

# 二维 Otsu 图像分割的人工鱼群算法

潘 喆 吴一全

(南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 阈值分割是图像分割中广泛采用的一种简单有效的方法。将群智能中的人工鱼群算法应用到阈值分割算法中,提出了二维 Otsu 阈值分割的人工鱼群算法。通过大量实验表明,该算法能够准确的找到最佳阈值。同时将基于人工鱼群算法的二维 Otsu 算法与基于基本遗传算法及最优保存策略遗传算法的二维 Otsu 算法进行比较,分别独立运行 10 次,对 10 次得到的阈值以及均值、方差进行了比较,并将收敛曲线作为算法复杂度的评价指标。统计结果显示,该算法不仅能够对图像进行更准确的分割,而且收敛的速度更快。

**关键词** 图像处理;阈值分割;Otsu 法;人工鱼群算法

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2115

## The Two-dimensional Otsu Thresholding Based on Fish-swarm Algorithm

Pan Zhe Wu Yiquan

(School of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Thresholding is a simple and efficient technique for image segmentation in digital image processing. In this paper, the fish-swarm algorithm of swarm intelligence is used in image thresholding, and the two-dimensional Otsu thresholding algorithm based on the fish-swarm algorithm is proposed. Numerous experiments show that this algorithm could select the best threshold accurately. In experiments, the threshold, mean and variance from running the two-dimensional Otsu thresholding based on fish-swarm algorithm and single genetic algorithm, as well as the elitist strategy genetic algorithm ten times independently are compared. Moreover, the convergence curves are selected as the evaluation of the algorithm complexity. Experiment results show that this method not only can segment the image more accurately, but also has faster convergent speed.

**Key words** image processing; thresholding; Otsu; fish-swarm algorithm

### 1 引 言

图像分割就是把图像中具有特殊含义的不同区域区分开来,每一个区域都满足某种特性的一致性。目标检测、特征提取和目标识别等,都有赖于图像分割的质量<sup>[1]</sup>。阈值法是一种简单有效的图像分割方法,在重视运算效率的应用场合,得到了广泛的应用。自 20 世纪 60 年代以来,国内外学者提出了大量的阈值选取方法<sup>[2,3]</sup>。Otsu<sup>[4]</sup>提出的一维最大类间方差法(Otsu 法),这种通过图像一维灰度直方图

来选取阈值的方法虽然处理速度快,但不能反映图像的局部空间信息,当图像受到噪声干扰、光照不均匀等因素影响时,难以获得满意的分割效果,甚至产生分割错误。因此,刘健庄等<sup>[5]</sup>将 Otsu 法从一维拓展到了二维,即通过图像的灰度级-邻域平均灰度级二维直方图来选取阈值,其效果较一维方法有明显改善,但同时由于将一维搜索空间扩大为二维,加上变成二维后算法本身的复杂性,导致运算量按指数增长,运算速度慢,难以用于实时处理。因此,人们

收稿日期: 2008-06-18; 收到修改稿日期: 2008-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(60872065)资助项目

作者简介: 潘 喆(1983—),女,硕士,主要从事图像处理与识别等方面的研究。E-mail: snowangel2003@163.com

导师简介: 吴一全(1963—),男,博士,教授,主要从事图像处理与识别、信号处理等方面的研究。

提出了一些快速算法,其中一类就是利用群智能的思想将阈值的全局搜索变为智能搜索,大大减少了搜索次数。遗传算法<sup>[6~10]</sup>就是目前较为常用的一种群智能算法。

李晓磊<sup>[11,12]</sup>提出了一种新的群智能算法——人工鱼群算法。人工鱼群算法是模仿鱼类行为方式提出的一种基于动物自治体的优化方法,能够很好地解决非线性函数优化等问题。算法主要模仿了鱼群的觅食行为、聚群行为、追尾行为和随机行为。鱼群通过聚群行为能够很好的跳出局部极值,并尽可能地搜索到其他的极值,最终搜索到全局极值;追尾行为则有助于快速的向某个极值方向前进,加快寻优的速度,并防止在局部震荡而停滞不前。鱼群算法在对以上行为进行评价后,自动选择合适的行为,

从而形成了一种高效快速的寻优策略。本文将人工鱼群算法引入到图像阈值分割中,提出了二维 Otsu 阈值分割的人工鱼群算法。本文通过大量实验表明,该算法不仅能够对图像进行更准确的分割,而且收敛的速度更快。文章同时将该算法与图像阈值分割中常用的算法——二维最大 Shannon 熵算法<sup>[13~16]</sup>的分割结果进行比较,发现效果和收敛速度都有很大的优势。

## 2 二维 Otsu 阈值分割法

刘健庄等人将一维 Otsu 阈值分割法推广到二维。定义目标和背景出现的概率  $\omega_0(t,s)$  和  $\omega_1(t,s)$  分别为:

$$\omega_0(t,s) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s p_{ij} \quad \omega_1(t,s) = \sum_{i=s+1+j=t+1}^t \sum_{j=1}^s p_{ij} = 1 - \omega_0(t,s) \quad (1)$$

其中  $p_{ij}$  表示图像中(灰度级,邻域平均灰度级)对出现的联合概率。

两类对应的均值矢量  $\mu_0$  和  $\mu_1$  为:

$$\mu_0 = (\mu_{0i}, \mu_{0j})^T = \left[ \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s i p_{ij} / \omega_0(t,s), \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s j p_{ij} / \omega_0(t,s) \right]^T = [\mu_i(t,s) / \omega_0(t,s), \mu_j(t,s) / \omega_0(t,s)]^T \quad (2)$$

$$\mu_1 = (\mu_{1i}, \mu_{1j})^T = \left[ \sum_{i=s+1+j=t+1}^t \sum_{j=1}^s i p_{ij} / \omega_1(t,s), \sum_{i=s+1+j=t+1}^t \sum_{j=1}^s j p_{ij} / \omega_1(t,s) \right]^T \quad (3)$$

二维直方图上总的均值矢量  $\mu_T$  为:

$$\mu_T = (\mu_{Ti}, \mu_{Tj})^T = \left( \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s i p_{ij}, \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s j p_{ij} \right)^T \approx \omega_0(t,s) \mu_0 + \omega_1(t,s) \mu_1 \quad (4)$$

用类间离散度矩阵的迹  $t_r S_B(t,s)$  作为离散度测度:

$$t_r S_B(t,s) = \omega_0(t,s) [(\mu_{0i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{Tj})^2] + \omega_1(t,s) [(\mu_{1i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{1j} - \mu_{Tj})^2] = \frac{[\mu_{Ti} \omega_0(t,s) - \mu_i(t,s)]^2 + [\mu_{Tj} \omega_0(t,s) - \mu_j(t,s)]^2}{\omega_0(t,s) [1 - \omega_0(t,s)]} \quad (5)$$

当类间离散度矩阵的迹最大时取得最佳阈值,即  $(T,S) = \arg \max_{1 \leq s, t \leq L} \{t_r S_B(t,s)\}$ 。

为了提高抗噪性能,本文利用文献<sup>[17]</sup>中所提出的分割判别法:

$$b(m,n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq f(m,n) + g(m,n) \leq T + S \\ 0 & f(m,n) + g(m,n) > T + S \end{cases} \quad (6)$$

其中  $f(m,n)$  为像素点  $(m,n)$  的灰度级,  $g(m,n)$  为  $(m,n)$  点的邻域平均灰度级,  $b(m,n)$  为分割后的二值图像。

## 3 基于人工鱼群算法的图像阈值分割

### 3.1 鱼群初始化

因为求图像的二维阈值,故人工鱼个体的状态可表示为  $[x(\cdot), y(\cdot)]$ , 其中  $[x(i), y(i)] (i = 1, \dots, n)$  为欲寻优的变量,  $n$  为人工鱼的数目(即种

群数),  $n$  越大,跳出局部极值的能力越强,收敛速度也越快,但计算量也越大;人工鱼当前所在位置的食物浓度表示为  $Y = f(x,y)$ , 其中  $Y$  为目标函数值;人工鱼个体之间的距离表示为  $d_{i,j} = \sqrt{[x(j) - x(i)]^2 + [y(j) - y(i)]^2}$ ;  $L_{\text{visual}}$  表示人工鱼的感知距离,即视野,视野越大,越容易使人工鱼发现全局极值并收敛,本文设为 50;  $N_{\text{Step}}$  表示人工鱼移动的最大步长,随着步长的增加,收敛速度得到一定的加速,但过大时,会出现振荡现象而大大影

响收敛速度,本文采用固定步长,设为 3; $\delta$  为拥挤度因子, $\delta$  越大,人工鱼摆脱局部极值的能力越强,但收敛速度会有所减缓,本文设为 0.5; $N_{try}$  为试探数,试探的次数越多,人工鱼摆脱局部极值的能力就越弱,而对局部极值不是很突出的优化问题,增加试探次数可以减少人工鱼的随机移动而提高收敛的效率,本文设为 5。人工鱼的初始位置在 0 到 255 之间随机生成。

### 3.2 行为选择

根据具体图像,对人工鱼当前所处的环境进行评价,从而选择一种行为。如本文应用二维 Otsu 法来选择阈值,即使适应度函数(类间离散度矩阵的迹)最大,就是模拟执行聚群、追尾、觅食等行为,然后评价行动后的值,选择其中的最大者来实际执行。随机行为其实是觅食行为的一个缺省行为。

(1) 觅食行为:设人工鱼当前状态为  $[x(i), y(i)]$ ,在其感知范围内随机选择一个状态  $[x(j), y(j)]$ ,如果  $[x(j), y(j)]$  优于  $[x(i), y(i)]$  则向该方向前进;反之,再重新随机选择状态  $[x(j), y(j)]$ ,判断是否满足前进条件;这样反复尝试  $N_{try}$  次后,如果仍不满足前进条件,则随机移动一步。

(2) 聚群行为:设人工鱼当前状态为  $[x(i), y(i)]$ ,探索其邻域内(即  $d_{i,j} < L_{visual}$ )的伙伴数目  $n_f$  及中心位置  $(x_c, y_c)$ 。如果  $Y_c/n_f > \delta * Y_i$  ( $Y_c$  为中心位置的食物浓度,也就是  $(x_c, y_c)$  的适应度函数值),表明伙伴中心有较多食物,且不太拥挤,则朝伙伴的中心位置方向前进;否则执行觅食行为。

(3) 追尾行为:设某人工鱼当前状态为  $[x(i), y(i)]$ ,探索其邻域内  $Y_j$  最大的  $[x(j), y(j)]$ ,若:  $Y_j/n_j > \delta * Y_i$  ( $Y_j$  为  $[x(j), y(j)]$  的适应度函数值,  $n_j$  为  $[x(j), y(j)]$  周围的邻居数),则向其移动,否则进行其它行为。

(4) 随机行为:在视野中随机选择一个方向移动。

### 3.3 优化准则

开始时,在参数空间随机分配  $[x(i), y(i)]$ ,进行行为选择,计算最高适应度值及其对应的阈值,当算法迭代步数超过 30 步时,则结束迭代(终止条件)或经过 10 次迭代,群体中的最高适应度仍未发生变化,具有最高适应度值的个体即为分割阈值  $(T, S)$ 。

### 3.4 引入生存和竞争机制的鱼群算法

选取图像的二维阈值时,搜索的空间较大,且适应度值变化不大,一部分人工鱼将处于无目的的随机移动中,这影响了寻优的效率,因此引入生存机制

和竞争机制加以改善。

#### a) 生存机制

随着人工鱼所处环境的变化,赋予人工鱼一定的生存能力,使得人工鱼在全局极值附近拥有最强的生命力,从而具有最长的生命周期;位于局部极值的人工鱼将会随着生命的消亡而重生,即随机产生该人工鱼的下一个位置,从而展开更广的搜索,提高了寻优能力和效率。

#### b) 竞争机制

竞争机制就是实时的调整人工鱼的生存周期,使人工鱼的生存周期随着寻优的逐步进展而被其中最强劲的竞争者所提升,从而使得那些处于非全局极值点附近的人工鱼能有机会展开更广范围的搜索。

## 4 实验结果与分析

本文将人工鱼群算法应用于二维 Otsu 阈值分割法,对大量不同类型的灰度图像进行了阈值分割实验,并将其与基于二维 Otsu 的基本遗传算法<sup>[8]</sup>及最优保存策略遗传算法<sup>[18]</sup>进行比较,发现分割结果准确、稳定且具有较快的收敛速度。同时将本文提出的算法与基于二维最大 Shannon 熵的基本遗传算法<sup>[15]</sup>及最优保存策略遗传算法<sup>[18]</sup>进行比较。现选取其中的五幅图像,分别为车牌、指纹、有噪齿轮图、无噪 lena 图和有噪 lena 图。图 1 从左到右分别为五幅图像的原始灰度级图像、基于人工鱼群算法的二维 Otsu 法分割后的二值图像、基于基本遗传算法的二维 Otsu 法分割后的二值图像、基于最优保存策略遗传算法的二维 Otsu 法分割后的二值图像、二维 Otsu 原始算法分割后的二值图像、基于基本遗传算法的二维最大 Shannon 熵法分割后的二值图像和基于最优保存策略遗传算法的二维最大 Shannon 熵法分割后的二值图像。以上的鱼群算法中人工鱼的数目  $n=10$ ,遗传算法的种群设为 30。相应的分割阈值及其所对应的适应度分别列于表 1。表 2 给出了将基于二维 Otsu 和基于二维最大 Shannon 熵的基本遗传算法及最优保存策略遗传算法(种群数均为 30)与人工鱼群算法( $n=10$ )对有噪 lena 图分别独立运行 10 次得到的阈值,并对其均值、方差进行比较。图 2 至图 6 还给出了  $n$  分别为 10, 20, 30 时,人工鱼群算法最高适应度的收敛曲线图及种群规模分别为 10, 30, 50 时基于二维 Otsu 和基于二维最大 Shannon 熵的基本遗传算法和最优保存策略遗传算法最高适应度的收敛曲线图。在本实验中,遗传算法编码长度为 8,单点交叉,最大迭代次数为 30 次。

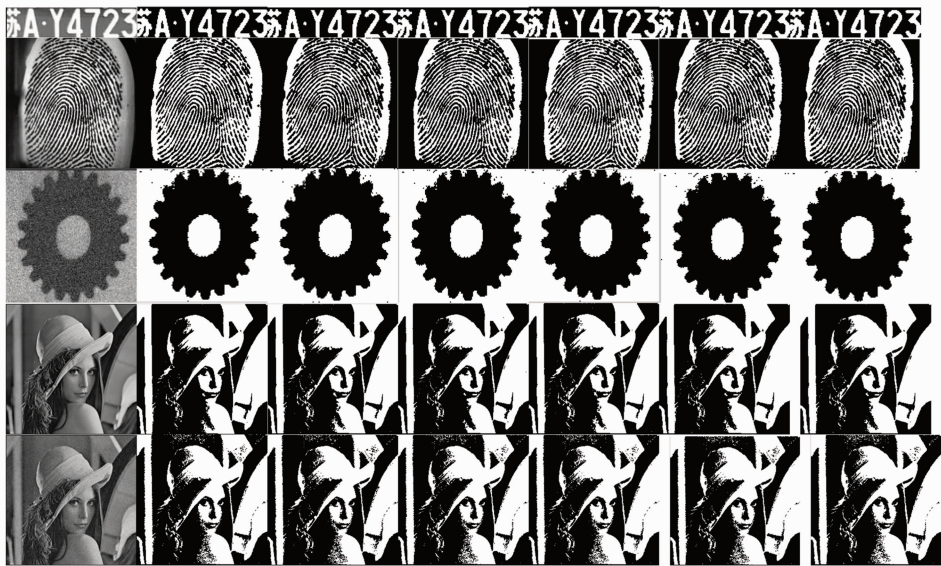


图 1 从上到下依次为:车牌(37×160)、指纹(256×256)、有噪齿轮图(133×131)、无噪 lena 图(256×256)和有噪 lena 图(256×256);从左到右依次为:原始图像、人工鱼群算法、二维 Otsu 基本遗传算法、二维 Otsu 最优保存策略遗传算法、Otsu 原始算法、二维最大 Shannon 熵基本遗传算法和二维最大 Shannon 熵最优保存策略遗传算法分割后的二值图像

Fig. 1 from up to down: vehicle license plat(37×160), fingerprint(256×256), gear with noise(133×131), Lena without noise(256×256) and Lena with noise(256×256); from left to right: original image, fish-swarm algorithm, single genetic algorithm of 2D Otsu, elitist strategy genetic algorithm of 2D Otsu, original Otsu algorithm, single genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy and elitist strategy genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy

表 1 图像分割的阈值( $T+S$ )及适应度值

Table 1 the threshold( $T+S$ ) and fitness of image segmentation

Image		Vehicle license	Fingerprint	Gear with	Lena without	Lena with
		plat		noise	noise	noise
Fish-swarm algorithm	Threshold	366	217	239	215	215
	Fitness	7211.28	5420.96	3955.22	3660.66	2834.89
Single genetic algorithm of 2D Otsu	Threshold	371	246	241	213	217
	Fitness	7209.61	5162.79	3951.59	3659.27	2834.01
Elitist strategy genetic algorithm of 2D Otsu	Threshold	371	250	242	219	217
	Fitness	7210.54	5387.45	3954.62	3660.60	2834.23
Original Otsu algorithm	Threshold	368	231	239	212	215
	Fitness	7211.74	5866.36	3955.22	3660.80	2834.89
Single genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy	Threshold	372	246	245	218	218
	Threshold	370	243	233	217	215

从图 1 可以看出,对于各种类型的灰度图像,不论有无噪声,人工鱼群算法及遗传算法的分割结果都与 Otsu 原始算法的分割结果差不多,都能较好的选取阈值,使目标与背景分割准确。而从表 1 所示数据可以看出,对于每一幅图像,鱼群算法所选取的阈值及其所对应的适应度比遗传算法的阈值及其适应度更接近于 Otsu 原始算法得到的结果。由于 Otsu 原始算法采用的是穷举法来搜索阈值,因此该方法得到的适应度值是全局极值,即对应阈值为最

佳阈值,故人工鱼群算法所得的阈值较遗传算法更精确。而人工鱼群算法不像 Otsu 原始算法那样进行穷举搜索,使用智能搜索,因此搜索效率较高。对于无噪 lena 图,虽然使用遗传算法取得的阈值比鱼群算法取得的阈值更跟接近 Otsu 原始算法的阈值,但鱼群算法的适应度值更跟接近最佳值。从基于二维最大 Shannon 熵的基本遗传算法及最优保存策略遗传算法的分割结果与二维 Otsu 鱼群算法的分割结果比较可以看出,分割效果差不多。

表 2 有噪 lena 图阈值分割运行 10 次结果比较

Table 2 the comparison of running the image of lena with noise 10 times

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean	Variance
Fish-swarm algorithm	216	215	215	215	215	215	216	215	216	215	215.3	0.4830
Single genetic algorithm of 2D Otsu	218	218	219	220	220	218	217	215	215	218	217.8	1.7512
Elitist strategy genetic algorithm of 2D Otsu	217	218	220	216	219	217	217	217	218	218	217.7	1.1595
Single genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy	215	220	215	218	221	220	216	218	216	217	217.6	2.1705
Elitist strategy genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy	216	214	216	218	213	217	214	216	215	213	215.5	1.5092

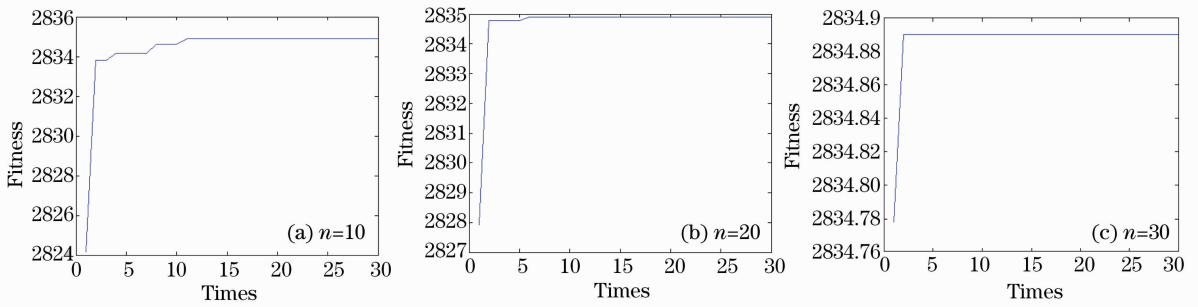


图 2 二维 Otsu 人工鱼群算法最高适应度的收敛曲线图

Fig. 2 The best fitness convergence curve of fish-swarm algorithm of 2D Otsu

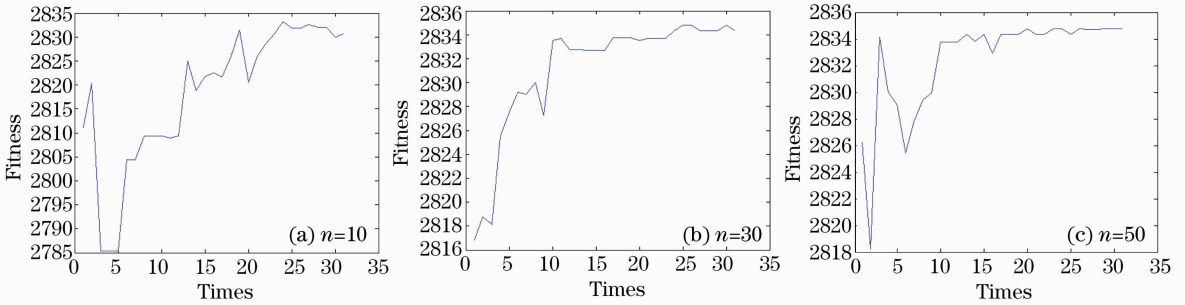


图 3 二维 Otsu 基本遗传算法最高适应度的收敛曲线图

Fig. 3 The best fitness convergence curve of single genetic algorithm of 2D Otsu

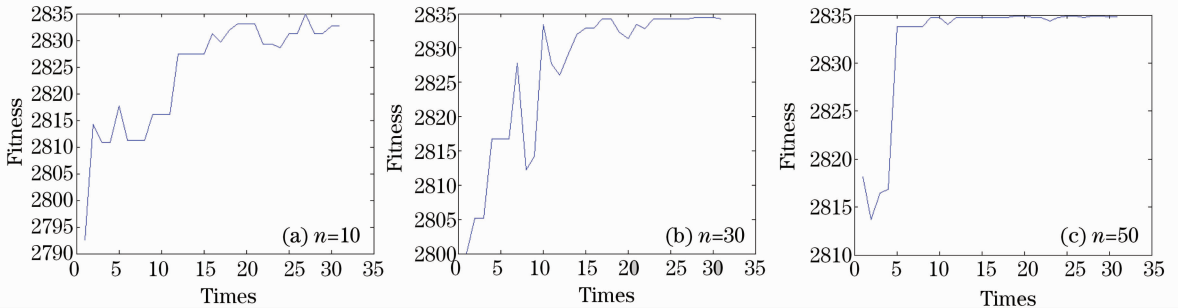


图 4 二维 Otsu 最优保存策略遗传算法最高适应度的收敛曲线图

Fig. 4 The best fitness convergence curve of elitist strategy genetic algorithm of 2D Otsu

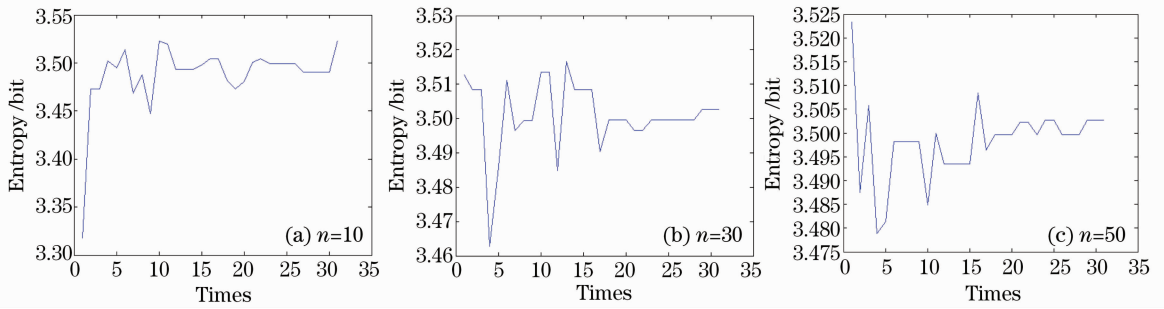


图 5 二维最大 Shannon 熵基本遗传算法最高适应度的收敛曲线图

Fig. 5 The best fitness convergence curve of single genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy

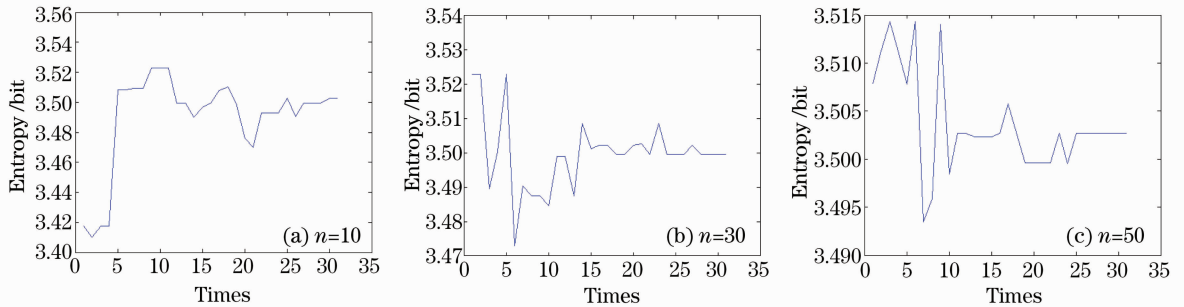


图 6 二维最大 Shannon 熵最优保存策略遗传算法最高适应度的收敛曲线图

Fig. 6 The best fitness convergence curve of elitist strategy genetic algorithm of 2D maximum Shannon entropy

表 2 给出了将人工鱼群算法及遗传算法对有噪声lena图进行分割时10次独立运行的结果。通过对运行结果的均值和方差进行统计比较,可以看出,二维Otsu鱼群算法10次运行的均值比二维Otsu遗传算法更接近于最优值,且方差远小于二维Otsu遗传算法的结果。这说明鱼群算法的搜索精度及稳定性均优于相应的遗传算法。由于二维Otsu与二维最大Shannon熵的判断准则不同,故未比较其适应度,但可以看出二维最大Shannon熵遗传算法的方差要远大于二维Otsu鱼群算法,说明二维Otsu鱼群算法有着较好的稳定性。

图2~6还给出了 $n=10, 20, 30$ 时,二维Otsu人工鱼群算法最高适应度的收敛曲线图及种群规模分别为10,30,50时基于二维Otsu和基于二维最大Shannon熵的基本遗传算法和最优保存策略遗传算法最高适应度的收敛曲线图。可以看出,人工鱼群算法当 $n=10$ 时,需要迭代10次以上才能达到收敛; $n=20$ 时,需要迭代5次以上;而当 $n=30$ 时,仅需2次迭代就达到最佳值。这是由于随着人工鱼数目的增加,寻优的几率增加,可以更快地找到最佳值,但是随着 $n$ 的增大,计算量将会按指数增长,故一般情况下,取 $n=10$ ,终止条件设为当算法迭代步数超过30步时,或经过10次迭代,群体中的最高适

应度仍未发生变化,则结束迭代。再来看基本遗传算法的收敛曲线,当种群数为10时,迭代30次还未收敛;种群数为30时,需要迭代25次才达到收敛;而种群数为50时,需15次以上。最后来看最优保存策略遗传算法,该算法收敛能力比基本遗传算法好,当种群数为10时,迭代30次还未收敛;种群数为30时,需要迭代20次达到收敛;而种群数为50时,需10次以上。可以发现,鱼群算法与遗传算法比较而言,所需的种群规模小,迭代步数少,并且遗传算法的收敛是折线收敛,而鱼群算法最终以直线收敛于最佳值。再看二维Otsu人工鱼群算法与基于二维最大Shannon熵的基本遗传算法和最优保存策略遗传算法的比较,显然基于二维最大Shannon熵的基本遗传算法和最优保存策略遗传算法的收敛性没有二维Otsu人工鱼群算法的收敛性好,且稳定性差。

## 5 结 论

本文将群智能中的人工鱼群算法引入到图像分割中,提出了二维Otsu阈值分割的人工鱼群算法。通过大量实验表明,本文所提方法能准确地选取阈值。并将该算法与二维Otsu和基于二维最大Shannon熵的基本遗传算法及最优保存策略遗传算法进行统计比较,结果显示该算法取得的阈值比遗

传算法更接近最优值,稳定性更好,能以更小的种群,更少的迭代步数达到收敛。

### 参 考 文 献

- Liu Wenping, Wu Lide. Comparison of threshold selection for image segmentation [J]. *Pattern recognition and artificial intelligence*, 1997, **10**(3): 271~277  
刘文萍,吴立德. 图像分割中阈值选取方法比较研究[J]. 模式识别与人工智能,1997, **10**(3): 271~277
- Wu Yiquan, Zhu Zhaoda. 30 Years (1962 ~ 1992) of the developments in threshold selection methods in image processing (1)[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1993, **8**(3): 193~201  
吴一全,朱兆达. 图像处理中阈值选取方法 30 年(1962~1992)的进展(一)[J]. 数据采集与处理,1993, **8**(3): 193~201
- Wu Yiquan, Zhu Zhaoda. 30 Years (1962 ~ 1992) of the developments in threshold selection methods in image processing (2)[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1993, **8**(4): 268~282  
吴一全,朱兆达. 图像处理中阈值选取方法 30 年(1962~1992)的进展(二)[J]. 数据采集与处理,1993, **8**(4): 268~282
- Ostu N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. *IEEE Trans. System. Man and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62~66
- Liu Jianzhuang, Li Wngqing. The automatic thrsholding of gray-level picture via two-dimensional OTSU method [J]. *ACTA Automatica Sinica*, 1993, **19**(1): 101~105  
刘健庄,栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, **19**(1): 101~105
- Pengyeng Yin. A fast scheme for optimal thresholding using genetic algorithm[J]. *Signal Processing*, 1999, **72**: 85~95
- Zheng Hong, Pan Li. The automatic selection of image threshold on the basis of genetic algorithms[J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, **4A**(4): 327~330  
郑 宏,潘 励. 基于遗传算法的图像阈值的自动选取[J]. 中国图像图形学报,1999, **4A**(4): 327~330
- Chang Qing, Wang Li, Xing Chao *et al.*. The selection of image threshold on the basis of genetic algorithms [J]. *Computer Project and Applications*, 2002, **22**: 35~37  
常 青,王 立,邢 超等. 基于遗传算法的图像阈值选取[J]. 计算机工程与应用, 2002, **22**: 35~37
- Du Xiaochen, Liu Jianping. Infrared image segmentation method based on 2D maximum between-cluster variance and genetic algorithm[J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(1): 66~69  
杜晓晨,刘建平. 基于二维 OTSU 和遗传算法的红外图像分割方法[J]. 红外技术, 2005, **27**(1): 66~69
- Liu Jianping. Application of imfaraed image segmentation based on 2D maximum between-cluster variance and genetic algorithm [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2005, **22**(4): 375~379  
刘建平. 二维最大类间方差和遗传算法在红外图像分割中的应用 [J]. 浙江理工大学学报,2005, **22**(4): 375~379
- Li Xiaolei. A new intelligent optimization method-artificial fish school algorithm[D]. Zhejiang University, 2003  
李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D]. 浙江大学, 2003
- Li Xiaolei, Shao Zhijiang, Qian Jixin. An optimizing method based on autonomous animats: fish - swarm algorithm [J]. *System Engineering-Theory & Practice*, 2002, **22**(11): 32~38  
李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践,2002, **22**(11): 32~38
- Abutaleb A. S. Automatic thresholding of gray-level picture using two-dimensional entropies[J]. *Pattern Recognition*, 1989, **47**(1): 22~32
- Guo Haitao, Tian Tan, Wang Lianyu *et al.*. Image segmentation using the maximum entropy of the Two-Dimensional bound histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 506~509  
郭海涛,田 坦,王连玉等. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 506~509
- Chen Guo, Zuo Hongfu. 2-D maximum entropy method of image segmentation based on genetic algorithm [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2002, **14**(6): 530~534  
陈 果,左洪福. 图像分割的二维最大熵遗传算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, **14**(6): 530~534
- Lian Yulai, Geng Junxue. Application of 2-d entropic segmation method based on genetic algorithm [J]. *Modern Electronics Technique*, 2004, **182**(15): 25~27  
练玉来,耿军雪. 遗传算法在二维熵图像分割中的应用[J]. 现代电子技术, 2004, **182**(15): 25~27
- Yang Tian, Li Defang. Study of two-dimensional otsu thresholding for grey image segmentation [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1998, **23**(6): 658~662  
杨 恬,李德芳. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),1998, **23**(6): 658~662
- Bi Weihong, Ren Hongmin, Wu Qingbiao. A new elitist strategy in genetic algorithms [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2006, **33**(1): 32~35  
毕惟红,任红民,吴庆标. 一种新的遗传算法最优保存策略[J]. 浙江大学学报(理学版),2006, **33**(1): 32~35