

文章编号 1004-924X(2016)增-0710-08

基于混合遗传算法的数字图像相关方法

程振进, 王全保*, 陈吉安, 赵海涛

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要:针对遗传算法应用于数字图像相关方法时呈现的局部搜索能力较弱、算法精度较低等特点,引入具有较强局部搜索能力的共轭梯度算子,以取长补短的原则进行混合遗传算法设计,以提高数字图像相关方法的精度及稳定性。首先,根据共轭梯度算子与遗传算法的不同结合方式,提出了 3 种有效的 CG-GA 混合算法:内嵌 CG 混合遗传算法,精英 CG 混合遗传算法以及并列 CG 混合遗传算法,并对这 3 种算法进行了原理性分析。然后,设计对比实验,基于预设位移的模拟散斑图,利用同参数的以上 3 种算法及标准 RGA 算法进行子区匹配搜索。最后,分析实验结果并对 3 种有效算法进行总结。以 u 方向为例,实验结果表明:内嵌 CG 混合遗传算法相比标准 RGA 算法减少了 69.52% 的平均误差,误差波动也有所减小,但计算消耗较大;精英 CG 混合遗传算法与并列 CG 混合遗传算法求解精度及稳定性大幅度提高,两者平均误差相比 RGA 减小了 98.43%,具有较高的精度。在数字图像相关方法中,推荐使用后两种混合算法进行子区匹配搜索。

关键词:图像测量;数字图像相关方法;遗传算法;共轭梯度算法;子区匹配

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0710

Digital image correlation method based on hybrid genetic algorithm

CHENG Zhen-jin, WANG Quan-bao*, CHEN Ji-an, ZHAO Hai-tao

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

* Corresponding author, Email: quanbaowang@sjtu.edu.cn

Abstract: In consideration of features presented of relatively weak local search ability, relatively low algorithm accuracy, etc with Genetic Algorithm (GA) applied to digital image correlation method, Conjugate Gradient (CG) method with strong local search capability was introduced; with the principle of complementarity, hybrid genetic algorithm was designed to improve the accuracy and stability of digital image correlation method. Firstly, according to different binding modes of CG and GA, three kinds of effective CG-GA hybrid algorithm were presented: embedded CG hybrid algorithm, elite CG hybrid genetic algorithm and parallel CG hybrid genetic algorithm. Then, principle analysis for these three algorithms was carried out. Next, based on simulated speckle pattern of preset displacement, contrast experiment between the above three algorithms with same parameter and standard RGA (Real-code Genetic Algorithm) for subarea matching search was designed. Lastly, Experimental results taking u direction as an example show that: mean error of embedded CG hybrid genetic algorithm is

收稿日期:2016-05-19;修订日期:2016-06-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205253)

reduced by 69.52% compared with standard RGA algorithm with error fluctuation also reduced and relatively big calculation consumption; solution accuracy and stability of elite CG hybrid genetic algorithm and CG hybrid genetic algorithm are greatly improved; mean error between the two is reduced by 98.43% compared with RGA with high accuracy. In the digital image correlation method, the latter two hybrid algorithms are recommended for subarea matching search.

Key words: image measurement; digital image correlation method; genetic algorithm; conjugate gradient method; subarea matching

1 引 言

数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)是一种用于测量物体表面位移和应变的有效视觉测量方法。该方法由 Peter 和 Ranson^[1]于上世纪 80 年代提出,其基本思想是通过在表面喷涂有随机散斑的被测物变形前后的图像子区灰度进行相关计算来获取子区的位移信息,并在此基础上直接或间接地获取被测物表面的应变信息。数字图像相关方法由于具有全场非接触性、测量环境要求低、试件表面处理简便、测量精度高等优点,已经成为一种常用而有效的表面变形非接触测量方法而广泛应用于力学领域^[2]。近年来,数字图像相关方法更是在微尺度变形场测量^[3-4]、电子封装^[5]、断裂力学^[6-7]、材料及实验力学^[8-11]、岩石力学^[12-14]等众多领域有了无数的成功应用。

虽然数字图像相关方法有着许多优点,但也存在着精度相对有限,计算消耗大等缺点,速度和精度一直是数字图像相关方法的所追求的两大目标。而子区匹配算法是影响其速度和精度非常重要的因素。目前,在数字图像相关领域常用的子区匹配算法有 Newton-Raphson 法^[15]、曲面拟合法^[16]、坐标轮换法^[17]、基于梯度法^[18]、遗传算法^[19-24]等。其中,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是 DIC 的常用方法之一,其与传统 DIC 方法的主要区别是对初值不敏感且不需要导数信息。2003 年,马少鹏和金观昌等^[19]首次将 GA 引入 DIC 子区位移计算中,并与爬山法进行了对比,证明了 GA 应用于 DIC 的优越性。由于标准 GA 算法在用于 DIC 子区搜索匹配时可能会呈现局部搜索能力较弱、算法精度较低的特点,因此后来许多学者对 GA 进行算子改进及参数优化。如:

唐晨等^[20]基于仿真散斑图像通过对不同的遗传算子进行对比仿真实验,提出了一种改进的遗传算法;Plich 等^[21]将遗传算法应用于被测物表面全场位移和应变测量中,并研究了子区大小、遗传算法种群大小等变量对算法收敛速度的影响;陈华等^[22]提出结合轮盘赌和最优性方法的遗传选择算子,该改进算法加快了算法收敛速度;Hwang^[23]将遗传退火算法引入相关匹配算法中,并添加了自适应机制,且基于该方法计算了 SU-8 光刻胶的应力应变;Zhang T 等^[24]为克服传统遗传算法过早收敛的缺点,采用多父体杂交和自适应变异概率的遗传算子对复合板的变形进行测量。通过以上回顾可知,大部分相关文献集中于遗传算法收敛速度及稳定性的研究,对遗传算法精度优化的研究有待深化。本文考虑引入启发式算子提高遗传算法的局部搜索能力。

共轭梯度法(Conjugate Gradient Method, CG)是解决无约束最优化问题的有效方法之一,最早由 Fletcher 和 Reeves 提出。CG 法仅需要利用一阶导信息,既克服了最速下降法收敛慢的特点,又避免了牛顿法需要存储和计算 Hesse 矩阵的缺点,而且具有较强的局部搜索能力。

综合比较以上两类方法,遗传算法虽然对初值不敏感且不需要导数信息,但其局部搜索能力较弱,算法精度相对较低;共轭梯度法有较好的局部搜索能力,但其对初值的选取较为敏感。本文针对两类方法的优势和不足,将两类方法相结合进行,优势互补,使得新的混合算法在子区匹配优化中全局和局部搜索能力均较强,最终提高数字图像相关方法的精度及稳定性。本文根据二者结合方式的不同,设计了 3 种基于 CG 算子的混合遗传算法。为研究这 3 种算法的实际性能,设计了同参数多次仿真实验,观察优化结果的误差及稳定性。

2 基本原理

2.1 数字图像相关方法

图像相关方法的基本思想是对含有散斑的被测物表面变形前后的图像子区进行灰度相关计算来获取子区的变形信息。其原理如图 1 所示。

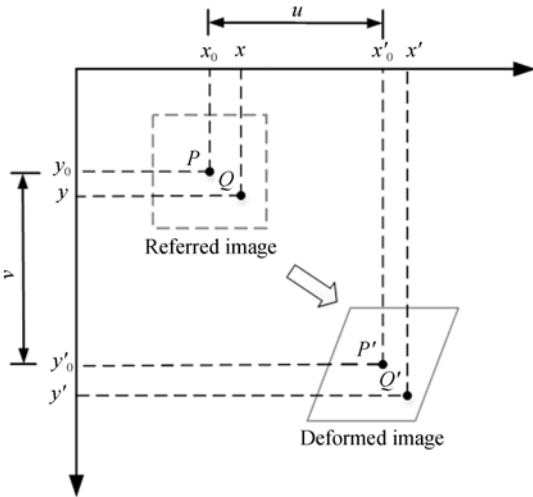


图 1 图像相关方法原理图
Fig. 1 Principle diagram of DIC

在参考图像(即变形前图像)中取以 P 为中心的 $N \times N$ 像素的正方形子区,然后在变形图像中进行相关度计算寻找最相关子区,该子区与原图像子区的距离即为 P 点的位移,将其乘以图像缩放系数后即节点的真实位移。此外,基于预设的子区位移模式或其它处理方法可直接或间接地求出应变。

为了评价变形前后图像的相关程度,需要定义相关函数,文献[9]对此进行了深入的研究,发现归一化最小平方距离相关函数即式(1)抗干扰能力较强,本文即选用该相关函数作为客观评价指标。

$$C_{f,g}(\vec{p}) = \frac{\sum_{-M}^M \sum_{-M}^M \left(\frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{-M}^M \sum_{-M}^M (f(x,y) - f_m)^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{-M}^M \sum_{-M}^M (g(x',y') - g_m)^2}} \right)}{1} \quad (1)$$

变形前后子区位置 (x, y) 与 (x', y') 的关系与所假设的位移模式有关,这里采用线性畸变假

设(又称为常应变位移模式),即假设受力物体发生简单的平移外,还可能伴随着转动、伸缩和扭转等,其关系如式(2)所示:

$$\begin{cases} x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \Delta y \\ y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \Delta y \end{cases}, \quad (2)$$

将式(2)代入(1)中,即可计算子区之间的相关度。图 2 为一平移子区的相关函数分布图,图中最小相关系数为零,其对应的坐标即为变形图像中的匹配点。

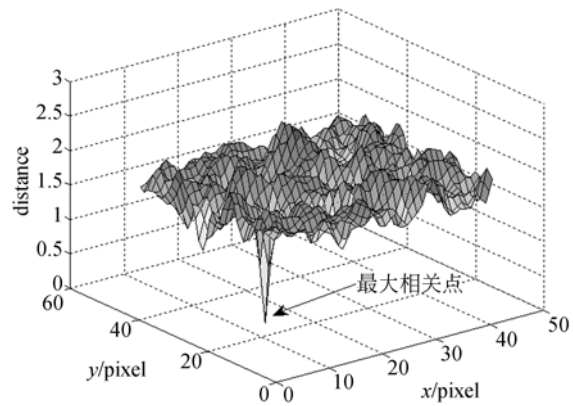


图 2 相关函数分布图
Fig. 2 Correlation function distribution

2.2 基于共轭梯度算子的混合遗传算法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。为了有利于与启发算子结合,本文中采用实数编码遗传算法(Real-code Genetic Algorithms, RGA)。

标准 RGA 算法的流程为:首先确定种群大小 $Popsize$, 进化总代数 T , 交叉变异概率等,进行种群初始化;接着,选择种子进入下一代种群,其中选择算子采用基于排序的轮盘赌算子和精英保存策略;然后,将选择的父代和母代进行交叉操作,即对其染色体以一定的规则进行运算以生成新的子代;由于交叉后的子代有一定的概率发生变异为使算法具有局部搜索能力,需进行微调;当种群到达最大进化代数或满足求解某一条件时,算法终止;否则继续返回进行交叉变异等遗传算子。

标准 RGA 算法通常具有全局最优性,但其求解精度可能较低,为此引入共轭梯度(CG)算

子。共轭梯度算法根据优化对象及使用情况的不同有诸多选择。对于一般非二次函数式(2-1),通常采用 FR-CG 共轭梯度算法进行优化。FR-CG 算法流程可以描述如下:

步 1 给出 $x^{(0)}$, 要求精度 $\epsilon > 0$, 置 $k = 0$;

步 2 设 $g_k = \nabla f(x^{(k)})$, 如果 $\|\nabla f(x^{(k)})\| \leq \epsilon$, 停止计算, $x^{(k)}$ 即为优化解; 否则继续步 3;

步 3 共轭方向迭代计算, $d^{(k)} = -g_k + \frac{g_k^T g_k}{g_{k-1}^T g_{k-1}} \cdot d^{(k-1)}$;

步 4 线性搜索求步长因子 α_k , 即求满足 $\min \varphi(\alpha_k) = f(x^{(k)} + \alpha d^{(k)})$ 的 α_k ;

步 5 优化解迭代计算, $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$;

步 6 令 $k = k + 1$, 转步骤 2。

3 混合遗传算法的实现

本文将具有良好全局搜索能力但精度较低的遗传算法与局部搜索能力较强但对初值敏感的共轭梯度算法相结合, 是提高遗传算法的精度与稳定性。根据 CG 算子与遗传算法的不同结合方式, 提出以下 3 种有效的 CG-GA 混合算法:

(1) 内嵌 CG 混合遗传算法 (Embedded Conjugate Gradient-Genetic Algorithm, EMCGGA): 将共轭梯度算子作为内嵌算子, 对交叉变异后的子代以一定的概率进行局部优化;

(2) 精英 CG 混合遗传算法 (Elite Conjugate Gradient-Genetic Algorithm, ELCGGA): 对遗传算法中的精英子代以一定概率进行共轭梯度优化, 避免不必要的计算;

(3) 并列 CG 混合遗传算法 (Paralleled Conjugate Gradient-Genetic Algorithm, PCGGA): 将遗传算法的终值作为共轭梯度算子的初值, 最大程度地减少共轭梯度算子的计算次数。

下面着重阐述 CG-GA 3 种算法中遗传算子的实现及其与 CG 算子的具体结合方式。

3.1 遗传算子的实现

CGGA 算法各算子的实现过程如下:

a. 编码 现代遗传算法中, 为了将 RGA 与其他算法进行结合, 通常推荐实数编码。本文相关函数 $C(\vec{p})$ 采用线性位移模式, 其自变量为 $(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y)$, 则实数编码的形式如式(3):

$$L_i = [u_i \quad v_i \quad u_{xi} \quad u_{yi} \quad v_{xi} \quad v_{yi}], \quad (3)$$

b. 种群初始化 基于上述编码, 对种群进行初始化, 初始化种群可表示为式(4)。

$$L = L_{lb} + (L_{ub} - L_{lb}) \cdot \text{rand}(M, n), \quad (4)$$

其中, L_{ub} 、 L_{lb} 分别为位移的上下边界, M 为种群大小, n 为变量个数。

c. 适应度计算 归一化最小平方距离相关函数(1)可以有效地评价变形前后子区之间的相关程度, 且 $C(\vec{p})$ 越小, 相关度越大, 因此, 本文将 $-C(\vec{p})$ 作为适应度函数进行遗传操作。

d. 交叉 本文采用线性交叉, 它是指两个体的凸组合产生出两个新的个体, 其关系如式(5)。

$$\begin{cases} L_{\text{selfather}}^{\text{new}} = \alpha \cdot L_{\text{selfather}}^{\text{old}} + (1 - \alpha) \cdot L_{\text{selmother}}^{\text{old}} \\ L_{\text{selmother}}^{\text{new}} = \alpha \cdot L_{\text{selmother}}^{\text{old}} + (1 - \alpha) \cdot L_{\text{selfather}}^{\text{old}} \end{cases}, \quad (5)$$

其中, $L_{\text{selfather}}^{\text{old}}$ 和 $L_{\text{selmother}}^{\text{old}}$ 为选择出的父代和母代染色体, $L_{\text{selfather}}^{\text{old}}$ 和 $L_{\text{selmother}}^{\text{old}}$ 为线性交叉产生的两个子代染色体, α 为交叉比例因子。

e. 变异 为了得到较高的精确度且使得算法具有微调作用, 本文采用非均匀变异, 其数学表述为:

$$\begin{cases} L_i^{\text{new}} = L_i^{\text{old}} + (L_{ub} - L_i^{\text{old}}) \cdot \text{rand} \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b, & p_i > 0.5 \\ L_i^{\text{new}} = L_i^{\text{old}} - (L_i^{\text{old}} - L_{lb}) \cdot \text{rand} \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b, & p_i < 0.5 \end{cases}. \quad (6)$$

其中, p_i 是 $[0, 1]$ 区间上的一个随机数, t 是当前遗传代数, T 是最大遗传代数, b 是非均匀程度的参数。当遗传代数 t 增加时, L_i^{new} 趋向于 L_i^{old} , 该特性导致变异算子能够在早期均匀搜索解空间, 而到了晚期则在很小的区域进行搜索。

f. 精英保留策略 对每一代染色体进行适应度排序, 排名前 m 的所有个体设为精英个体, 保留下来, 并代替下一代排名倒数前 m 的所有个体。

3.2 3 种 CG-GA 算法

a. EMCGGA 算法

本算法流程如图 3(a), 本算法中, 将 CG 算子作为 GA 的内嵌算子, 对交叉变异后的子代以一定的概率进行 CG 优化。这种结合方式的优点在于可以挖掘所有有潜力的子代, 但也可增加不必要的计算量。仿照交叉变异算子, 并增加其可适应度, 对 CG 算子定义一个算子概率 P_{cg} , 可定

义 CG 算子的概率:

$$P_{cg} = P_0 \cdot e^{-a(1-t/T)}, \quad (7)$$

其中, P_0 代表初始概率, a 为影响因子, t 代表当前代数, T 代表遗传总代数。由上式可知 P_{cg} 随

着代数递增, 即越接近终止代数, 子代进行 CG 局部优化的概率越大, 提高了 CG 的后期搜索能力。对满足 P_{cg} 的子代按照 FR-CG 法进行 CG 局部优化。

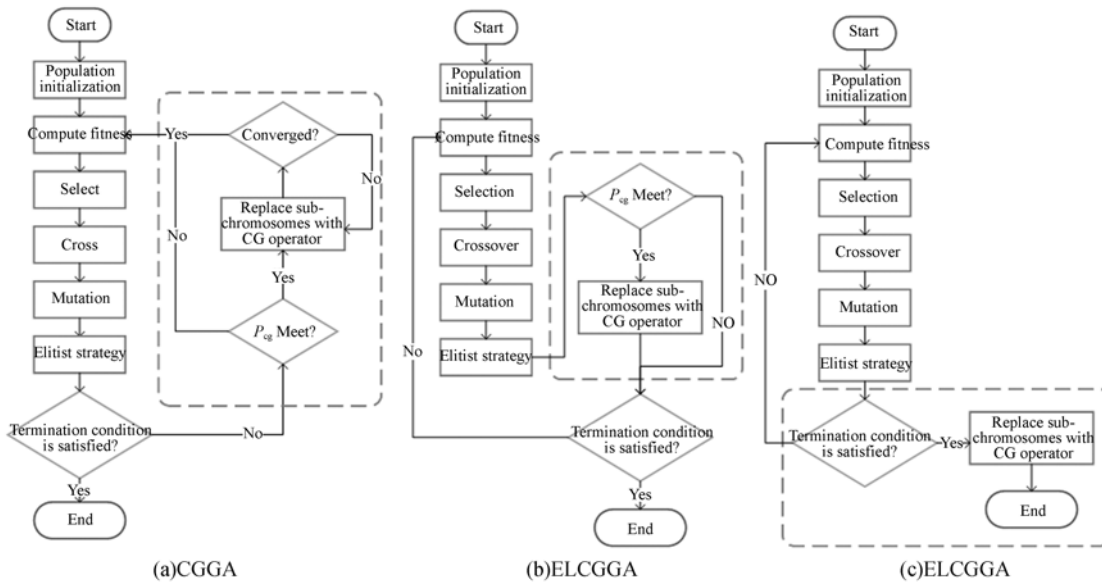


图 3 3 种 CGGA 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of three CGGA algorithms

b. ELCGGA 算法

算法流程如图 3(b) 所示, 本算法中, 为减少不必要的计算, 仅对每一代中的精英个体进行一定概率下的 CG 优化, 其概率定义同上。该算法较好地兼顾了计算效率与优化效果, 使得全局最优解附近的精英染色体更快速收敛至最优点。

c. PCGGA 算法

算法流程如图 3(c) 所示, 本算法最小程度地减少了 CG 的优化次数(仅一次), 其将 GA 与 CG 视为并列算子, 并将 GA 优化的终值作为 CG 的初值进行优化。该算法的优点是计算效率高, 缺点是如果 GA 的所有子代都未迭代到全局最优点附近, 则 CG 的优化效果将大打折扣, 因为相关函数一般都是多峰函数, 初值不合适容易使 CG 陷入局部最优。

4 测量实验与结果

4.1 实验参数

为检验以上 3 种算法的精度及稳定性, 本文利用计算机随机生成的可精确控制位移和应变的

模拟散斑图进行验证。按照文献[19]的方法模拟喷涂散斑, 设定模拟散斑图的相关参数: 散斑数目 S 为 2 000, 散斑大小 R 为 4 pixel, 图像分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 变形散斑图预设位移为 $(4.5, 6.5)$ 。生成的变形前后模拟散斑图如图 4 所示。

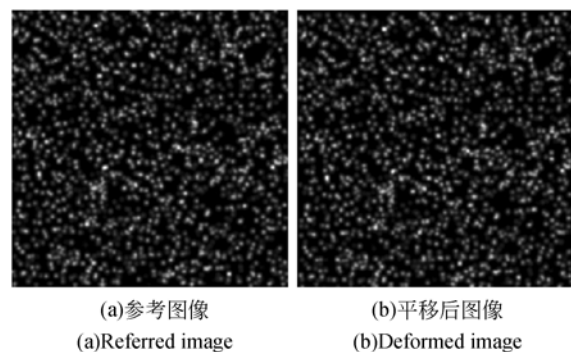


图 4 模拟散斑图

Fig. 4 Simulated speckle pattern

本文基于单点搜索匹配, 通过对几种算法同参数的对比实验来检验 3 个 CGGA 算法的精度及稳定性。仿真试验中, CGGA 的参数设定: 种

群大小为 100,终止代数 为 50,交叉率为 0.9,初始变异率为 0.1,CG 算子初始概率为 0.01。

为了更准确地对比三个算法的性能,针对预设的散斑图使用 3 种 CGGA 算法与标准 RGA 算法分别进行 20 次仿真实验,观察计算结果的平均误差、相对误差以及标准差。

$$E_{\text{sys}} = d_{\text{mean}} - d_{\text{true}}, \quad (8)$$

$$\bar{E}_{\text{sys}} = E_{\text{sym}}/d_{\text{true}}, \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - d_{\text{true}})^2}. \quad (10)$$

4.2 实验结果

上述实验的详细结果见图 5、图 6,20 次实验的平均误差、相对误差及标准差如表 1、表 2。从图 5、图 6 的折线图,可以发现标准 RGA 的误差较大且波动非常剧烈,EMCGGA 算法的误差较 RGA 减小,波动也相对减小,而 ELCGGA 与 PCGGA 的算法相对前两个算法误差非常小且几乎无波动。表 1、表 2 为各算法在 u、v 方向的误差统计结果。以 v 方向为例,从表 2 的数据统计结果来看,RGA 求解的平均误差为 0.932 93 pixel,EMCGGA 算法求解的平均误差为 0.326 35 pixel,相对 RGA 减少了 65.02%,ELCGGA 算法求解的平均误差为 0.002 32 pixel,相对 RGA 减少了 99.75%,PCGGA 算法求解的平均误差为 0.002 51 pixel,相对 RGA 减少了 99.73%的平均误差;ELCGGA 与 PCGGA 算法的标准差远小于 RGA 与 EMCGGA 算法,也证明了 ELCGGA 与 PCGGA 算法具有较好的稳定性。

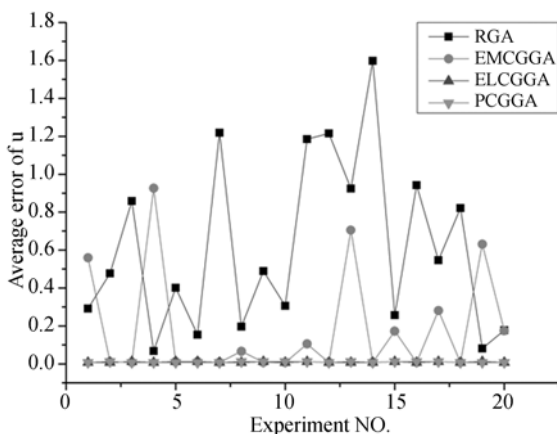


图 5 u 方向平均误差
Fig. 5 Average error of u

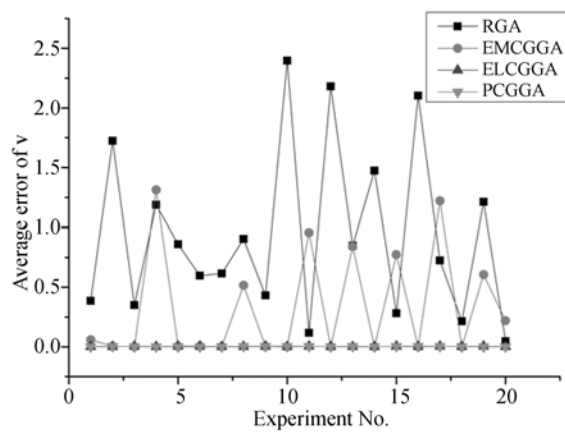


图 6 v 方向平均误差
Fig. 6 Average error of v

表 1 各算法 u 方向误差统计

Tab. 1 Error statistics of u for different algorithms

	u 平均 误差/pixel	u 相对 误差/pixel	误差减少 (较 RGA)	u 标准差
RGA	0.610 43	0.135 65		0.452 77
EMCGGA	0.186 04	0.041 34	0.695 23	0.283 77
ELCGGA	0.009 53	0.002 12	0.984 39	0.002 08
PCGGA	0.009 75	0.002 12	0.984 03	0.002 1

表 2 各算法 v 方向误差统计

Tab. 2 Error statistics of v for different algorithms

	u 平均 误差/pixel	u 相对 误差/pixel	误差减少 (较 RGA)	u 标准差
RGA	0.932 93	0.143 53		0.713 88
EMCGGA	0.326 35	0.050 21	0.650 12	0.458 15
ELCGGA	0.002 32	0.000 36	0.997 51	0.001 81
PCGGA	0.002 51	0.000 39	0.997 31	0.001 89

实验验证显示,EMCGGA 算法损失了计算效率以挖掘所有有潜力的个体进行 CG 优化,并减小了 RGA 的平均误差与波动,但减小幅度有限;ELCGGA 算法与 PCGGA 算法在兼顾计算效率的基础上分别进行精英优化与最终子代优化,使得求解精度及稳定性大幅度提高,如,两者在 u 方向的相对平均误差均为 0.002 12,相对 RGA 减小了 98.44%,因此,这两种算法具有更高的精度和更良好的稳定性。

5 结 论

本文针对标准 RGA 应用于图像相关方法时呈现的局部搜索能力较弱、算法精度较低等特点,引入了具有较强局部搜索能力的共轭梯度算子,并根据该算子与标准遗传算法的 3 种结合方式提出了 3 种 CG 遗传混合算法,即内嵌 CG 遗传混合算法(EMCGGA),精英 CG 遗传混合算法(ELCGGA)以及并列 CG 遗传算法(PCGGA)。为了验证上述 3 种算法的计算性能,基于预设位移的散斑图,设计了对比实验,并与标准 RGA 结果进

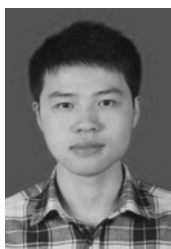
行对比。实验结果表明,EMCGGA 算法 u 方向上的平均误差相比标准 RGA 算法减少了 69.52%,v 方向上的平均误差减少了 65.02%,误差波动也有所减小,但计算消耗较大;ELCGGA 算法与 PCGGA 算法在兼顾计算效率的基础上分别进行精英优化与最终子代优化,使得求解精度及稳定性大幅度提高,两者在 u 方向的相对平均误差均为 0.002 12,相比 RGA 减小了 98.43%,v 方向上减小了 99.75%,具有较高的精度。因此,在图像相关方法中,本文推荐使用 ELCGGA 与 PCGGA 算法进行子区匹配搜索。

参考文献:

- [1] PETERS W H, RANSON W F. Digital image techniques in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3):427-432.
- [2] 刘小勇. 数字图像相关方法及其在材料力学性能测试中的应用[D]. 吉林:吉林大学, 2012.
LIU X Y. *Digital image correlation method and the mechanical properties test application* [D]. Jilin:Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [3] 王怀文,刘彩平,鞠杨,等. 扫描电镜下的数字散斑相关方法及其应用[J]. *实验力学*, 2006, 21(2): 135-143.
WANG H W, LIU C P, JU Y, *et al.*. Scanning electron microscope digital speckle correlation method and its application [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 21(2):135-143. (in Chinese)
- [4] STINVILLE J C, ECHLIN M P, TEXIER D, *et al.*. Sub-grain scale digital image correlation by electron microscopy for polycrystalline materials during elastic and plastic deformation[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 56(2): 197-216.
- [5] 陈国营,杨传民,董肖云,等. 数字图像相关技术在大豆蛋白喷涂流速测量中的应用[J]. *包装工程*, 2016, 37(5):63-67.
CHEN G Y, YANG CH M, DONG X Y, *et al.*. Application of digital image correlation technique in soy protein spray flow rate measurement [J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(5): 63-67. (in Chinese)
- [6] 高红俐,刘欢,齐子诚,等. 基于高速数字图像相关法的疲劳裂纹尖端位移应变场变化规律研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(9):1772-1781.
GAO H L, LIU H, QI Z C, *et al.*. Research on variation law of fatigue crack tip displacement and strain field based on high-speed digital image correlation method [J]. *Acta Armamentor II*, 2015, 36(9): 1772-1781. (in Chinese)
- [7] 郝文峰,原亚南,姚学锋,等. 基于数字图像相关方法的含双裂纹复合材料薄板应力强度因子测量[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2015(4):22-26.
HAO W F, YUAN Y N, YAO X F, *et al.*. Measurement of mode-I intensity factor in a double-cracked composite sheet using digital image correlation method [J]. *FRP / Composites*, 2015(4): 22-26. (in Chinese)
- [8] 申志彬,邓斌,潘兵. 推进剂粘弹性泊松比测试的数字图像相关方法[J]. *固体火箭技术*, 2016, 39(4): 513-518.
SHEN ZH B, DENG B, PAN B. Digital image correlation method for measuring viscoelastic poisons ratio of propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2016, 39(4)s:513-518. (in Chinese)
- [9] 郝文峰,郭广平,陈新文,等. 基于数字图像相关方法的复合材料层间剪切性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016(1):29-32.
HAO W F, GUO G P, CHEN X W, *et al.*. Characterization of interlaminar shear properties for composite materials using digital image correlation [J]. *FRP / Composites*, 2016(1): 29-32. (in Chinese)
- [10] WANG X, AHN J, LEE J, *et al.*. Investigation on failure modes and mechanical properties of CFRP-Ti6Al4V hybrid joints with different interface patterns using digital image correlation[J]. *Materials & Design*, 2016, 101: 188-196.
- [11] HAJ-ALI R, ELIASI R, FOURMAN V, *et al.*. Mechanical characterization of aerogel materials

- with digital image correlation [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, 226: 44-52.
- [12] 陈凡秀,庄琦,王日龙. 基于数字图像相关方法的动载颗粒体系力链破坏机制初探[J]. *岩土力学*, 2016,37(2):563-573.
CHEN F X, ZHUANG Q, WANG R L. A preliminary study of dynamic failure mechanism of force chain in a particle system based on digital image correlation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 563-573. (in Chinese)
- [13] 何云腾,毛灵涛. 数字图像相关法在花岗岩变形测量中的应用[C]. 北京力学学会. 北京力学学会第二十二届学术年会,2016:2.
HE Y T, MAO L T. Application of digital image correlation method in granite deformation measurement [C]. *Beijing Institute of Mechanics. Twenty-second Annual Conference Proceedings. Beijing Institute of Mechanics*; 2016: 2. (in Chinese)
- [14] 王学滨,张楠,潘一山,等. 单轴压缩湿土样最大剪切应变场数字图像相关方法结果的统计分析[J]. *岩土工程学报*,2016,38(6):996-1003.
WANG X B, ZHANG N, PAN Y S, *et al.*. Statistical analysis of maximum shear strain fields for wet oil specimens in uniaxial compression using digital image correlation method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 996-1003. (in Chinese)
- [15] BRUCK H A, MCNEILL S R, SUTTON M A, *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 261-267.
- [16] 潘兵,续伯钦,陈丁,等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. *计量学报*,2005,26(2): 128-134.
PAN B, XU B Q, CHEN D, *et al.*. Sub-pixel registration using Quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005,26(2): 128-134. (in Chinese)
- [17] 芮嘉白,金观昌,徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. *力学学报*,1994,26(5):599-607.
BING J B, JIN G CH, XU B Y. A new digital speckle correlation method and its application [J]. *Mechanics*, 1994,26(5): 599-607. (in Chinese)
- [18] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [19] MA S P, JIN G C. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm [J]. *ACTA Mechanica Sinica*, 2003, 16(4): 366-373.
- [20] TANG C, LIU M, YAN H Q, *et al.*. The improved genetic algorithms for digital image correlation method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(10): 574-577.
- [21] PILCH A, MAHAJAN A, CHU T C. Measurement of whole-field surface displacements and strain using a genetic algorithm based intelligent image correlation method [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2004, 126(3): 479-488.
- [22] 陈华,叶东,陈刚,等. 遗传算法的数字图像相关搜索法[J]. *光学精密工程*,2007,15(10):1633-1637.
CHEN H, YE D, CHEN G, *et al.*. Digital image correlation search method based on genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10): 1633-1637. (in Chinese)
- [23] HWANG S F, HORN J T, WANG H J. Strain measurement of SU-8 photoresist by a digital image correlation method with a hybrid genetic algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(3):281-289.
- [24] ZHANG T, CHEN H Y, YANG X K, *et al.*. Investigation for digital speckle correlation method based on algorithm [J]. *SPIE*, 2011, 1869-1872.

作者简介:



程振进(1993—),男,江西景德镇人,硕士研究生,2010年于西北工业大学获得学士学位,主要从事图像测量及图像散斑方法的研究。E-mail: laozhuo@sjtu.edu.cn



王全保(1982—),男,河南辉县人,副教授,硕士生导师,2003年、2006年于西安理工大学分别获得学士、硕士学位,2010年于上海交通大学获得博士学位,主要从事图像测量,测量与控制技术,结构健康监测等方面的研究。E-mail: quanbaowang@sjtu.edu.cn