

文章编号: 0253-2239(2010)04-0976-08

大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法

叶 南 张丽艳

(南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要 将数字图像相关方法用于物体表面发生大变形时的图像匹配时,经常因变形区域非线性变形和变形过大而遇到问题。借鉴已有的分段测量思想,提出了一种改进的位移测量方法。该方法根据图像间的相关程度将图像序列中的某一阶段图像重新选取为参考图像,然后将先前匹配得到的该图像上的亚像素子区中心圆整成整像素整坐标,从而可以直接利用数字图像灰度分布作为该参考子区的灰度分布进行数字图像相关计算。对像素圆整过程中损失的精度,利用连续介质的变形连续性概念进行精度补偿。另外提出用生长法获取初始匹配点,提高了匹配点对生成效率,并且根据由生长法获取的待匹配点集与由相关计算得到的最优匹配点集之间的比率实现参考图像的自动选取。实验对比和精度分析显示所提方法有效、可靠,匹配精度在 0.01 pixel 量级。

关键词 机器视觉;分段位移传递;数字图像相关;亚像素匹配;大变形;板料成形

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103004.0976

Improved Fractionized Displacement Transfer Algorithm Based on Digital Image Correlation in Large Deformation Applications

Ye Nan Zhang Liyang

(*Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*)

Abstract Difficulties often arise when digital image correlation (DIC) method is used for serial image matching in nonlinear and large deformation applications. An improved algorithm is proposed by utilizing the concept of fractionized displacement transfer (FDT). For a series of image that records the deformation process, the matching algorithm automatically rechoose an intermediate image as the reference image when the correlation level between the current reference and target images drops below a given threshold. Then the sub-pixel corresponding points in the new reference image are rounded into intergral pixels to facilitate the subsequent DIC matching procedure. A method, which is specifically designed based on the continuum assumption, is proposed for compensating the loss of accuracy caused by the pixel rounding. In addition, a growing method for obtaining initial matching points is proposed, which proved to be able to improve the matching effect and efficiency. The reference images are chosen in terms of the ratio of the number of points in the initial matching set to the number of matched points obtained by the correlation method. Experiment and accuracy analysis demonstrate that the proposed technique is effective and reliable, the matching accuracy is on the order of 0.01 pixel.

Key words machine vision; fractionized displacement transfer (FDT); digital image correlation (DIC); sub-pixel matching; large deformation; sheet metal forming

1 引 言

在 20 世纪 80 年代提出的数字图像相关 (DIC)

方法^[1],经过 20 多年的发展,已经广泛应用于解决物体表面位移和变形的测量问题^[2-6]。在早期的应

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(50875130),博士点基金(200802870016)和江苏省支撑计划(BE2008136)资助课题。

作者简介: 叶 南(1982—),男,博士研究生,主要从事非接触三维几何测量和板料成形应变测量等方面的研究。

E-mail: Isaac_yn@126.com

导师简介: 张丽艳(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非接触三维几何测量、机器视觉检测、逆向工程等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

用中,物体表面的变形大部分处于弹性变形和均匀或近似均匀的变形范围之内,而对于一些非线性的变形或大变形的问题,各种改进的数字图像相关方法相继被提出。如文献[7]提出了以有限元理论中的二阶形函数来近似表达局部非线性变形;文献[8]从滤波器理论角度分析了形函数的选择对位移测量精度的影响;文献[9]将双目立体视觉与数字图像相关方法结合,可以对存在明显离面位移的物体表面进行位移和变形的测量;文献[10]在对大变形的测量中,使用尺寸略小于试件图像宽度的单个子区在序列图像间进行相关匹配,但只能获得少数几个点的匹配关系,无法进行全场的应变测量,并且受小平面假设的限制,该测量方法只能针对平面物体,且不能有明显的离面位移;文献[11]提出在图像序列间逐次对紧邻的变形前后图像进行相关计算(即相邻相关),以测量物体表面的位移和变形,但在相邻相关中参考子区中心通常不在整像素的位置,因此需要对子区中各点的图像灰度进行插值处理;文献[12]提出了一种补偿技术用于提高大变形情况下匹配精度,其原理为先用相关计算获得子区内各点的像素位移,随后把这些位移量引入对变形后图像的修正以提高图像间的相关程度使得相关运算顺利进行。但是该补偿技术需要对变形前子区(即参考子区)图像进行灰度插值,且使用搜索技术^[6]进行相关计算,因此计算量大、执行效率低。由于数字图像相关方法自身特点决定了用于相关的两幅图像之间不能变化太大,因此将该方法应用到大变形的测量问题中,有待做进一步的发展。

针对大变形的测量问题,本文借鉴已有的分段位移测量思想,提出了一种改进的位移测量方法和获取初始匹配点的生长法。

2 数字图像相关方法

由于图像上的点的运动与物体表面上的点的运动可以形成一一对应关系,因此空间点的位移定位反应到图像上即为图像点匹配。通过 DIC 方法获得变形前后图像上对应点匹配,再根据计算机视觉理论,就可以计算出实际空间点的位移,进而获得变形信息。

数字图像相关方法基本原理是:在变形前的图像(可称为参考图像)中取一待求点 (x, y) 为中心的 $(2M+1) \text{ pixel} \times (2M+1) \text{ pixel}$ 的矩形参考图像子区,在变形后的图像(可称目标图像或匹配图像)中寻找与选定参考图像子区相似程度最大的以 (x', y') 为中心的 $(2M+1) \text{ pixel} \times (2M+1) \text{ pixel}$ 矩形区域,这样就形成了一对匹配点 (x, y) 和 (x', y') 。为了提高匹配精度,通常会考虑目标图像子区的变形,并采用一阶或二阶位移模式(又称形函数^[8])来近似表达子区的变形。图 1 给出了图像子区中的点在变形前后的映射关系。其中点 $P(x_0, y_0)$ 为参考图像子区的中心,点 $P'(x'_0, y'_0)$ 为 P 点在变形图像子区中的对应点,并且满足 $x'_0 = U(P)$, $y'_0 = V(P)$,点 $Q(x, y)$ 为 P 点附近的一点,且满足 $x = x_0 + \Delta x, y = y_0 + \Delta y$ 。根据变形的连续性, Q 点在变形子区的对应点 $Q'(x', y')$ 也应该在 P' 附近,并且满足 $x' = U(Q)$, $y' = V(Q)$ 。若使用一阶位移模式函数来表示 $U(\cdot), V(\cdot)$,则有

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y, \\ y' &= y_0 + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 u, v 分别为参考图像子区中心在 x, y 方向上的位移值, $\Delta x, \Delta y$ 为点 (x, y) 到计算窗口中心 (x_0, y_0) 的距离, $\partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y$ 为图像子区的位移梯度。

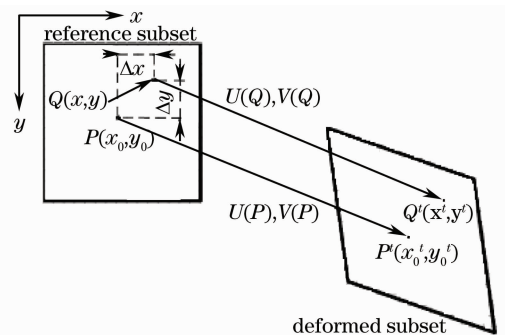


图 1 图像子区中的点在变形前后映射示意图
Fig. 1 Schematic diagram of mapping of points in subsets before and after deformation

使用零均值归一化互相关函数来量化子区间的相似程度^[13]:

$$C_{f,g}(t) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M |[f(x, y) - f_m][g(x', y') - g_m]|}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}}, \quad (2)$$

式中 t 为位移模式中的代求参数向量, 对一阶位移模式, 有 $t = (u, \partial u / \partial x, \partial u / \partial y, v, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)^T$; $f(x, y)$, $g(x', y')$ 分别为参考图像子区和目标图像子区各点的灰度值; f_m , g_m 分别为参考图像子区和目标图像子区的灰度平均值。当(2)式函数值为 0 时, 表示两个子区相似程度最低; 函数值为 1 时, 相似程度最高。对(2)式使用牛顿-拉普森 (Newton-Raphson, N-R) 优化进行迭代求解^[14], 最终得亚像素级别的最优匹配点。

3 改进的分段位移传递法(IFDT)

当被测物体表面变形量很大且伴有非线性变形时所对应的数字图像与未变形时刻所对应的参考图像之间的差别很大, 不利于数字图像的处理。因此,

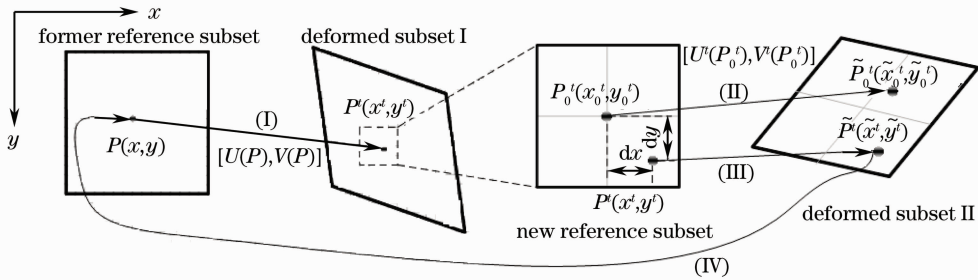


图 2 改进分段位移传递

Fig. 2 Schematic diagram of improved fractionized displacement transfer

1) 已知初始参考图像上一整像素点 $P(x, y)$, 通过 DIC 方法, 得到变形子区 I 上一点 $P'(x', y')$, 点 P' 一般为亚像素精度。

2) 由于变形子区 II 相对于初始参考子区变形过大, 因此先将变形子区 I 所在的图像设置为新参考图像, 然后将点 $P'(x', y')$ 圆整到整像素位置, 即点 $P_0'(x_0', y_0')$ 。损失的精度 x 方向为 dx , y 方向为 dy 。通过 DIC 方法, 得到 $P_0'(x_0', y_0')$ 在变形子区 II 上的对应点 $\tilde{P}'(\tilde{x}', \tilde{y}')$, 同时得到位移模式中的参数向量 t 。

3) 根据变形的连续性, P' 在 P_0' 点附近, 则在变形子区中, P' 的对应点 $\tilde{P}'(\tilde{x}', \tilde{y}')$ 也应该在点 \tilde{P}'_0 附近。根据 M. A. Sutton 等^[14] 的研究, 当应变大于 1% 时, 由 N-R 法得到的位移梯度, 可以近似表达图像点附近的变形情况。因此有

$$\tilde{x}' = \tilde{U}(P'), \tilde{y}' = \tilde{V}(P'), \quad (3)$$

即是对 dx , dy 的补偿。

若上述步骤 2) 中使用一阶位移模式函数来表示 $\tilde{U}(\cdot), \tilde{V}(\cdot)$, 则有

需要采用分段测量的方法, 即将变形过程中的某一时刻对应的数字图像设置成新的参考图像, 再进行以后各变形时刻间的图像匹配, 然后根据已有的未变形时刻的图像和新参考图像间的匹配关系, 将所有变形时刻的图像匹配都统一到与未变形时刻的图像进行匹配。由于后续变形图像上的匹配点的坐标一般为亚像素坐标, 常用的方法在重新选择的参考图像上直接对图像灰度进行插值以获取参考子区中亚像素位置上的灰度分布。为避免直接对参考图像进行灰度插值, 先将参考子区中的亚像素坐标圆整到整像素坐标, 由此可以直接利用图像灰度获得参考子区的灰度分布以便进行相关计算, 然后根据连续介质的变形连续性概念, 对因将亚像素坐标圆整成整像素坐标而损失的精度进行补偿。具体过程如图 2 所示。

$$\begin{aligned} \tilde{x}' &= x_0' + dx + \bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dx + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} dy, \\ \tilde{y}' &= y_0' + dy + \bar{v} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} dx + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} dy, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 \bar{u} , \bar{v} 分别是点 P_0' 到点 \tilde{P}'_0 的像素位移; $\partial \bar{u} / \partial x, \partial \bar{u} / \partial y, \partial \bar{v} / \partial x, \partial \bar{v} / \partial y$ 为位移梯度; dx , dy 为圆整丢失的精度。

同理, 若步骤 2) 中使用二阶位移模式函数来表示 $\tilde{U}(\cdot), \tilde{V}(\cdot)$, 则对 dx , dy 也需要使用二阶位移模式进行补偿。

4) 通过前面三个步骤, 最终可以得到变形子区 II 上点 $\tilde{P}'(\tilde{x}', \tilde{y}')$ 与初始参考子区上点 $P(x, y)$ 的对应。像素位移为 $\bar{u}' = \tilde{x}' - x$, $\bar{v}' = \tilde{y}' - y$ 。

4 匹配初始值获取

由于数字图像相关方法采用的是迭代优化计算最优位移模式参数, 并且通常要生成大量的匹配点对, 匹配初始值对于算法速度乃至收敛与否都具有很重要的影响。

通常获取初始值的方法是先从图像上设置一矩

形虚拟网格^[15],参考图像上待匹配点都位于网格的节点处,然后将起始点设置在矩形区的角点处,通过相关方法得到该点的最优参数向量 t_{opt} ,然后将 $t_{next} = t_{opt} + \Delta t$ 作为下一次匹配优化的初始位移模式参数,通过(3)式即可计算下一个初始匹配点对。其中 $\Delta t = (dx, 0, 0, 0, 0, 0)$ 或 $\Delta t = (0, 0, 0, dy, 0, 0)$, $dx = \pm \Delta x$, $dy = \pm \Delta y$, 正负号取决于起始点的位置, $\Delta x, \Delta y$ 为网格节点步长。这种方法的缺点是匹配区域只能设定成矩形,对一些形状不规则或带有圆弧或倒角的物体表面图像,无法使用单一的矩形来包含待匹配区域,并且下一个点初始值的获取只能依赖其邻域内 x, y 两个方向上的已匹配点的位移模式参数向量,即只能在 x 或 y 方向上以扫描线的方式进行位移传递,因此经常会因上一点匹配失效而影响下一个点的初始值获取,不利于迭代优化的顺利进行。因此提出生长算法来避免上述不足。

对于首个匹配初始点,本文算法通过人工交互的方式在初始参考图像中选择一点,然后在一矩形窗口内用数字图像相关方法遍历找到其在各序列图中的对应点作为初始匹配。在每个点匹配好之后,可在该点处以预先设定好的步长向周围四个方向或八个方向(即 4 或 8 邻域)生长,这样得到邻域内的点的初始匹配位置都可以默认设置好。与用矩形网格法相似,下一个匹配点的 $t_{next} = t_{opt} + \Delta t$,其中 $\Delta t = (dx, 0, 0, dy, 0, 0)$,对 4 邻域的生长 (dx, dy) 可分别取 $(\Delta x, 0), (-\Delta x, 0), (0, \Delta y), (0, -\Delta y)$,对 8 邻域的生长 (dx, dy) 可分别取 $(\Delta x, 0), (-\Delta x, 0), (0, \Delta y), (0, -\Delta y), (\Delta x, \Delta y), (-\Delta x, \Delta y), (\Delta x, -\Delta y), (-\Delta x, -\Delta y), \Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向上的生长步长。可以通过堆栈的方法,将已匹配好的点对的周围 4(或 8)邻域待匹配点对压入堆栈。通过不断地入栈和出栈操作,可实现整个匹配区域初始值的获取,当整个待匹配区域匹配完成时,堆栈也相应地为空。

运用生长法,不仅可以明显提高匹配点对的生成速度,而且加上一些边界判断条件以及非中心型子区方法^[16]可适用于不规则的匹配区域。另外,由于初始点的获取可以依靠其 4(或 8)邻域内已匹配好的点,因此相对于矩形虚拟网格方法,传递路线增多,受阻情况减少,匹配更加有效稳定。

5 实验及结果对比

实验使用双目立体视觉系统记录板料变形的全过程,实验装置如图 3 所示,试件材料为钢板 SPEN,厚度 1.2 mm。双目结构的摄像机内外参数

采用文献[17]的方法进行标定。试件表面经过去油处理后用强附着力的哑光黑白漆交替喷涂,形成人工散斑。同一个 CCD 传感器采集得到的板料变形过程中不同时刻的一组图像称为一个图像序列;同一变形时刻,左右 CCD 传感器采集得到的图像构成一个立体图像对(称为左、右图像)。对于图像序列,用相关方法进行不同变形时刻间的图像匹配以实现像素位移定位;对于立体图像对,先用相关方法相对于参考阶段左图像,对变形阶段左图和右图分别进行相关计算,然后根据计算结果得到左图和右图的匹配结果。如图 4 所示,在变形前左图像中选择要计算的图像子区,并通过 DIC 方法找到其在右图像中的相应位置即形成一对立体匹配点,根据预先标定的摄像机内外参数可得到该图像子区中心点的三维坐标。同理,通过 DIC 方法分别在变形后左、右图像中也找到与变形前左图像参考子区中心相对应的位置,则同样可得到该点在变形后的空间三维坐标。可见,图像间相关匹配的顺利进行是后续位移和应变计算的基础和关键。

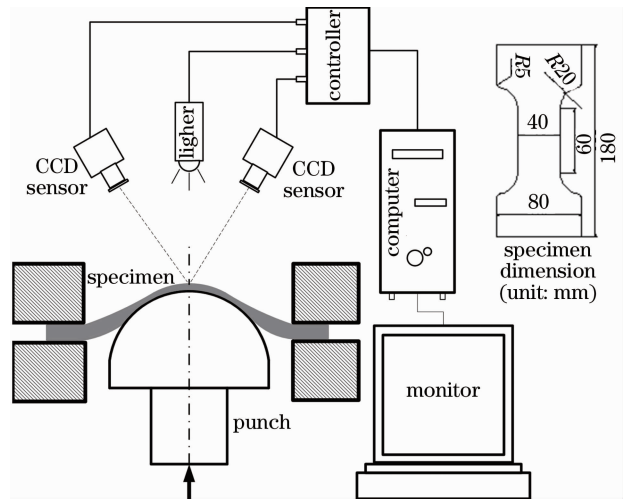


图 3 板料成形实验硬件
Fig. 3 Hardware of sheet metal forming

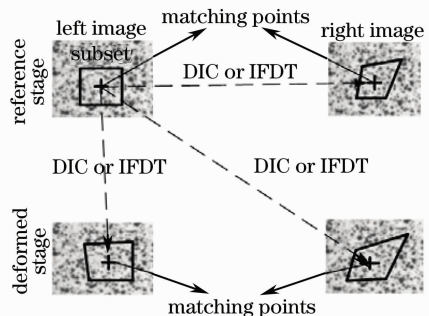


图 4 用序列匹配和立体匹配的原理图
Fig. 4 Schematic diagram of series image matching and stereo matching

5.1 直接使用 DIC 方法

使用 4 邻域生长法获取初始匹配点,生长步长 x, y 方向上都为 3 pixel(步长一般可取 2~10 pixel),子区大小为 25 pixel \times 25 pixel,一阶位移模式,双三次自然样条插值,相关函数使用零均值归一化互相关函数, N-R 优化,并采用近似 Hessain 矩阵的方法^[18]减少 N-R 优化过程的复杂度。匹配成功的判断条件为:相关函数值大于 0.8 且迭代次数小于 30 次。

图 5 给出了板料成形过程中由左摄像机采集得到的图像序列变形趋势,从未变形到变形结束共计 14 个阶段,从图中可见明显的缩颈区域。将图 5 中阶段 0 对应的数字图像设置为初始参考图像,该图中形状不规则的白色覆盖区域为由生长法得到的待

匹配点集。

图 6 为直接用 DIC 方法进行匹配的部分结果显示。从图中可以直观看到,阶段 4 左图能正确完成匹配。但阶段 6 左图中因图像间相关性减小,有部分点没能正确匹配。从图 5 中不难发现,从阶段 6 开始,试件开始出现缩颈即局部大变形现象。

从表 1 的数据中也可以看出,从阶段 6 开始,有效点平均相关函数值即相似程度逐渐减少,点丢失率、平均迭代次数增加。

表 1 中点丢失率(RMP)定义为:初始待匹配点数和有效匹配点数的差值与初始待匹配点数的比值。

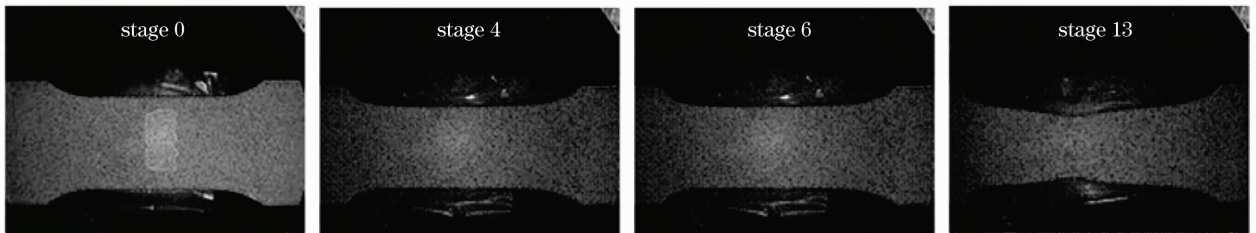


图 5 左摄像机采集得到的图像序列变形趋势

Fig. 5 Trend of deformation in image series by left camera

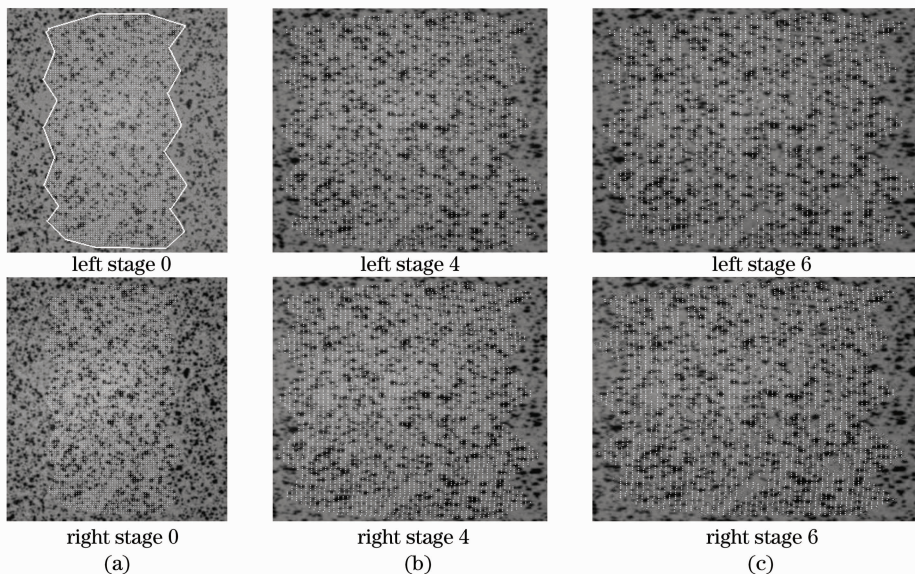


图 6 直接用 DIC 方法进行匹配的结果

Fig. 6 Result of matching only using DIC method

表 1 直接使用 DIC 方法进行匹配的统计结果

Table 1 Statistical result of matching only using DIC method

Stage series	Stage 0 (original reference stage)	Stage 4	Stage 5	Stage 6
Number of valid matching points	5171	5171	5126	4794
Ratio of missing points(RMP)	0.000	0.000	0.0087	0.0729
Average iterative times	—	10.0	12.0	15.9
Average correlation value of valid points	—	0.9755	0.9719	0.9661

5.2 使用本文方法

实验用的数字图像相关法的基本参数设置和直接使用 DIC 方法的实验一致。实验流程如图 7 所示。

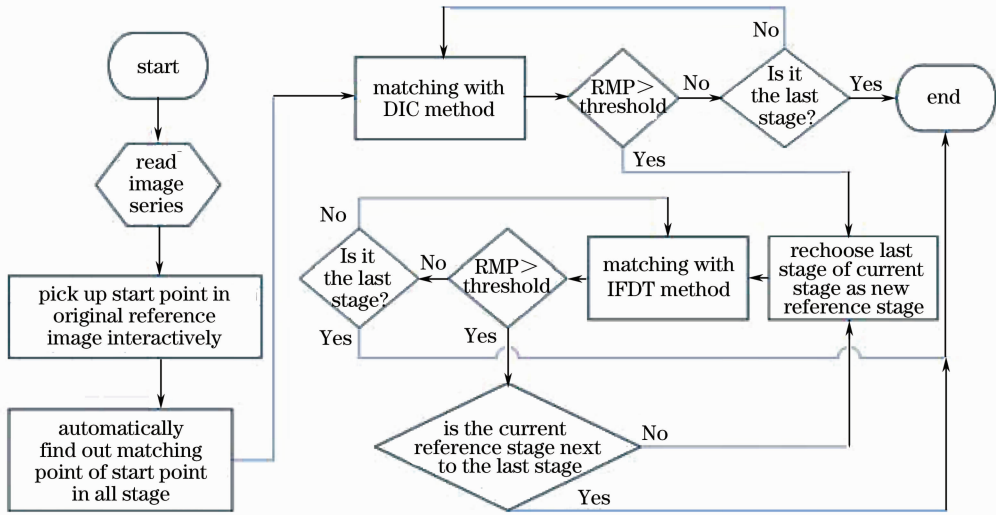


图 7 改进的分段位移传递法实验流程

Fig. 7 Flow chart of experiment with IFDT method

将点丢失率设置为 0,即保证所有点都能正确匹配,根据表 1 的数据,程序自动选择阶段 4 左图作为 IFDT 参考图像,并改用 IFDT 方法进行定位和匹配。

根据表 2 的数据,程序自动选择阶段 7 左图作

为新参考图像,并继续使用 IFDT 方法进行定位和匹配。根据流程,依次由算法自动选择阶段 4,7,9,10,11,12 左图作为参考 IFDT 参考图像,顺利完成了整个图像序列以及各阶段立体图像的匹配。

表 2 以阶段 4 左图为参考图像的 IFDT 方法的匹配结果统计

Table 2 Statistical result of matching using IFDTmethod with left imge in statg 4 as reference image

Stage series	Stage 4 (New reference stage)	Stage 5	Stage 6	Stage 7	Stage 8
Number of valid matching points	5171	5171	5171	5171	5138
Ratio of missing points(RMP)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0064
Average iterative times	—	4.7	4.6	5.1	5.3
Average correlation value of valid points	—	0.9911	0.9891	0.9848	0.9787

表 3 中,阶段 12 的点丢失率大于 0,这是因为阶段 12 的前一阶段即阶段 11 左图也曾作为参考图像,为避免死锁发生,程序可以自动调整点丢失率的阈值以便计算顺利进行。

表 3 其余各阶段的匹配结果统计

Table 3 Statistical result of matching in other stages

Stage series	Stage 8	Stage 9	Stage 10	Stage 11	Stage 12	Stage 13
Number of valid matching points	5171	5171	5171	5171	5168	5144
Ratio of missing points(RMP)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0006	0.0052
Average iterative times	5.9	6.4	7.0	4.0	4.1	3.4
Average correlation value of valid points	0.9901	0.9892	0.9911	0.9891	0.9848	0.9787

从图 8 可以明显看出,使用 IFDT 方法,匹配能顺利进行到试件破裂的时刻,在最后一个阶段断裂处,也能有很好的匹配结果。

需要指出的是,若点丢失率阈值设定为大于 0,

重新选择的参考图像相对于上一次参考图像丢失的点在后续的匹配过程中也将丢失。可以减小点丢失率阈值来避免后续阶段过多丢失,但可能需要多次选择参考图像。

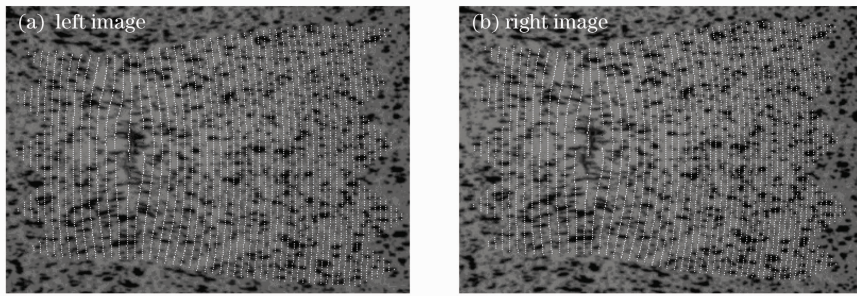


图 8 用 IFDT 方法的最后阶段立体图像匹配结果

Fig. 8 Matching result of stereo image in the last stage of IFDT method

5.3 精度对比

为了验证 IFDT 方法的精度,可将使用 IFDT 的结果数据与直接使用 DIC 方法的结果数据进行对比,并定义最大偏差、平均偏差、标准偏差为

$$b_i = u_i - \tilde{u}_i, \quad b_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} |b_i|,$$

$$b_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |b_i|, \quad (5)$$

$$b_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (b_{\text{mean}} - b_i)^2},$$

式中 u_i, \tilde{u}_i 分别为直接使用 DIC 方法和 IFDT 方法得到的匹配点在变形前后两幅图像上沿 x 方向的像素位移(由于像素位移主要发生在 x 方向, y 方向的偏差很小,在此只对 x 方向像素位移偏差进行比较); N 为有效匹配点数; b 为偏差, b_{\max} 为最大偏差, b_{mean} 为平均偏差, b_{std} 为标准偏差。

具体做法是:先用一个相机采集同一个试件表面 5 个变形时刻的图像,然后将未变形时刻的图像设为原始参考图像,第一个变形时刻的图像设为 IFDT 方法中的新参考图像,再对 5 个阶段图像分别使用 DIC 方法和 IFDT 方法,最后计算匹配结果的偏差。

实验 1 使用一阶位移模式,双三次样条插值,子区大小 $31 \text{ pixel} \times 31 \text{ pixel}$; 实验二使用二阶位移模式,其余同实验一。

从表 4 和表 5 的数据中可以看出,IFDT 方法相对于 DIC 方法标准偏差小于 0.01 pixel 。因此 IFDT 方法的精度与直接 DIC 方法相当。图 9 和图 10 给出了两次实验中各变形时刻图像上偏差分布直方图,可见实验 1 的偏差大部分分布在 $\pm 0.02 \text{ pixel}$ 之内,实验二的偏差大部分分布在 $\pm 0.04 \text{ pixel}$ 之内。

表 4 实验 1 精度对比

Table 4 Precision comparison in experiment 1

	Maximum bias /pixel	Average bias /pixel	Standard bias /pixel
stage3	0.0239	0.0052	0.0042
stage4	0.0186	0.0052	0.0042
stage5	0.0179	0.0050	0.0041

表 5 实验 2 精度对比

Table 5 Precision comparison in experiment 2

	Maximum bias /pixel	Average bias /pixel	Standard bias /pixel
stage3	0.0474	0.0107	0.0085
stage4	0.0431	0.0099	0.0090
stage5	0.0441	0.0088	0.0067

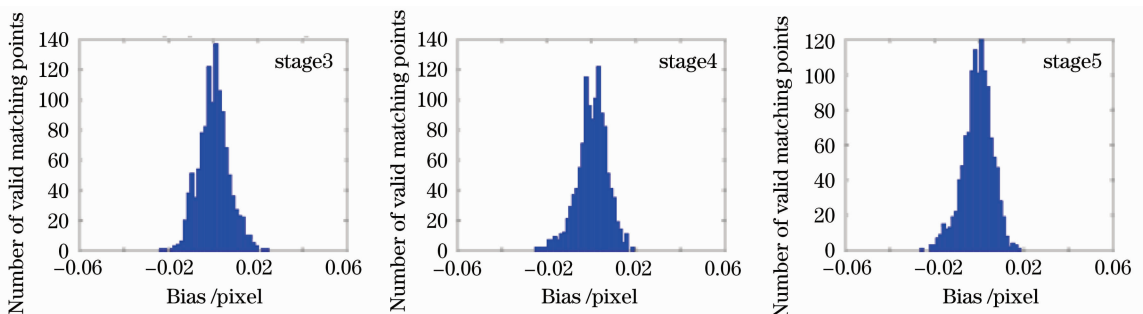


图 9 实验一的三个阶段偏差分布图

Fig. 9 Distribution diagram of bias in last three stages in experiment one

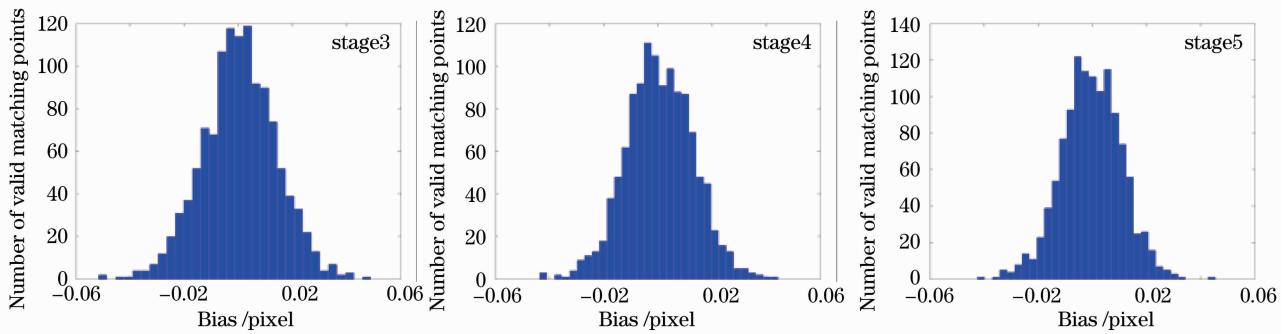


图 10 实验二的三个阶段偏差分布图

Fig. 10 Distribution diagram of bias in last three stages in experiment two

6 结 论

针对大变形情况下的图像匹配问题,在已有的数字图像相关方法和分段位移测量的基础上,提出了改进的分段位移传递的方法。结合生长法获取初始匹配点,该方法可以有效避免因图像间变形过大而无法正常使用数字相关方法进行匹配的不足。实验结果表明,IFDT方法能使匹配顺利进行到试件破裂的时刻,即使在最后一个阶段断裂处也能有好的匹配结果,满足大变形应变测量的要求;精度对比显示了用IFDT方法的匹配精度在0.01 pixel量级。

将IFDT结合双目立体视觉技术以及大变形条件下的应变计算方法,最终可以完成各变形时刻物体表面的应变测量。

参 考 文 献

- 1 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~431
- 2 M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm *et al.*. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision[C]. P. K Rastogi, ed. *Topics in Applied Physics*, Springer Verlag, 2000, **77**: 323~372
- 3 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming *et al.*. Research of high accuracy digital image correlation measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 197~201
杨 勇,王琰蕾,李 明等.高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 197~201
- 4 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1980~1986
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
- 5 Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1723~1729
孙 伟,何小元,郑 翔.基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1723~1729
- 6 Jin Guanchang, Meng Libo *et al.*. The progress and application of digital speckle correlation method [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2006, **21**(6): 689~702
金观昌,孟利波等.数字散斑相关技术进展及应用[J]. *实验力学*, 2006, **21**(6): 689~702
- 7 H. Lu, P. D. Cary. Deformation measurement by digital image correlation; implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, **40**(4): 393~400
- 8 H. W. Schreier, M. A. Sutton. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions [J]. *Experimental Mechanics*, 2002, **42**(3): 303~310
- 9 P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton. Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(3): 981~990
- 10 H. W. Schreier. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics[D]. University of South Carolina, 2003
- 11 Sun Wei, He Xiaoyuan. Experimental studies on application of digital image correlation in measuring field of civil engineering [J]. *J. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, **41**(2): 271~275
孙 伟,何小元.数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, **41**(2): 271~275
- 12 G. C. Jin, Z. Wu, N. K. Bao. Digital speckle correlation method with compensation technique for strain field measurement [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2003, **39**(4): 457~464
- 13 W. Tong. An Evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. *Strain*, 2005, **41**(4): 167~175
- 14 H. A. Bruck, S. R. McNeil, M. A. Sutton *et al.*. Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction[J]. *Experimental Mechanics*, 1989, **29**(3): 261~267
- 15 Pan6 Bing, Xie Huimin, Xu Boqin *et al.*. Full-field deformation measurement of specimen with discontinuity using digital image correlation[J]. *J. Experimental Mechanics*, 2007, **22**(3,4): 379~384
潘 兵,谢惠民,续伯钦等.应用数字图像相关方法测量含缺陷试样的全场变形[J]. *实验力学*, 2007, **22**(3,4): 379~384
- 16 Hou Zhende, Gao Yongli *et al.*. Using multi-subregions in image correlation method for displacement measurement[J]. *J. Tianjin University*, 2005, **38**(4): 298~302
侯振德,高勇丽等.图像相关方法中采用多种子区进行位移测量[J]. *天津大学学报*, 2005, **38**(4): 298~302
- 17 Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jiang *et al.*. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(3): 695~701
张 辉,张丽艳,陈 江等.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
- 18 G. Vendroux, W. G. Knauss. Submicron deformation field measurements; part2. improved digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, **38**(2): 86~92