

文章编号: 1001-4888(2007)06-0556-12

用于物体表面形貌和变形测量的 三维数字图像相关方法^{*}

潘 兵, 谢惠民, 李艳杰

(清华大学 航天航空学院工程力学系, 北京 100084)

摘要: 使用单个摄像机的二维数字图像相关方法通常仅局限于平面物体的面内变形测量, 而使用两个摄像机基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法克服了这一局限, 可对平面和曲面物体表面的三维形貌和载荷作用下的三维变形进行测量。本文介绍了三维数字图像相关方法的基本原理及其关键技术, 并用两个典型的实验验证了该方法的有效性。

关键词: 数字图像相关方法; 立体视觉; 摄像机标定; 变形

中图分类号: O34 **文献标识码:** A

0 引言

材料或结构在各种载荷作用下的表面变形测量是实验力学的重要任务之一。由于具有非接触、全场、高空间分辨率和高精度的优点, 包括干涉方法和非干涉方法在内的各种光学测量方法在实验力学中扮演着不可替代的重要角色。其中, 美国 University of South Carolina 的 M. A. Sutton 等在 1983 年提出的数字图像相关方法^[1~4] (Digital Image Correlation—DIC) (又称为数字散斑相关方法^[5] (Digital Speckle Correlation Method—DSCM) 或数字散斑照相 (Digital Speckle Photography)^[6]), 已经作为一种光学测量的有效手段常见应用于实验力学及其它科研领域和各种工程方面。

最初, 这种基于数字图像处理的光学测量方法的目的是为了得到平面物体在载荷作用下其表面的面内变形信息。测量系统使用一个摄像机, 并且使该摄像机的光轴与被测物面近似垂直, 对物体表面清晰成像后, 采集变形前后被测物体表面的两幅图像数字化后存入计算机。数字图像相关方法通过跟踪变形前图像中, 以各选定计算点为中心的图像小区在变形后图像中的位置变化来获得各计算点的位移信息。二维数字图像相关方法的一个基本局限是只能测量平面物体的面内位移, 并且要得到准确可靠的测量结果, 对被测物体、被测物体的变形状态以及成像系统还需提出以下要求^[1], 即:

- 1) 被测物体表面应是一个平面或近似为一平面;
- 2) 摄像机光轴应当与被测物面垂直或近似垂直, 并且成像系统畸变误差可以忽略不计;
- 3) 被测物体变形主要发生在面内, 离面的位移分量非常小;
- 4) 被测物体表面具有随机的灰度分布可作为变形信息载体为相关匹配提供特征。

在实际的实验条件下, 由于试件的加工误差、实验设备的原因、人为因素以及材料泊松效应等诸多因素的存在, 条件 1、2、3 是很难完全得到满足的。实际上, 对于第 1 个条件, 如果被测物体表面高度起

^{*} 收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-12-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 2004CB619304; 国家自然科学基金: 10732080, 10121202, 10472050, 10625209; 教育部优秀青年教师资助计划和新世纪优秀人才支持计划; 北京市自然科学基金 (3072007)

通讯作者: 潘兵 (1978—), 男, 博士研究生, 主要从事实验力学方法及应用研究。E-mail: panb04@mails.tsinghua.edu.cn

伏足够小,那么可以将其表面作为一个近似的平面来处理。对于第2个条件,实际上是要求被测物体表面的物点与像点之间存在理想的线性对应关系。但是由于通常情况下是依靠经验进行判断,光轴与被测物面法线间的偏差总是存在的,并且实际所采用的成像镜头或多或少都存在畸变。然而成像系统的几何误差的影响通常很小,因此应用二维数字图像相关方法时很少见有文献对这部分的影响进行修正。但是在某些情况下,比如对用广角镜头^[7]以及显微镜拍摄图像^[8~10]进行相关计算时,成像系统几何畸变误差的修正则是必须的。对于第3个条件,文献[1]建议采用远心镜头(Telecentric len)来减小由于离面位移引起的放大倍数改变对测量结果的影响。而要满足第4个条件则相对要容易得多,因为某些材料(如岩石、木材)表面的纹理本身就能提供随机的灰度分布可作为匹配特征,当物体表面得灰度变化不明显时,则可以很容易地利用人工制斑的方法为相关匹配提供特征。

上述的前三个条件限制了使用单个摄像机的数字图像相关方法的应用只局限于平面物体的二维(面内)变形测量。而在实际应用中,为了满足对平面或曲面物体表面的三维形貌以及三维变形测量的迫切要求,将二维数字图像相关方法拓展到三维变形测量是非常必要且令人期待的。在实验力学领域,最早将数字图像相关方法应用于三维变形场测量的研究出现在1993年,P. F. Luo和Sutton等^[11]利用两个摄像机从不同角度对被测物体表面成像,首先对双目立体视觉模型进行标定,获得两个摄像机的内外参数,然后直接利用二维数字图像相关中的相关匹配算法,得到左右两幅图中对应点的视差。从各点的视差数据和预先获得的标定参数则能恢复物体表面的三维形貌。而通过比较施加载荷前后测量区域内各点的三维形貌的变化,则能得到全场的三维位移分布。这种可测量物体表面的三维形貌以及三维变形的基于双目立体视觉原理的数字图像相关方法现在通常被称为三维数字图像相关方法。

在基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法的测量过程中,需要完成对计算结果有直接影响的两个关键性的步骤:标定和匹配。标定即是确定两个摄像机内、外参数的过程,在三维数字图像相关方法中标定扮演了关键角色。因为标定的精度直接影响到最终的测量结果,即使是最好的匹配算法也不能克服因标定不准确引起的测量误差。Luo和Sutton等^[11]提出利用二维数字图像相关方法和散斑图像来进行摄像机标定,通过多次精确移动散斑图像的位置并计算图像上多点的位移,用最优化方法求解摄像机的内外部参数。林碧森^[12,13]和Mikael Sjøkdahl^[14]等也采用了类似的方法,虽然该方法能得到摄像机内外参数,但整个标定的过程非常烦琐,难以在实际应用中推广,从而也限制了三维数字图像相关方法在实际测量中的应用。1996年,Helm和Sutton等^[15]改进了这种标定方法,采用高精度的平面玻璃网格模板进行标定,在很大程度上降低了标定的难度和复杂性,推进了三维数字图像相关方法的发展,但是平面玻璃网格模板需要在其背面采用均匀的照明,网格节点的提取方法也很复杂且不能实现自动提取。国内相关研究人员多采用计算机视觉中成熟的标定方法。如周灿林^[16]采用了计算机视觉中的两种最常用的标定方法,即1986年Tsai^[17]提出的经典的两步标定法和1999年张正友提出的Zhang标定法^[18,19]。孟利波^[20]等在研究三维数字图像相关方法中,对摄像机的标定也采用了Tsai两步标定法。本文采用的双目立体视觉成像系统标定方法^[21,22]也是基于Zhang标定法,但增加了非线性最小二乘优化方法对两个摄像机的内部参数和相对位置及姿态做全局优化,因此保证了标定结果的可靠性。

匹配的任务是寻找测量系统中两个摄像机分别记录数字图像中的对应点,通常被认为是立体视觉中最为困难的部分。幸运的是,二维数字图像相关中关于相关匹配的丰富研究结果可以帮助我们解决不同视角图像中对应点的匹配问题。在有关三维数字图像相关方法的早期论文里,P. F. Luo等^[11]直接将二维数字图像相关方法中的相关匹配算法应用到左右摄像机图像的匹配中。之后,Helm等^[13]对此做了改进,他们假设空间物体表面是由很多的小平面组成(文献[20]中称之为小平面对假设),而采用了一种投影—逆向投影的方法,通过搜索使两图互相关系数为最大值的候选空间平面的参数而完成匹配任务。与此不同,Garcia等^[23]和Schreier^[24]直接采用二阶形函数来对左右摄像机中的图像子区进行近似,并且Schreier^[24]的分析表明采用对图像子区作二阶形函数近似的系统误差要低于基于投影约束的小平面假设的方法。

本文对基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法的基本原理,以及其中的关键技术进行介

绍,并用最新的双目立体视觉成像系统标定方法和基于二次形函数的立体匹配方法实现了三维数字图像相关研究,最后用两个典型实验进一步验证了该方法的有效性。

1 双目立体视觉的基本原理

对人类的视觉研究表明,人类是通过两眼分别同时获取外部场景的二维图像,然后经过大脑的信息处理过程,从而得到所观察到的外部场景三维(位置和远近)信息。双目立体视觉的基本原理与此类似,即利用两个摄像机从不同方位分别同时记录空间同一场景的图像,然后寻找这两幅二维图像中的对应点,根据由标定得到的两个摄像机的内外部参数,可以计算得到该点在空间中某个人为定义坐标系的三维坐标。

图 1 是双目立体视觉原理的简单示意图^[25],其中 O_{c1} 和 O_{c2} 分别表示左右两个摄像机的光心。从图中可以看到,空间中的待测点 P 分别成像于点 P_1 (位于左摄像机的像平面上)与点 P_2 (位于右摄像机的像平面上)。双目立体视觉的目标,就是要从点 P_1 和点 P_2 确定点 P 在预先设定的世界坐标系中的坐标,从图 1 可以很直观地看到,如果只有一个摄像机,那么只能得到空间中过 P 点的一条直线 $O_{c1}P_1$ 或 $O_{c2}P_2$,却无法确定 P 的具体位置。因此至少需要两个摄像机,才能唯一确定空间 P 点的三维坐标。因为点 P 既位于直线 $O_{c1}P_1$ 上又位于直线 $O_{c2}P_2$ 上,因此由 $O_{c1}P_1$ 和 $O_{c2}P_2$ 两条直线的交点即确定了空间 P 点的三维坐标。

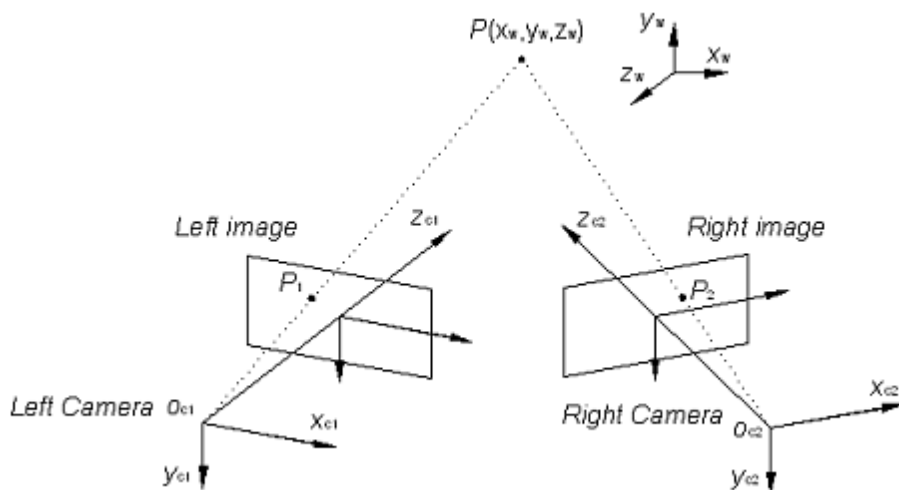


图 1 双目立体视觉基本原理示意图

Fig. 1 Schematic figure of the basic principle of binocular vision

2 双面立体视觉成像模型及其标定

2.1 双目立体视觉成像模型

三维空间点在摄像机成像平面上的投影可用简单的理想针孔成像模型来描述^[18],在齐次坐标下该模型可表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 s 为任意的比例系数; $(R \ t)$ 为外部参数分别为从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。A 称为摄像机的内部参数,由下式给出:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, (u_0, v_0) 为主点坐标; α 和 β 分别为图像在 u 轴、 v 轴的焦距参数(以像素为单位); γ 为图像的歪斜参数。

简单的针孔成像模型往往不能准确地反映实际的成像几何关系, 常用摄像系统往往存在显著的镜头畸变, 尤其是径向畸变。畸变会导致实际的图像坐标偏离理想的图像坐标:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 δ_x 和 δ_y 为镜头畸变引起的理想像点与真实像点在 x 和 y 两个方向上的偏差。实际的镜头畸变包括径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变等^[26]。真实的镜头畸变因素是很复杂的, 但摄像机标定算法中, 通常仅考虑上述三种畸变因素的影响, 有时甚至只考虑径向畸变的影响, 如 Tsai^[17] 提出的两步标定法就只考虑了径向畸变, 其原因在于, 一是径向畸变是最主要的镜头畸变因素, 其它的畸变相对而言都是小量, 二是引入太多的畸变因素, 将会影响摄像机标定解的稳定性。本文采用的模型也只考虑径向畸变, 即:

$$\begin{aligned} \delta_x &= (u - u_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4] \\ \delta_y &= (v - v_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4] \end{aligned} \quad (4)$$

这里, k_1, k_2 分别为一阶和二阶径向畸变系数; r 为 (u, v) 到主点的距离。

对于双目立体视觉系统, 其标定与单个摄像机的标定并不完全相同^[21,22]。在双目立体视觉系统除了要标定每个摄像机的内部参数之外, 还需要精确确定两个摄像机之间的相对位置和姿态。对于任意一个空间点 P , 其三维世界坐标以及左右摄像机的图像坐标分别为 x_w, x_l 和 x_r , 则有:

$$\begin{aligned} x_l &= R_l x_w + t_l \\ x_r &= R_r x_w + t_r \end{aligned} \quad (5)$$

从上式中消去 x_w 则有:

$$x_l = R_l R_r^{-1} x_r + t_l - R_l R_r^{-1} t_r \quad (6)$$

令:

$$\begin{aligned} R_{l2l} &= R_l R_r^{-1} \\ t_{l2l} &= t_l - R_l R_r^{-1} t_r \end{aligned} \quad (7)$$

因此有:

$$x_l = R_{l2l} x_r + t_{l2l} \quad (8)$$

综上所述, $A_l, A_r, R_{l2l}, t_{l2l}, k_{1,l}, k_{2,l}, k_{1,r}, k_{2,r}$ 为双目立体视觉系统需要标定的系统参数。

2.2 双面立体视觉成像系统标定

2.2.1 标定靶及其特征提取

用于标定的标定靶应该具有容易被计算机程序识别和能够精确提取位置的特征。如图2所示, 常见的两种平面标靶分别为:

a) 棋盘格标靶^[17~20]。棋盘格标靶的特征点是黑白方格的角点, 其中角点位置的提取可分两步完成: 1) 先通过 Harris 算子^[27]将角点位置精确地定位在整像素位置; 2) 利用迭代的方法进一步提高角点的定位精度到亚像素^[28], 最终获得的角点定位精度可达 0.05 像素。

b) 圆点标靶^[21,22,24]。圆点标靶是另一种常见的标定靶, 这种形式的标靶采用与背景颜色不同的圆点作为特征标记, 通过重心提取算法来获得标记圆点的精确位置, 可实现标记点位置的自动提取。但是当 CCD 靶面与标定靶不平行时, 圆型标记点会被成像为椭圆点, 而椭圆的重心与圆的重心并不完全重合, 两者之间存在与角度有关的系统误差, 需要另外通过算法来补偿^[24,29]。

2.2.2 双目立体视觉成像系统标定

文献[21,22]对双目立体视觉成像系统标定做了详细的介绍, 本文对双目立体视觉测量系统的标定

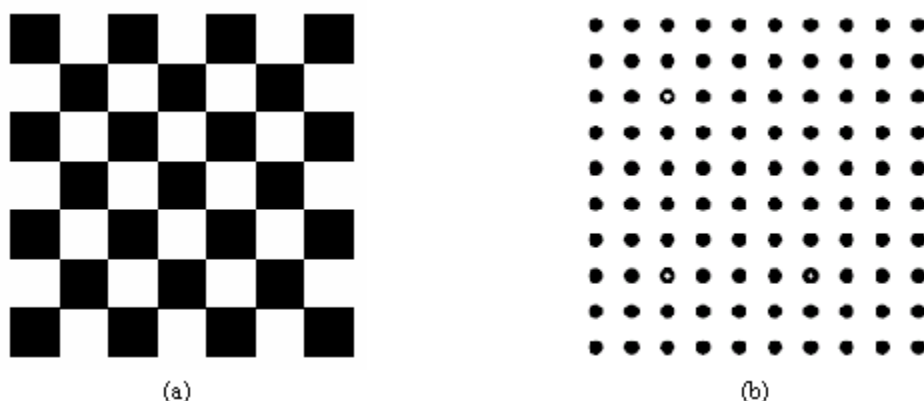


图 2 (a) 棋盘格标靶, (b) 圆点标靶

Fig. 2 (a) Chessboard target, (b) Dot target

方法是建立在张正友提出的单个摄像机标定方法^[18]的基础上。用 Zhang 标定法对两个摄像机分别进行标定可获得每次拍摄时的内外部参数 $A_l, R_{l,i}, T_{l,i}$ 和 $A_r, R_{r,i}, T_{r,i}$ 。但在各次拍摄过程中左右摄像机的相对位置和姿态是固定的,因此理论上 $R_{r2l,i}$ 和 $t_{r2l,i}$ 都应该相等。但由于各种噪声的影响和计算误差的存在,对于各幅标定图像获得的 $R_{r2l,i}$ 和 $t_{r2l,i}$ 并不相等。因此本文采用了文献[21,22]介绍的非线性最小二乘优化方法对两个摄像机的内部参数和相对位置和姿态做全局优化。优化的目标函数为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{l,i}} \| m_{l,ij} - \tilde{m}(A_l, k_{1,l}, k_{2,l}, R_{l,i}, t_{1,i}, X_{1j}) \|^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{r,i}} \| m_{r,ij} - \tilde{m}(A_r, k_{1,r}, k_{2,r}, R_{l,i}, t_{1,i}, R_{r2l}, t_{r2l}, X_{1j}) \|^2 \quad (9)$$

这里: $\tilde{m}(A_l, k_{1,l}, k_{2,l}, R_{l,i}, t_{1,i}, X_{1j})$ 为左摄像机第 i 幅标定靶图上的第 j 个特征角点用非线性模型计算出来的图像坐标; $m_{l,ij}$ 为由角点提取算法识别的对应点的真实图像坐标; $\tilde{m}(A_r, k_{1,r}, k_{2,r}, R_{l,i}, t_{1,i}, R_{r2l}, t_{r2l}, X_{1j})$ 为右摄像机第 i 幅标定靶图上的第 j 个特征角点用非线性模型计算出来的图像坐标; $m_{r,ij}$ 为由角点提取算法识别的对应点的真实图像坐标。上式可用 Levenberg-Marquart 算法进行优化,其中, $A_l, A_r, R_{l,i}, t_{l,i}$ 的初始值已通过上节的方法获得,畸变系数的初始值可设为 0; R_{r2l} 和 t_{r2l} 的初始值可设为 $R_{r2l,i}$ 和 $t_{r2l,i}$ 的平均值,优化结束后可获得双目立体视觉测量系统的所有标定参数。

3 立体匹配

在三维数字图像相关方法中,对左、右摄像机采集的数字图像要实现对应图像小区的精确匹配,由于需要考虑到摄像机的参数以及物体表面的几何特征,这就极大地增加了形函数选择的复杂性。根据 Garcia^[23]的研究结果,本文采用不考虑投影约束而直接采用二阶形函数来对左右摄像机中的图像子区变形进行近似的匹配方法。

该方法抛弃了投影约束限制,使用相关运算中图像子区的二阶形函数^[30]来近似投影变换(如图 3 所示),因此,描述左右视图中两个图像小区相似性的标准互相关系数^[31]可写为:

$$C(\vec{p}) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{I(x, y) - I_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [I(x, y) - I_m]^2}} - \frac{I'(x', y') - I'_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [I'(x', y') - I'_m]^2}} \right]^2 \quad (10)$$

这里,描述两个图像子区中各点位置对应关系的形函数^[23,30]可写为:

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x + \xi_0 + \xi_x \Delta x + \xi_y \Delta y + \frac{1}{2} \xi_{xx} \Delta x^2 + \xi_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \xi_{yy} \Delta y^2 \\ y' &= y_0 + \Delta y + \eta_0 + \eta_x \Delta x + \eta_y \Delta y + \frac{1}{2} \eta_{xx} \Delta x^2 + \eta_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \eta_{yy} \Delta y^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$; ξ_0, η_0 分别为参考图像子区中心点 $P(x_0, y_0)$ 在 x 和 y 方向的视差; ξ_x ,

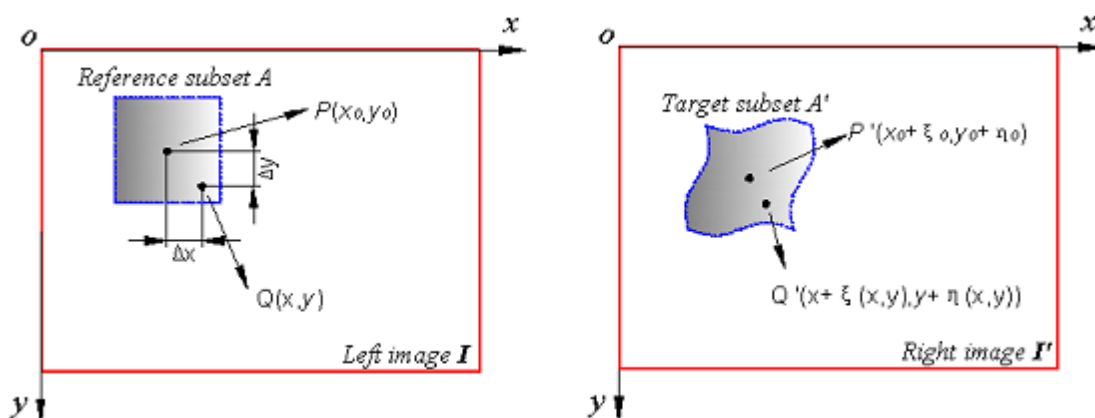


图3 双目立体视觉中左右视图对应图像子区示意图

Fig. 3 Schematic figure of the reference subset of left image and target subset in right image

ξ_y, η_x, η_y 为参考图像子区的一阶视差梯度; $\xi_{xx}, \xi_{xy}, \xi_{yy}, \eta_{xx}, \eta_{xy}, \eta_{yy}$ 为参考图像子区的二阶视差梯度。公式(10)可用 Newton-Rapshon 方法优化^[31]。图像子区的二阶形函数能很精确地近似投影变换, 理论分析显示^[24]用方法来匹配左右视图中的对应点不仅较简便而且具有更高的匹配精度。

4 三维形貌重建与三维位移计算

4.1 三维形貌重建

前面已经介绍了如何获得双目立体视觉成像系统的内外部参数, 以及如何利用立体匹配方法来精确匹配左右两个摄像机所拍摄图像的对对应点。在对两个摄像机完成标定后, 获得了它们的内外参数, 同时也建立了一个基于标定模板的空间世界坐标系, 这时就可以从两个摄像机记录的图像上的对应像素点的二维图像坐标来重建三维空间坐标。通过第2节中的标定方法获得左右摄像机的内、外部参数和畸变系数后, 即可计算它们的投影矩阵 M_1 和 M_2 ^[25], 因此有:

$$z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

这里: $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ 分别为空间物体表面某点在左右摄像机的理想像平面齐次坐标; $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 为空间点在世界坐标系下的齐次坐标; $m_{ij}^k (k=1, 2)$ 为投影矩阵的第 i 行第 j 列元素。从上两式中分别消去 z_{c1} 和 z_{c2} , 于是得到如下关于空间坐标 (x_w, y_w, z_w) 的 4 个线性方程:

$$\begin{aligned} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) x_w + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) z_w &= m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) x_w + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) y_w + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) z_w &= m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) x_w + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) y_w + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) z_w &= m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) x_w + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) y_w + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) z_w &= m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

公式(14)的几何意义为过图1中 $O_{c1}P$ 和 $O_{c2}P$ 的空间直线, 因此空间点 P 就是空间直线 $O_{c1}P$ 和 $O_{c2}P$ 的交点。公式(14)中待求的未知量是 3 个世界坐标, 但独立方程有 4 个, 是一个超静定方程。事实上由于实际的数据不可避免地包含噪声, 因此对于这样的超静定方程可以用最小二乘法求出空间点的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 。对参考图像中多个点重复上述过程, 就可以得到若干个空间点坐标, 而三维形貌实质

上就是足够多的空间点直接构成或经曲面拟合后构成的。

4.2 三维位移测量

在实际的测量任务中,人们往往更为关注的是材料或结构在载荷下的全场三维位移测量。图 4 给出利用三维数字图像相关方法测量物体表面三维位移的流程图。

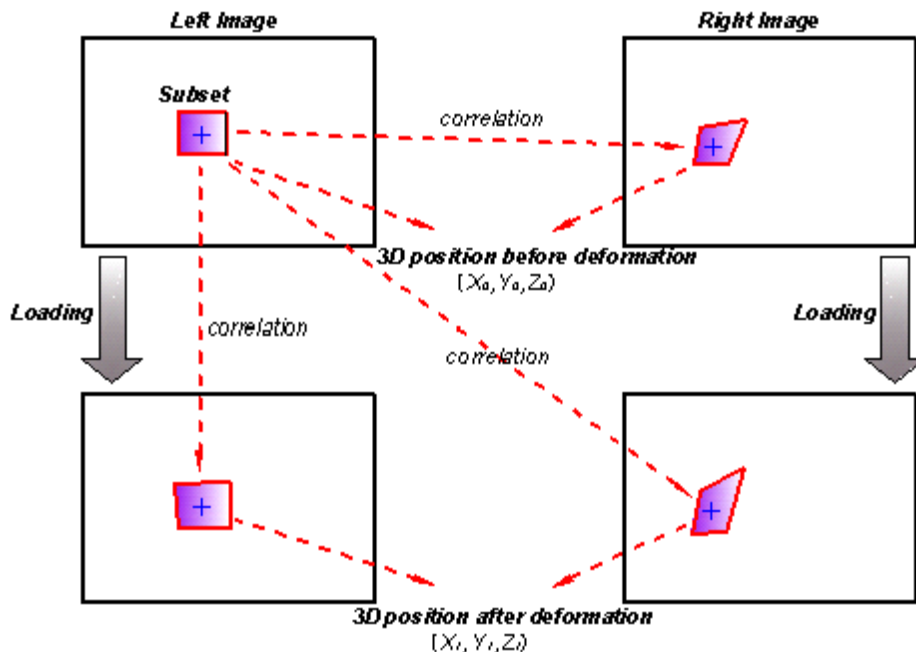


图 4 三维数字图像相关方法计算三维位移的步骤

Fig. 4 Flow chart of displacement measurement using 3D digital image correlation method

如图 4 所示,在变形前左摄像机的图像中选择要计算的图像子区,并通过立体匹配找到其在变形前右摄像机的图像中的相应位置,根据预先标定的摄像机内外部参数可得到该图像子区中心点的三维坐标 (x_0, y_0, z_0) 。同理,在变形后左摄像机、右摄像机的数字图像中也追踪到其相应位置,则同样可得到该点变形后的空间三维坐标 (x_1, y_1, z_1) 。变形前后空间坐标之差即是所求的三维位移,而对三维位移场选择适当的差分计算方法^[31,32]或平滑后再差分计算^[20,33~35]可求得相应的应变场。

5 精度分析

利用三维数字图像相关方法进行表面三维形貌重建,其重建的精度分析比较复杂。归纳起来,重建的精度主要取决于以下几个因素。

- 摄像机的成像质量及其图像的分辨率;
- 左右两摄像机的夹角;
- 摄像机的标定精度;
- 左右摄像机采集图像中的对应点的匹配精度。

作者认为可以用如下方式粗略地估计三维数字图像相关方法的测量精度,假设摄像机 x 方向的分辨率为 1280pixel,被测物体的尺寸为 L ,综合考虑到标定、匹配和三维重建误差的影响,在像素空间点重建的精度为 0.02pixel。因此,实际空间点位置的精度应为被测物体尺寸 L 的 $1/64000$ 。而文献[23]中使用了 1024×1024 pixels 的高分辨率摄像机,利用图像的灰度相关匹配算法,其报道的三维重建的精度可以达到被测物体尺寸的 $1/50000$ 。

6 实验验证

作为验证实验,本文用三维数字图像相关方法对规则圆柱体表面的三维形貌以及悬臂梁在载荷作

用下的离面位移进行了测量。其中,双目立体视觉测量系统中使用的摄像机为两个 CMOS 数字摄像机(北京大恒图像公司,型号 1302UM,分辨率为 1280×1024 , 8bit 灰度)。测量系统对被测物体清晰成像后;先拍摄 6 个不同姿态和方位的平面棋盘格标靶图像对,用以标定双目立体视觉测量系统的内外部参数;随后采集被测物体变形前后的图像对(对于形貌测量只需拍摄一次,而变形测量需拍摄变形前后的状态各一次)。

6.1 规则圆柱体表面形貌测量

图 5 显示了左右摄像机分别拍摄的圆柱体表面的图片,其中左图中矩形红色方框内为要进行三维形貌重建的区域。立体匹配方法中的关键参数:图像子区为 41×41 pixels,相邻计算点距离为 5 pixels,重建的结果如图 6 所示(注意,这里对重建结果做了归一化处理)。



图 5 圆柱体的左视图和右视图

Fig. 5 Left image and right image of test cylinder

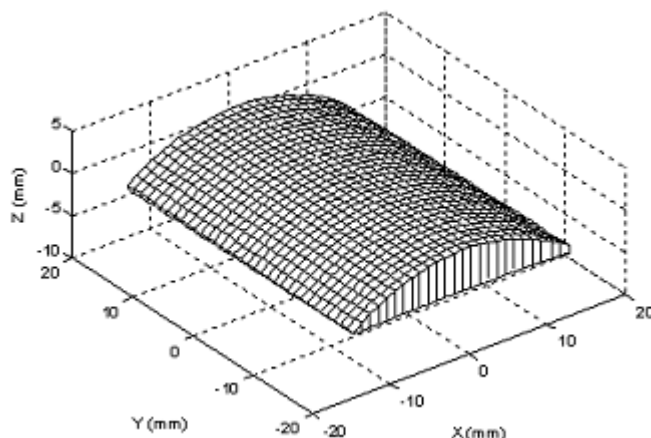


图 6 圆柱体表面三维形貌重建结果

Fig. 6 Reconstructed cylinder surface

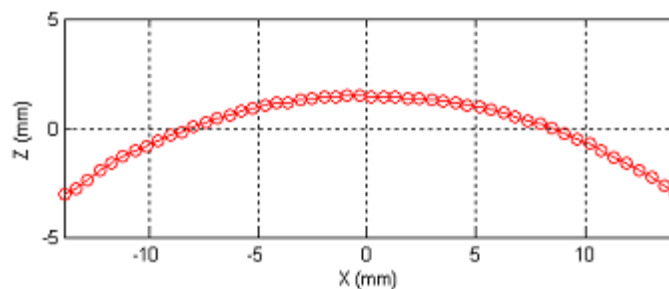


图 7 圆柱体表面某一圆周上各计算点的高度数据

Fig. 7 Height distribution of a line of the test cylinder surface

图 7 为圆柱表面的某一圆周上各点的高度数据,对数据用方程 $f(x_0, z_0, R) = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$ 进行拟合,可得到 R 为 23.9027mm,这与用游标卡尺测量的结果 24.15mm 非常接近。

6.2 悬臂梁离面变形测量

本文还用三维数字图像相关方法对悬臂梁在位移加载下的离面位移进行了测量。实验中将悬臂梁下端固定,在其背面用螺旋测微计加载(如图 8 所示),螺旋测微计沿 Z 正方向移动 17mm。加载前、后试件表面重建的形貌如图 9 所示,将这两个状态形貌相减即得到试件表面的离面位移(图 10),从图 10 可见测量数据与实际情况十分吻合。

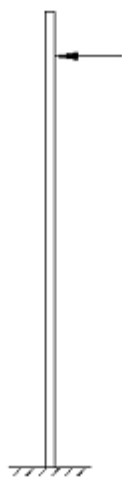


图 8 悬臂梁加载示意图

Fig. 8 Schematic of experiment setup

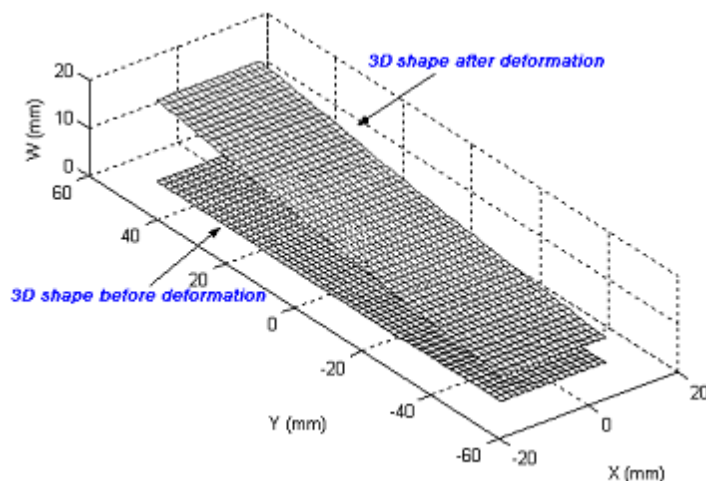


图 9 变形前后试件形貌

Fig. 9 3D surface before and after deformation

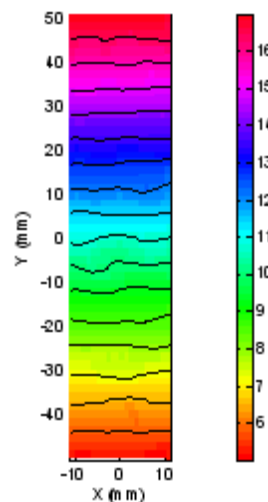


图 10 试件的离面位移分布

Fig. 10 Measured out-of-plane displacement

7 结论和展望

使用两个摄像机基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法,克服了仅用单个摄像机的二维数字图像相关方法只能测量平面物体面内变形的局限,可对被测平面或曲面物体表面的三维形貌和载荷作用下的三维变形场进行测量。本文介绍了三维数字图像相关方法的基本原理和关键技术,并用两个典型的实验验证了三维数字图像相关方法的有效性,结果充分显示该方法适用于曲面物体的形貌及其三维变形的测量。

归纳起来,三维数字图像相关方法具有以下优点:

- 1) 试样准备简单,只需被测试样表面具有随机的灰度变化;
- 2) 采用白光照明,对振动不敏感,对测量环境的要求较低;
- 3) 避免干涉测量方法中涉及到的条纹图处理和相位展开,数据处理可完全自动进行;
- 4) 适用测量范围广,根据成像系统放大倍数的不同,可对几平方毫米至几平方米大小构件的三维形貌和变形进行测量,测量范围适用于小变形(>500 微应变)到大变形(几百应变)。

三维数字图像相关方法的不足在于该方法的实现较复杂,要求较高数字图像处理技术和计算机编程水平,此外该方法目前还不适合宏观物体的小变形(<500 微应变)测量。

基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法在国外^[36,37]已经形成了较为成熟的商品测量仪器和商业软件,但是价格昂贵,相比之下国内对于该方法的研究相对滞后。三维数字图像相关方法已在三维形貌和变形测量^[38,39]、断裂力学^[40~43]、金属塑性成型^[44]、压力容器的变形测量^[45]及残余应力分析^[46,47]等众多方面获得成功应用,众多的成功应用实例充分显示该方法是一种可靠、有效的变形测量方法,并在实验力学、航天航空、汽车工业、金属塑性成型、生物力学测试、土木工程等众多领域有着广泛的应用前景。但是该方法在摄像机高精度自动化标定和高精度立体匹配等关键技术,以及提高应变测量灵敏度方面仍有较大的发展潜力和改进空间,值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Michael A Sutton, Stephen R McNeill, Jeffrey D Helm, Chao Y J. Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision[J]. Topics in Applied Physics, Springer Verlag, 2000, 77: 323~372.
- [2] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (Yu Q F, Lu H W, et al. Image based precise measurement and motion measurement. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese))
- [3] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 戴福隆. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. 力学进展, 2005, 34(3): 345~352 (Pan B, Xie H M, Xu B Q, Dai F L. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation. Advances in Mechanics, 2005, 34(3): 345~352 (in Chinese))
- [4] Hild F, Roux S. Digital image correlation: From displacement measurement to identification of elastic properties-A review[J]. Strain, 2006, 42(2): 69~80.
- [5] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195~203 (Wang H W, Kang Y L, Xie H P. Advance in digital speckle correlation method and its application. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195~203 (in Chinese))
- [6] Sjö Dahl M, Benckert L R. Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy[J]. Applied Optics, 1993, 32(12): 2278~2284.
- [7] Yoneyama S, Kikuta H, Kitagawa A, Kitamura K. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement[J]. OPTICAL ENGINEERING, 2006, 45 (2): No. 023602.
- [8] Schreier H W, Garcia D, Sutton M A. Advances in light microscope stereo vision[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44 (3): 278~288.
- [9] Zhang D S, Luo M, Arola D D. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation[J]. OPTICAL ENGINEERING, 2006, 45 (3): 033605.
- [10] 张东升, 罗森, 韩永胜. 材料力学性能显微测试系统[J]. 实验力学, 2006, 21(5): 651~654 (Zhang D S, Luo M, Han Y S. A test system for mechanical behavior of materials in microscale. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(5): 651~654 (in Chinese))
- [11] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(2): 123~132.
- [12] 林碧森. 数字散斑相关方法中若干问题的研究及其应用(硕士学位论文)[D]. 北京: 清华大学, 2002 (Lin B S. Study on some problem of the digital speckle correlation method and its application. Beijing: Tsinghua University, 2002 (in Chinese))
- [13] 姚学锋, 林碧森, 简龙晖等. 立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 473~479 (Yao X F, Lin B S, Jian L H. Three-dimensions deformation field measurement combining digital speckle correlation technology with stereo photography. Optical Technique, 2003, 29(4): 473~479 (in Chinese))
- [14] Per Synnergren, Mikael Sjö Dahl. A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displacement field measurements[J]. Optics and Laser in Engineering, 1999, 31(6): 425~443.
- [15] Helm J D, McNeil S R, Sutton M A. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. Opt. Eng., 1996, 35(7): 1911~1920.
- [16] 周灿林. 用于三维位移测量的投影栅和图像相关方法的研究(博士学位论文)[D]. 天津: 天津大学, 2005 (Zhou C L. Grating projection and image correlation for three-dimensional displacement [PHD thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2005 (in Chinese))
- [17] Tsai R Y. A versatile camera Calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, ra-3(4): 323~344.
- [18] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330~1334.
- [19] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [20] 孟利波. 数字散斑相关方法的研究和应用(博士学位论文)[D]. 北京: 清华大学, 2006 (Meng L B. Study and application of digital speckle correlation method [PHD thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2006 (in Chinese))

- [21] Xue T, Wu B, Zhu J G, et al. Complete calibration of a structure-uniform stereovision sensor with free-position planar pattern[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2007, 135, 30(1): 185~191.
- [22] 张辉, 张丽艳, 陈江, 赵转萍. 基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J]. *航空学报*, 2007, 28(3): 695~701 (Zhang H, Zhang Y L, Chen J, Zhao Z P. Field Calibration of Binocular Stereo System Based on Planar Template and Free Snapping. *Acta Aeronautica & Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 695~701 (in Chinese))
- [23] Garcia D, Orteu J J, Penazzi L. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements; application to sheet metal forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 125: 736~742. Sp. Iss. SI SEP 9 2002.
- [24] Hunbert W. Schreier. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics (PHD thesis) [D]. University of South Carolina, 2003.
- [25] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998 (Ma S D, Zhang Z Y. Beijing: Computer vision—computation theory and fundamentals of algorithm. Beijing: Science press, 1998 (in Chinese))
- [26] Juyang Weng, Paul Cohen. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1992, 14(10): 965~980.
- [27] Harris C G, Stephens M J. A Combined Corner and Edge Detector [J]. *Proceedings Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester, 1988: 147~151.
- [28] 谭晓波. 摄像机标定及相关技术研究 (硕士学位论文) [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005 (Tan X B. Study on camera calibration and related techniques [Master thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese))
- [29] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005 (Zhang G J. Machine Vision. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese))
- [30] Lu H, Cary P D. Deformation Measurement by Digital Image Correlation: Implementation of a Second-order Displacement Gradient [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4): 393~400.
- [31] 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量 [J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1980~1986 (Pan B, Xie H M. Full-field strain measurement based on local least-square fitting for digital image correlation method. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1980~1986 (in Chinese))
- [32] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 戴福隆. 应用数字图像相关方法测量缺陷试样的全场变形 [J]. *实验力学*, 2007, 22(3-4): 379~384 (Pan B, Xie H M, Xu B Q, Dai F L. Full-field deformation measurement of specimen with discontinuity using digital image correlation. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(3-4): 379~384 (in Chinese))
- [33] Sutton M A, Turner J L, Bruck H A, Chao T A. Full-field Representation of Discretely Sampled Surface Deformation for Displacement and Strain Analysis [J]. *Exp Mech*, 1991, 31(2): 168~177.
- [34] Wang C C B, Deng J M, Ateshian G A, et al. An automated approach for direct measurement of two-dimensional strain distributions within articular cartilage under unconfined compression [J]. *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the ASME* 2002, 124 (5): 557~567.
- [35] Feng Z, Rowlands R E. Continuous full-field representation and differentiation of three-dimensional experimental vector data [J]. *Comput. Struct*, 1987, 26: 979~990.
- [36] <http://www.correlatedsolutions.com>
- [37] <http://www.trilion.com>
- [38] Cardenas-Garcia J F, Yao H G, Zheng S. 3D reconstruction of objects using stereo imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1995, 22(3): 193~213.
- [39] Luo P F, Chen J N. Measurement of curved-surface deformation in cylindrical coordinates [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40 (4): 345~350.
- [40] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A. Application of Stereo Vision to 3-Dimensional Deformation Analyses in Fracture Experiments [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33 (3): 981~990.
- [41] Luo P F, Huang F C. Application of stereo vision to the study of mixed-mode crack-tip [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 33 (5): 349~368.

- [42] Chao Y J, Luo P F, Kalthoff J F. An experimental study of the deformation fields around a propagating crack tip [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(2):79~85.
- [43] Luo P F, Huang F C. An experimental study on the mixed-mode crack tip deformation fields in polymethyl methacrylate. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2003, 38(4):313~328.
- [44] Helm J D, Sutton M A, McNeill S R. Deformations in wide, center-notched, thin panels, part I: three-dimensional shape and deformation measurements by computer vision[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42 (5): 12931305.
- [45] Meng L B, Jin G C, Yao X F, Yeh H Y. Full-Field Deformation Measurement of Fiber Composite Pressure Vessel Using 3D Digital Speckle Correlation Method. *Polymer Testing*, 2006, 25(1):42~48.
- [46] McGinnis M J, Pessiki S, Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method[J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45 (4): 359~367.
- [47] Nelson D V, Makino A, Schmidt T. Residual stress determination using hole drilling and 3D image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46 (1):31~38.

Three-dimensional Digital Image Correlation Method for Shape and Deformation Measurement of an Object Surface

PAN Bing, XIE Hui-min, LI Yan-jie

(Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Two-dimensional digital image correlated with single camera is limited to in-plane deformation measurement of a plane object. Based on three-dimensional binocular vision principle, the advanced three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) method breaks through this limit and can measure the three-dimensional shape and deformation of both plane and curved surface under a loading. In this paper, the basic principle and key techniques of 3D-DIC are presented, and two typical validity check experiments were carried out to validate the 3D-DIC.

Keywords: digital image correlation (DIC); three-dimensional vision; camera calibration; deformation