 μm 。

双目系统内外参数标定采用文献[37]所述标定方

法,采用平面靶标结合高精度离面位移测量的形式实现双目测量系统的高精度内外参数同时标定,离面位移选用 Zolix KA50 结合 MC600 控制器产生,使用 Attocube IDS3010 激光干涉仪进行高精度的单向离面位移测定,单向离面位移测定精度优于 1 μm ,标定及离面位移测试装置如图 11 所示。

双目测量系统的标定重投影误差为 0.027 pixels,标定参数如表 4 所示。

采用该双目系统对一个标称半径 15 cm 的亚克力材

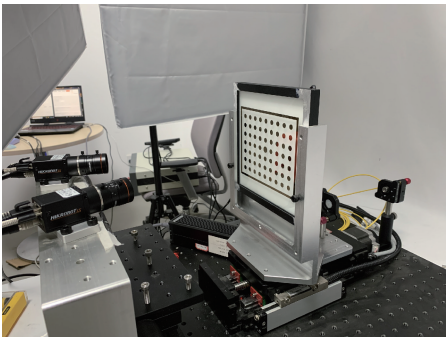


图 11 双目测量系统标定及离面位移测试装置
Fig. 11 Binocular system calibration and off surface displacement test device

质圆柱进行离面位移测量,圆柱固定于位移台上,表面通过水转印方式布置散斑图样,手动调节位移方向,使其大体垂直于双目系统基线,朝远离双目系统方向移动。

左右相机采集到的散斑圆柱初始位置参考图像经过去畸变和灰度值归一化处理,如图 12 所示。

采用 2.4 节所介绍的不依赖于极线校正的立体匹配与时序匹配策略进行序列图像的特征匹配,计算变形参数。

以图 12 中的图片对为初始参考图像对,后续图像对为变形图像对,按照图 5 和 6 的过程,即可计算得出世界坐标下的变形场 $[U_w \ V_w \ W_w]^T$,显然。通过计算得到的变形场信息和激光干涉仪测量的单向位移信息可以

表 4 双目系统标定参数
Table 4 Calibration parameters of binocular system

	左相机	右相机
内部参数	$\begin{bmatrix} 2\ 726.461 & -0.815 & 785.674 \\ 0 & 2\ 718.648 & 639.287 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2\ 705.695 & 0.612 & 767.446 \\ 0 & 2\ 712.912 & 637.559 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
外部参数	$R = \begin{bmatrix} 0.860 & -0.002 & 0.510 \\ 0.003 & 0.999 & -0.001 \\ -0.510 & 0.002 & 0.860 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} -128.214 \\ -0.045 \\ 35.303 \end{bmatrix}$

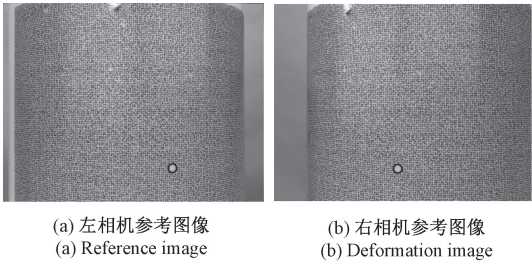


图 12 左右相机散斑圆柱参考图像
Fig. 12 Cylinder speckle reference image of left and right camera

计算得出每组图片 ROI 区域(500 pixels×500 pixels,逐点计算)内的位移(刚体平移)误差,下表给出使用本文所述不依赖于极线校正的最小二乘法计算得出的位移数据与使用文献[43]中基于极线约束修正计算得出的位移数据比对。

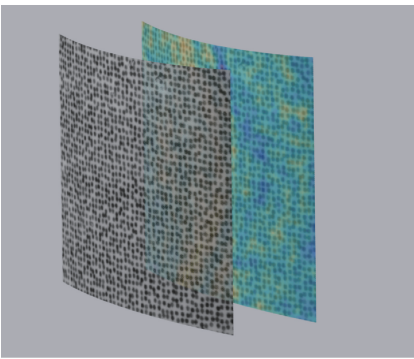
如表 5 所示,在当前的曲率下,随着位移台的移动,圆柱体离面深度的增加,表中两种测量算法测量的平均误差和标准差均有所提升,趋势是基本一致的。误差的提升符合双目系统本身的物理特性,即双目系统测量精度受测量深度以及景深的限制。在同一测量深度及匹配精度条件下,可以看出本文所述的不依赖于极线校正的最小二乘法计算得出的位移数据测量误差及标准差较文

表 5 两种三维重建方法连续非共面位移实验测量误差数据
Table 5 Error data of two 3D reconstruction methods for continuous non-coplanar displacement experiment measurement. 单位:mm

位移数据 (Z)	非极线约束最小二乘数据 (本文方法)		极线约束修正数据	
	平均误差	测量标准差	平均误差	测量标准差
1.000 957	-0.000 760	0.002 854	-0.000 762	0.002 852
2.002 261	-0.000 959	0.002 912	-0.000 963	0.002 913
3.002 215	-0.002 499	0.002 922	-0.002 507	0.002 921
4.001 415	-0.002 682	0.003 339	-0.002 691	0.003 345
5.003 102	-0.004 067	0.003 658	-0.004 075	0.003 656
6.003 445	-0.004 418	0.003 770	-0.004 423	0.003 772
7.003 241	-0.003 784	0.003 739	-0.003 783	0.003 742
8.002 453	-0.003 364	0.004 155	-0.003 373	0.004 164
9.003 178	-0.004 369	0.004 253	-0.004 380	0.004 260
10.004 378	-0.004 158	0.004 888	-0.004 172	0.004 898
11.004 007	-0.005 065	0.004 566	-0.005 078	0.004 571
12.003 103	-0.006 440	0.004 770	-0.006 445	0.004 774
13.003 611	-0.005 703	0.004 868	-0.005 710	0.004 876
14.004 959	-0.006 142	0.005 232	-0.006 150	0.005 238
15.004 770	-0.006 265	0.005 257	-0.006 268	0.005 263

献[43]中基于极线约束修正方法均有所减小。值得一提的是,上述两种三维重建方法精度表现都比较优秀,在当前相机结构参数下,深度变化为 15 mm 时能够达到小于 7 μm 的测量误差,可以用于高精度的变形测量中;深度变化在 1 mm 时甚至能达到小于 1 μm 的测量误差。并且上述两种方法都优于传统的解析计算三维坐标的方法^[43],由于篇幅关系这里不再给出具体数据,感兴趣的读者可以自行校验。

将表 5 中 $Z=15\text{ mm}$ 位置处的位移场数据表示在参考图像上(单位为 mm),并用计算所得三维点云数据重建测量 ROI 区域如图 13 所示。



(d) 三维点云重建效果(W_w 数据色谱附于变形点云上)
(d) 3D point cloud reconstruction effect
(W_w data chromatography attached to the deformed point cloud)

图 13 $Z=15\text{ mm}$ 位置处位移场示意图

Fig. 13 Displacement field diagram at $Z=15\text{ mm}$

在计算得到各个时序匹配特征点的世界坐标后,即可根据如图 14 所示步骤进行应变张量的计算:

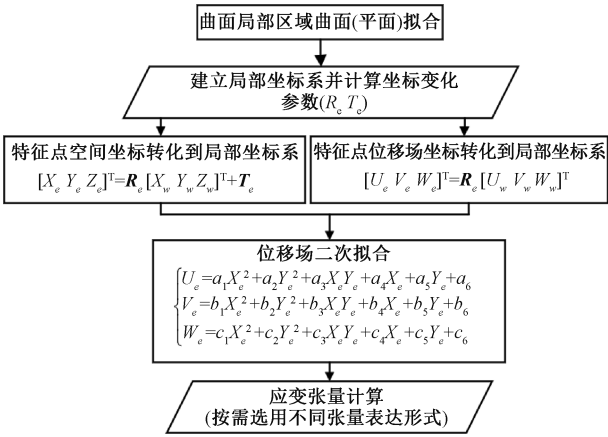
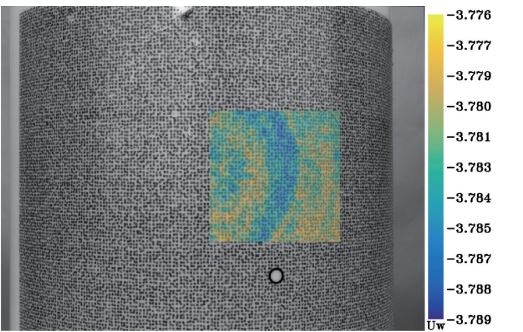


图 14 应变张量计算流程图

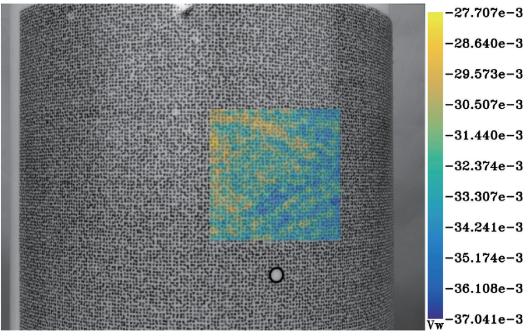
Fig. 14 Flow chart of strain tensor calculation

分别将 $Z=5\text{ mm}$, $Z=10\text{ mm}$ 及 $Z=15\text{ mm}$ 的格林-拉格朗日应变张量 $\varepsilon_{xx, GL}$ 及 $\varepsilon_{yy, GL}$ 表示在变形图像上,如图 15 所示。在没有加载情况下,应变张量应该等于 0。由于局部应变张量是由局部位移场拟合的参数计算得到的,所以,拟合的窗口大小,位移场数据的精准程度都会对应变张量造成影响。这也就是图 15 所反映的实际情况,结合表 5 中的数据,当 Z 增大之后,位移场测试的精度下降,从而使得拟合出的应变张量误差也会有相应的上升,图中色谱也更多的反映了这些测量误差带来的串扰。

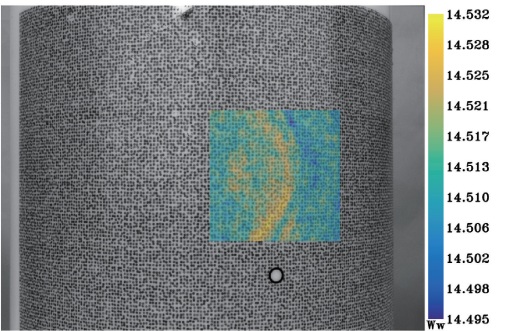
因此,在使用双目系统结合 DIC 技术进行应变测量时,应当关注测试距离可能带来的变形场系统误差。在当前的主流应变张量计算数学模型中,将 z 向位移场简化拟合到了 x 和 y 分量上,降低了 z 向数据带来的误差扰



(a) 世界坐标系下 X_w 向位移场(U_w)
(a) X_w displacement field (U_w) in world coordinate system



(b) 世界坐标系下 Y_w 向位移场(V_w)
(b) Y_w displacement field (V_w) in world coordinate system



(c) 世界坐标系下 Z_w 向位移场(W_w)
(c) Z_w displacement field (W_w) in world coordinate system

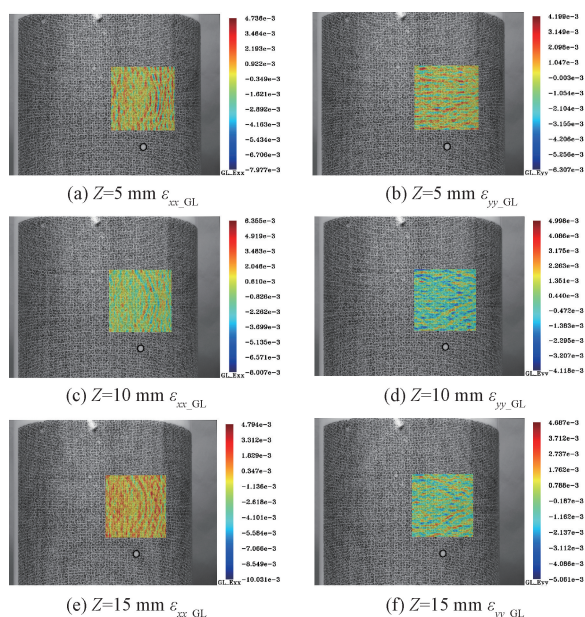


图 15 应变张量计算结果示意图(格林-拉格朗日应变张量)

Fig. 15 Diagram of strain tensor calculation results.

(Green-Lagrange strain tensor)

动,并可以更直观的与接触式应变测量方法相比较,但若 z 向局部区域变形较为复杂和不均匀时,该模型也可能会失效,未来我们会继续深入研究其发生失效的边际条件。

5 结 论

本文针对一定曲率的曲面立体匹配图像对或含有不均匀变形的时序图像对为测量对象,提出了一套新的基于重投影和局部特征匹配的可靠二阶初值估计方法。仿真实验证明本文所提的二阶初值估计方法有较高的计算精度,能更好的应对匹配图像对中不均匀变形的影响。相较于传统的零阶和一阶初值计算方法,本文方法能够为二阶 IC-GN 算法提供更高的收敛效率;仿真试验数据同时证明二阶 IC-GN 较一阶 IC-GN 算法在不均匀变形的测量中有更好的精度与收敛特性;本文提出的基于二阶变形参数初值生长策略,可以实现特征点二阶变形参数的初值传递和连续区域生长;真实圆柱的离面位移测量实验表明,基于本文所提初值估计方法和二阶 IC-GN 算法的全局立体匹配和时序匹配策略是有效的;本文给出的基于二阶 IC-GN 特征匹配和最小二乘法求解的不依赖于立体校正或外极线修正的特征点三维重建算法有较高的测量精度,优于传统的解析计算方法和基于极线校正的计算方法;实验表明,基于本文所提方法搭建的双目测量系统对一定曲率圆柱表面的非共面位移测量,能在 15 mm 景深范围内实现优于 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的位移场测量精度,在 1 mm 景深范围内实现 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的测量精度。总体而言,本

文所提的方法精度较高,具有很强的应对曲面立体图像对或不均匀时序图像对等非均匀变形的能力。

在未来的研究中,将通过加载试验深入研究融合本文所提方法的 3D-DIC 技术的测量能力,探索应变场测量数学模型失效的边界条件及应对方法,研究多双目传感器的全局标定以及全局测量,使 3D-DIC 测量技术更好的应用于科学实验和工程实际中。

参考文献

- [1] 许文杰, 杨旭, 全锦. 材料力学实验[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2019.
- XU W J, YANG X, QUAN J. Experiments of material mechanics[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2019.
- [2] 温登哲, 陈予恕. 航空发动机机匣动力学研究进展与展望[J]. 动力学与控制学报, 2013, 11(1): 12-19.
- WEN D ZH, CHEN Y SH. Review and prospect on the research of aero-engine casing dynamics[J]. Journal of Dynamics and Control, 2013, 11(1): 12-19.
- [3] 柴象海, 张晓云, 侯亮, 等. 航空发动机风扇机匣包容性等效试验与分析方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 162-167.
- CHAI X H, ZHANG X Y, HOU L, et al. Equivalent test and simulation verification for fan containment case of aero engine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 162-167.
- [4] 马双超. 航空发动机机匣模型确认与动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- MA SH CH. Structure dynamic analysis and model validation of aero-engine casings[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [5] 沈观林. 应变电测与传感器技术的新发展及应用[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 87-91, 96.
- SHEN G L. New developments of strain gauge measurement and transducer technique and applications in all kinds of engineers and domains[J]. China Measurement and Test, 2011, 37(2): 87-91, 96.
- [6] PAPADOPOULOS K, MORFIADAKIS E, PHILIPPIDIS T P. Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads[J]. Wind Energy, 2000, 3(1): 35-65.
- [7] BERG J C, RESOR B R, PAQUETTE J A, et al. SMART Wind turbine rotor: Design and field test[J]. Sand, 2014, DOI:10.2172/1220845.
- [8] 房剑锋. 基于机匣应变的航空发动机碰摩故障识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 22-28.
- FANG J F. Aero-engine rub-impact fault identification

- based on casing strain in flight[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3):22-28.
- [9] 李演楷, 卫明阳, 张云辉, 等. 引伸计的测量原理及其改进方法[J]. 工程与试验, 2010, 50(3):64-66, 74.
- LI Y K, WEI M Y, ZHANG Y H, et al. Measurement principle and improvement method of extensometer[J]. Engineering and Test, 2010, 50(3):64-66, 74.
- [10] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1681-1692.
- LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1681-1692.
- [11] RAFFAELLA D S. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications [J]. Sensors, 2015, 15(8):18666-18713.
- [12] YÜKSEL K, MOEYAERT V, MÉGRET P, et al. Complete analysis of multireflection and spectral-shadowing crosstalks in a quasi-distributed fiber sensor interrogated by OFDR [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5):988-95.
- [13] TAO L, YANG Z H, RUAN G W, et al. Deformation measurement method of spacecraft structure based on speckle pattern interferometry and digital image correlation[C]. 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2018:203-207.
- [14] 文华, 付亚冰, 陈建初, 等. 三维电子散斑干涉测量技术在机匣应变测试中的应用研究[C]. 2012 年航空试验测试技术峰会暨学术交流会, 2012, 00000036-00000038.
- WEN H, FU Y B, CHEN J CH, et al. Research on the application of three-dimensional electronic speckle interferometry in the strain measurement of the casing[C]. 2012 Aviation Test Technology Summit and Academic Exchange Conference, 2012, 00000036-00000038.
- [15] 卿新林. 云纹干涉法的理论与应用研究评述[J]. 力学与实践, 1997(6):15-22.
- QING X L. Review on theory and application of moire interferometry [J]. Mechanics in Engineering, 1997(6):15-22.
- [16] 梁皓. 基于三维数字图像相关法的全场变形测量技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- LIANG H. Investigation on full-field deformation measurement based on 3D digital image correlation method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [17] 孙光颖. 现代全息术的回顾与展望[J]. 物理与工程, 2002(4):34-36, 42.
- SUN G Y. An overview and prospect on modern holography [J]. Physics and Engineering, 2002(4):34-36, 42.
- [18] 曾祥福, 刘程林, 马少鹏. 高速三维数字图像相关系统及其动载三维变形测量[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4):364-369.
- ZENG X F, LIU CH L, MA SH P. Measurement of dynamic three-dimensional deformation of structures using high-speed 3-D digital image correlation system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4):364-369.
- [19] 刘思梦, 徐向阳, 马银行, 等. 三维数字图像相关变形测量结果的一致性研究与校验[J]. 实验力学, 2022, 37(5):610-620.
- LIU S M, XU X Y, MA Y H, et al. Consistency research and verification of results of 3D digital image correlation deformation measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):610-620.
- [20] 谭馨儿, 赵佳芃, 黄锐. 用于材料变形测量的数字图像相关方法[J]. 工程与试验, 2024, 64(1):71-74.
- TAN X ER, ZHAO J P, HUANG R. Digital image correlation method for material deformation measurement[J]. Engineering & Test, 2024, 64(1):71-74.
- [21] 李君, 雷宗宇, 蔡子峥, 等. 基于改进白鲨优化的 DIC 位移测量方法[J/OL]. 激光技术, 1-12 [2024-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20240621.1400.004.html>.
- LI J, LEI Z Y, CAI Z ZH, et al. DIC displacement measurement method based on improved white shark optimizer [J/OL]. Laser Technology, 1-12 [2024-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20240621.1400.004.html>.
- [22] ZHU R, JIANG D, HUANG ZH X, et al. Full-field modal identification using reliability-guided frequency-domain-based digital image correlation method based on multi-camera system [J]. Measurement, 2023, 211:112567.
- [23] 赵华涛, 唐新桥, 陈振宇. 基于多光谱数字图像相关的全场厚向应变变测量[J]. 光学学报, 2024, 44(11):74-81.
- ZHAO H T, TANG X Q, CHEN ZH N. Full-field thickness-direction strain measurement based on multispectral digital image correlation [J]. Acta Optica

- Sinica, 2024, 44(11):74-81.
- [24] 刘越, 周志卫, 刘艳欣, 等. 基于数字图像相关技术的鼓风机叶片动态应变试验[J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(1):19-23.
- LIU Y, ZHOU ZH W, LIU Y X, et al. Dynamic strain test of blower blade based on digital image correlation technology [J]. PTCA (PARTA: PHYS. TEST.), 2023, 59(1):19-23.
- [25] 崔颖, 王之腾, 陈立伟, 等. 小视场下基于可移动 3D-DIC 的全场应变测量方法[J]. 应用科技, 2023, 50(5):72-77,87.
- CUI Y, WANG ZH T, CHEN L W, et al. Full-field strain measurement method based on mobile 3D-DIC in a small field of view[J]. Applied Science and Technology, 2023, 50(5):72-77,87.
- [26] 谢瑞丽, 许巍, 陈新, 等. 基于单高速相机 3D-DIC 的涡轮叶片全场振动测量[J]. 振动测试与诊断, 2024, 44(1):18-23,194.
- XIE R L, XU W, CHEN X, et al. Full-field vibration of turbine blade based on single-camera high-speed 3D digital image correlation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1):18-23,194.
- [27] YE M T, LIANG J, LI L G, et al. Full-field motion and deformation measurement of high speed rotation based on temporal phase-locking and 3D-DIC [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 146(1):106697.
- [28] 张红颖, 陈晨, 王韶彬, 等. 三维散斑相关法在机翼变形动态测量中的应用[J]. 测控技术, 2016, 35(7):31-34.
- ZHANG H Y, CHEN CH, WANG SH B, et al. Application of 3D-DSCM in dynamic test on airplane wing's deformation [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(7):31-34.
- [29] 刘辉, 梁晋, 叶美图, 等. 基于数据映射优化的航空机匣变形测量偏差比对[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20):2930-2942.
- LIU H, LIANG J, YE M T, et al. Comparison of deviation in aircraft casing deformation measurement based on data mapping optimization [J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(20):2930-2942.
- [30] 刘聪. 基于立体视觉的动态变形测量研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LIU C. Study on dynamic deformation measurement based on stereoscopic vision [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [31] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHANG G J. Machine vision [M]. Beijing: CSPM, 2005.
- [32] HEIKO H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2):328-41.
- [33] PAN B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8):082001.
- [34] 陈振宇. 数字散斑场优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- CHEN ZH N. Optimizations and applications of digital speckle patterns [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [35] SUTTON M, ORTEU J J, SCHREIER H W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [36] 丘维声. 解析几何(第三版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2015.
- QIU W SH. Analytic geometry (3rd edition) [M]. Beijing: Peking University Press, 2015.
- [37] ZHENG H, DUAN F J, LI T Y, et al. A stable, efficient, and high-precision non-coplanar calibration method: Applied for Multi-camera-based stereo vision measurements [J]. Sensors, 2023, 23(20):23208466.
- [38] HARTLEY R I. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras [J]. Springer-Verlag, 1992: 579-587.
- [39] FUSIELLO A, TRUCCO E, VERRI A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12(1):16-22.
- [40] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for Matlab[Z]. CaltechDATA, 2022.
- [41] GU F F, SONG ZH, ZHAO Z L. Single-shot structured light sensor for 3D dense and dynamic reconstruction [J]. Sensors, 2020, 20(4):20041094.
- [42] 宋韶辉. 基于数字散斑的双目立体视觉动态变形测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- SONG SH H. Research on dynamic deformation measurement method of binocular stereoscopic vision based on DSCM [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [43] 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(8):192-201.
- SHAN B H, HUO X Y, LIU Y. A stereovision measurement method using epipolar constraint to correct digital image correlation matching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8):192-201.

- [44] PAN B, XIE H M, WANG ZH Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [45] LIU X Y, TAN Q C, XIONG L, et al. Performance of iterative gradient-based algorithms with different intensity change models in digital image correlation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(4): 1060-1067.
- [46] XU J, MOUSSAWI A, GRAS R, et al. Using image gradients to improve robustness of digital image correlation to non-uniform illumination: Effects of weighting and normalization choices [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(5): 963-979.
- [47] GAO Y, CHENG T, SU Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 73-80.
- [48] BAI R X, JIANG H, LEI ZH K, et al. A novel 2nd-order shape function based digital image correlation method for large deformation measurements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 48-58.
- [49] ZHOU Y H, PAN B, CHEN Y Q. Large deformation measurement using digital image correlation: A fully automated approach [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7674-7683.
- [50] ZOU X, PAN B. Full-automatic seed point selection and initialization for digital image correlation robust to large rotation and deformation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138:106432.
- [51] ZHENG H, DUAN F J, FU X, et al. A non-coplanar high-precision calibration method for cameras based on an affine coordinate correction model [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(9): 095018.

作者简介



郑好, 2014 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为光电测量及计算机视觉检测技术, 工业过程故障诊断技术, 旋转机械健康监测, 机器学习及数据分析。

E-mail: zhenghao075_tju@tju.edu.cn

Zheng Hao received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2014. He is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University (State Key Lab of Precision Measuring Technology & Instruments). His main research interests include photoelectric measurement and computer vision inspection, industrial process fault diagnosis, rotating machinery condition monitoring, machine learning, and data analysis.



段发阶 (通信作者), 1991 年于天津大学获得硕士学位, 1994 年于天津大学获得博士学位, 从 2004 年至今为天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室教授, 2005 年被列入国家教育部新世纪优秀人才计划。主要研究方向为光电测量及计算机视觉检测技术, 在线测量与设备健康监测技术, 海洋环境监测与水声探测技术。

E-mail: fjduan@tju.edu.cn

Duan Fajie (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 1991 and 1994, respectively. He is a Professor with the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University since 2004. He was named the National New Century Excellent Talents of Ministry of Education in 2005. His main research interests include photoelectric measurement and computer vision detection technology, online measurement and equipment health monitoring technology, marine environment monitoring and underwater acoustic detection technology.