

引用格式: 张晓博, 彭进业, 刘恬. 自适应视野和步长的混沌人工鱼群算法[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(6): 5-9. [ZHANG X B, PENG J Y, LIU T. Adaptive visual field and step length of chaotic artificial fish swarm algorithm [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(6): 5-9.]

自适应视野和步长的混沌人工鱼群算法

张晓博^{1,2}, 彭进业¹, 刘恬³

(1 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064;

3 长安大学 电子 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对基本人工鱼群在搜索过程中易陷入局部最优问题, 提出一种混沌行为的人工鱼群改进算法. 首先, 引入服从均匀分布的 Logistic 混沌序列, 使鱼群的种群初始化和搜索过程具有混沌行为的随机性和遍历性特点, 提高全局搜索能力; 其次, 将个体鱼之间的平均点距作为鱼群种群多样性的衡量指标, 使人工鱼的视野和步长根据种群多样性的变化进行自适应调节, 避免由于视野和步长为定值而导致的前期收敛速度快, 而后期收敛缓慢且易在搜索位置点附近产生震荡的问题. 实验结果表明, 改进后人工鱼群算法, 能克服局部极值, 搜索结果更接近测试函数的理论值.

关键词: 人工鱼群; 均匀分布; 混沌序列; 平均点距; 自适应视野

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)06—0005—05

Adaptive visual field and step length of chaotic artificial fish swarm algorithm

ZHANG Xiao-bo^{1,2}, PENG Jin-ye¹, LIU Tian³

(1 School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3 School of electronic and control engineering, Changan University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to solve the problem of local optimum in searching the basic artificial fish swarm, an improved artificial fish swarm algorithm with chaotic behavior is proposed. First, the Logistic chaotic sequence with uniform distribution was introduced to make the initial and search process of the fish population have the characteristics of randomness and ergodicity of chaotic behavior, and improve the global search ability. Second, the average distance between individual fish as indicators of fish species diversity, make the vision and step of artificial fish can adaptively adjust according to the variation of species diversity, avoid due to vision and step for the fixed value of early convergence speed, and the late slow convergence and easy reverberate in the search location near the point of the problem. The experimental results show that the improved artificial fish swarm algorithm can overcome the local extremum and the search result is closer to the theoretical value of the test function.

Key words: artificial fish swarm; uniform distribution; chaotic sequences; average point distance; adaptive field of vision

1 引言

人工鱼群算法是一种模拟鱼群行为的智能算法,具有步骤简洁、并行处理等优点.目前人工鱼群算法已在水声通信系统设计^[1]、电网电力调度^[2]、导航仪器的参数校准^[3]等多个领域得到了应用.在实践过程中,人工鱼群算法存在前期收敛速度快而后后期收敛速度慢,寻优结果精度不高等问题.对算法的不足,学者结合实际应用相继地提出了一些改进方法.

通过文献[4-6]分析可知,改进基本人工鱼群的初始分布、搜索行为、以及对固定的视野和步长进行调节是提高人工鱼群搜索效果的有效途径.

本文用服从均匀分布的混沌序列改进人工鱼的行为,并通过鱼群的平均点距动态改变人工鱼的视野和步长.

2 基本人工鱼群算法

基本人工鱼群算法由个体鱼模型的建立和整体鱼群的搜索过程组成.

2.1 个体鱼模型的建立

以下用求极大值问题为例,说明个体鱼的建立.鱼群中第*i*条人工鱼状态用 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示,即 X_i 为*n*维解空间的一个解; $Y_i = f(X_i)$ 表示当前状态的食物浓度,即解对应的目标函数; $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$ 表示两条个体鱼之间的距离; $visual$ 表示视野,即个体鱼感知范围; $step$ 表示人工鱼的移动步长; $\delta (0 < \delta < 1)$ 表示鱼群密度的拥挤度因子; try_number 表示个体鱼每次移动时最大的试探次数, $Rand()$ 表示(0,1)之间的随机数.

在人工鱼模型建立后,个体鱼的行为包括:

(1) 觅食行为

表示人工鱼向食物多的方向移动的行为.设当前第*i*条人工鱼状态为 X_i ,对应的适应度函数值为 Y_i ,随机选择视野范围内的另一状态 X_j ,若 $Y_i < Y_j$,则向 X_j 移动 $step$ 个单位,使 X_i 到达视野范围内的一个新的好状态;若在随机 try_number 次后仍不满足前进条件,则随机向任意方向移动 $step$ 个单位.觅食行为表示为:

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i + Rand() * step * \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|}, & Y_i < Y_j \\ X_i + Rand() * step, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 聚群行为

模拟一条人工鱼个体向数量较多的区域聚集,数量多表示最优值出现的可能性大,同时也要避免过分集中,设一条人工鱼的位置为 X_i ,其适应度函数为 Y_i ,视野范围内 $Visual$ 中的鱼的个数为 N_f ,该视野范围内的中心位置 $X_c = \sum_{j=1}^{N_f} x_j / N_f$,若 $Y_c > Y_i$ 且 $N_f / N < \delta (0 < \delta < 1)$ 表示视野范围内的中心位置 X_c 有较多优秀的值且不太拥挤,则人工鱼向中心位置前进一步;否则,执行觅食行为.聚群行为表示为:

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i + Rand() * step * \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|}, & Y_c > Y_i, \frac{N_f}{N} < \delta \\ prey(X_i), & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 追尾行为

模拟个体鱼追随附近最好位置鱼的行为,若人工鱼 X_i 在自己的搜索视野范围内有适应度函数值最大的另一条鱼 X_{max} ,其对应的适应值为 Y_{max} ,如果 $Y_{max} > Y_i$,并且该最优伙伴 X_{max} 的视野内的鱼的数目 N_f 满足 $N_f / N < \delta$,则表明最优伙伴 X_{max} 的状态优且不太拥挤,则该人工鱼 X_i 向最优伙伴 X_{max} 的方向前进一步,否则就执行觅食行为.追尾行为表示为:

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i + Rand() * step * \frac{X_{max} - X_i}{\|X_{max} - X_i\|}, & Y_{max} > Y_i, \frac{N_f}{N} < \delta \\ prey(X_i), & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

(4) 随机行为

表示个体鱼在水域中自由游动的过程.即人工鱼在进行觅食行为时,若多次随机选择的另一状态仍不能满足当前人工鱼移动条件时所进行的一种移动行为,也是觅食行为的一种缺省行为.

(5) 约束行为

在寻优过程中,由于聚群和随机行为等操作的作用,可能会消弱人工鱼移动状态的目标性、针对性,且降低算法的搜索效率,因此需要加入相对应的约束条件来约束其状态行为的选择,目的是增加行为状态选择的可行性,从而提高其效率.

(6) 公告板

用来记录当前搜索到的最优人工鱼的个体状态和对应的适应值,会在每次的迭代后实时更新.

(7) 行为评价

对人工鱼自主行为的一种评价方式,评价类型分两种,一是最优行为执行,二是较优行为执行,可以通过试探法,对执行聚群、追尾等行为进行模拟,模拟行为执行后对其进行评价,选择最优行为执行。

2.2 整体鱼群的搜索过程

整体鱼群的搜索过程包括以下步骤:

步骤一:初始化设置,包括种群规模 N ,每条人工鱼的初始位置,人工鱼视野 $visual$,步长 $step$,拥挤度因子 δ ,试探次数 try_number ,随机数 $Rand()$ 等。

步骤二:计算对比初始鱼群中所有个体鱼的适应度函数值,并将最优人工鱼的状态值赋给公告板。

步骤三:对每条人工鱼进行评价,根据评价选择其下一步所执行的行为,包括觅食、聚群、追尾等。

步骤四:执行评价后选择的最优行为,更新每条人工鱼的状态,生成新的鱼群。

步骤五:对所有个体进行评价,若某条人工鱼状态优于公告板中所记状态,则更新公告板,记录该个体状态。

步骤六:当公告牌上最优解误差不超过设定误差允许范围或满足终止条件,则结束算法,反之转入步骤三。

2.3 基本人工鱼群算法存在的不足

通过对基本人工鱼群算法的分析,存在以下不足:一,基本人工鱼群初始状态是由随机数产生,并不能保证人工鱼的初始位置在解空间中均匀分布。二,在个体鱼的行为,包括觅食、聚群、追尾、随机行为,都需产生一个随机扰动,该扰动需要涵盖所有可能,但基本鱼群中都由随机数 $Rand()$ 来产生,只能保证算法的随机性但不能保证其遍历性。三,由于基本人工鱼群中视野和步长均为定值,因此对搜索速度及精度均有影响。

3 自适应视野和步长的混沌人工鱼群算法

通过对以上基本人工鱼群算法的分析可以得出鱼群的初始状态、搜索行为、视野和步长的设定是造成算法易陷入局部最优,搜索速度慢的主要原因。本文通过均匀分布混沌序列对基本人工鱼的初始位置和个体鱼行为进行改进,并通过使用平均点距衡量鱼群多样性,实现视野和步长的自适应调节。

3.1 均匀分布 Logistic 混沌序列

混沌是非线性动力学系统所特有的一种运动形式。它是由确定的系统生成的随机均匀且有内在规律的变化。混沌具有规律性、随机性、遍历性的特点。

Logistic 混沌模型产生混沌变量,其映射方程如下:

$$c_{i+1} = \mu c_i (1 - c_i), c_i \in (0, 1), \mu \in (0, 4], i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, c_i 为混沌变量; μ 为混沌系统的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数,也称控制参数,取值区间为 $(0, 4]$ 。当 Lyapunov 指数 μ 在区间 $(3.5699456, 4.0]$ 时, Logistic 映射呈混沌状态,其迭代生成的序列值处于一种随机分布的状态。

基本 Logistic 混沌序列的取值在 $(0, 1)$ 区间内并不均匀,如果直接将公式 (4) 生成的序列运用于人工鱼群算法,效果并不理想。本文采用序列映射的方法将基本混沌序列转换为服从均匀分布的混沌序列^[9]。方法是对于基本 Logistic 混沌序列 c_1 ,按式 (5) 映射为服从均匀分布的混沌序列 c_2 ,映射公式如下:

$$c_2 = \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{c_1} \quad (5)$$

通过公式 (5),序列 c_2 为 $(0, 1)$ 区间上服从均匀分布的随机变量。由 μ 为 4.0,初值 c_0 设为 0.630,迭代 40 000 次;而且,为了保证混沌性,省略序列前 500 个序列值,省略后得到的混沌序列如图 1 所示。

图 1 中,(a) 图是系统随参数 μ 变化的分叉图,表明 y 轴的序列值 c 随着 x 轴李雅普诺夫指数 μ 的增加,由确定值到倍周期分叉,最终进入混沌状态的过程;(b) 图是 μ 为 4.0,初值 c_0 为 0.630 时,由映射公式 (4) 产生的基本 Logistic 混沌序列,序列值的统计分布直方图,表明在基本 Logistic 混沌的 $(0, 1)$ 区间,不同序列值出现的频次是不同的;(c) 图是经过公式 (5) 转换为服从均匀分布 Logistic 混沌序列的统计直方图,表明在序列的 $(0, 1)$ 取值区间,混沌序列的每个序列值的出现是等可能的。

3.2 鱼群初始位置的混沌化

用 (4) 和 (5) 式产生均匀分布 Logistic 混沌产生符合混沌行为的人工鱼群初始状态中,需要把 $(0, 1)$ 区间的序列值映射到人工鱼群的解空间 (a, b) ,映射公式如下:

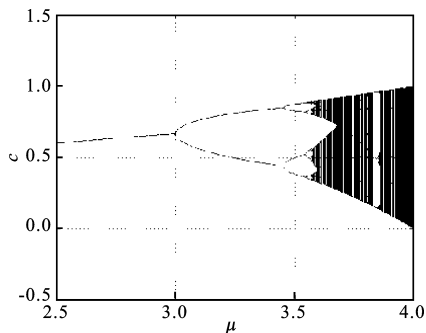
$$X_i = a + c_i (b - a) \quad (6)$$

式中, D 维解空间的上下界是 b, a ; c 是 3.1 节产生的均匀混沌序列, X_i 是个体鱼的初始位置。若人工鱼群有 N 条个体鱼,则在生成的一维混沌序列中随机截取长度为 D 的 N 个不重叠序列片段分别作为人工鱼初始位置,人工鱼群的初始位置可表示为:

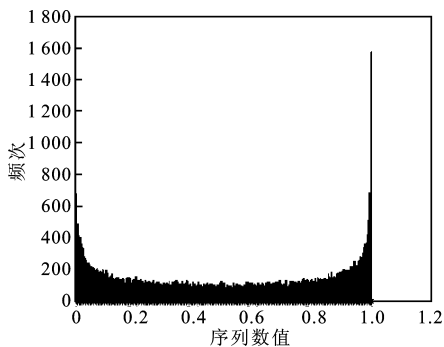
$$X = (X_1, X_2, \dots, X_i), (i \in 1, \dots, N) \quad (7)$$

式中, X_i 表示一条人工鱼, X 表示人工鱼群的初始

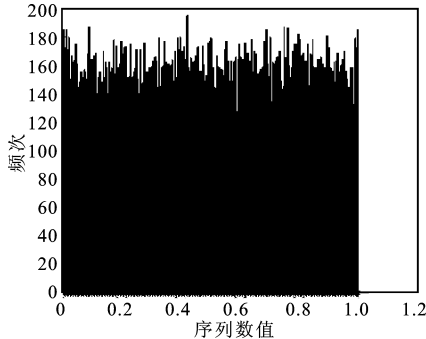
集合,利用混沌序列具有的随机性、遍历性使解空间中的人工鱼群初始分布更为均匀,可以有效提高个体鱼找到最优解的可能性。



(a) Logistic 映射分叉图



(b) 基本 Logistic 混沌序列的统计直方图



(c) 均匀分布 Logistic 混沌序列的统计直方图

图 1 Logistic 混沌统计直方图

3.3 个体鱼行为的混沌化

由于人工鱼在每次执行觅食、聚群、追尾、随机行为中都需由 $Rand()$ 函数生成一个 $(0,1)$ 之间的随机数,不能保证这些行为在解空间的遍历性,并且在每次进行迭代运算时都需重新产生新的随机数,累计计算会占用较多的系统运行时间.本文提出由均匀混沌序列值替代人工鱼执行四种行为时所需的随机数,由公式(4)和(5)产生一个足够长 $(0,1)$ 之间的混沌序列,随机从序列中选定四个起始位置截取四段足够长的均匀混沌序列.个体鱼的觅食、聚群、追尾、随机行为中产生随机扰动的随机数分别从这

四个序列中获得.这样,个体鱼的搜索行为不但具有随机性,并具有遍历性,有更大可能找到搜索范围内更优的函数值。

3.4 自适应视野和步长

在人工鱼群的算法中,视野与步长往往呈正比的关系.本文提出的自适应视野和步长的概念是在动态调节视野的基础上,按一定比例对步长进行调节,达到同时调节视野和步长的目的.方法的优点在于:(1)在对视野进行动态调节的同时还可对步长进行调节;(2)重点在于调节视野,计算相对简单且易实现。

以人工鱼的平均点距作为种群多样性的衡量指标,依据平均点距对视野和步长进行调节,使其视野根据平均点距的变化而变化,利于迭代后期的精细搜索.个体鱼到种群中心的平均点距的定义式如下^[10]:

$$\begin{cases} Dist(i) = \frac{1}{N_f \cdot S} \sum_{j=1}^{N_f} \sqrt{\sum_{l=1}^L (x_{ij}^t - X_j^t)^2} \\ X_j^t = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} x_{ij}^t \end{cases} \quad (8)$$

式中, S 为搜索空间中最长对角线的长度; $j=1,2,\dots,L$, L 为组成个体的分量数即粒子维数; x_{ij}^t 代表迭代次数为 t 的第 i 条的第 j 维的人工鱼; $\bar{X}_j^t$ 为第 t 次迭代后鱼群第 j 维的中心; i 为迭代次数。

为了加快收敛速度,在平均点距的基础上加入视野衰减因子 α , α 是一个随迭代次数增加而递减的函数,其具体算法如公式(9)所示.考虑到虽迭代次数的增加,平均点距及衰减因子都会在不同程度上减小,会使算法在迭代后期视野过小,因此在变化视野的同时,并参考文献[4]引入下限因子 β ,其值的大小可以根据具体问题设置,本文中取 $1/3$,即当迭代后期视野小于初始值 $1/3$ 时,停止减小,并使其保持为初始视野的 $1/3$. 具体算法表达式为:

$$\begin{cases} Visual_{t+1} = \alpha * Dist(i) & , \alpha \geq \beta \\ Visual_{t+1} = \beta * Visual_0 & , \alpha < \beta \\ \alpha = \exp(-30 \times (t/T_{max})^8) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\alpha \in (0,1)$; $Visual_0$ 为视野的初始值; $Visual_{t+1}$ 为自适应调节后的视野; $\beta \in (0,1)$ 为视野的下限因子,选择 $\beta = 1/3$ 。

根据上述中视野的变化调节人工鱼移动的步长,引入控制系数 ϵ ,通过视野变化控制步长变化,具体公式如下:

$$step_{t+1} = \epsilon * Visual_{t+1} \quad (10)$$

式中, ϵ 步长控制系数为定值,经测试,当 $1/10 \leq \epsilon \leq$

1/8 时,人工鱼群自适应的整体性能达到较优,本文选择 $\epsilon = 1/10$. 自适应视野和步长的混沌鱼群算法流程图如图 2 所示:

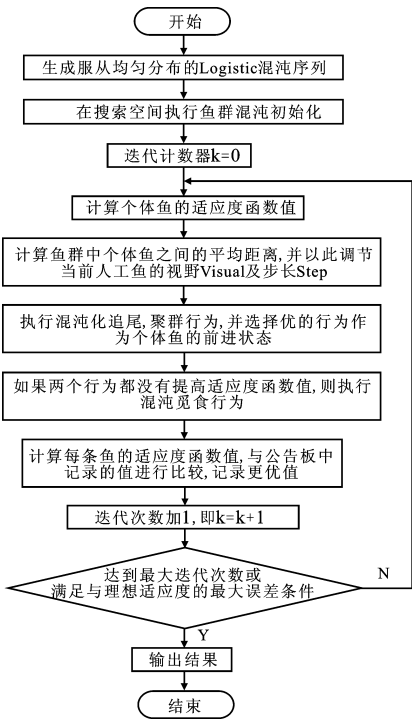


图 2 混沌行为人工鱼群算法流程图

4 实验和结果分析

为了测试自适应视野和步长混沌行为人工鱼群算法(NAFSA2)的实际性能,本文对以下三个标准函数进行了实验测试.

三个标准测试函数分别为 Rosebrock(f_1)、Schaffer(f_2)、Griewank(f_3),表达式如下:

$$f_1 = 100(x_1^2 - x_2 + (1 - x_2)^2), \\ -2.048 \leq x_i \leq 2.048; \tag{11}$$

$$f_2 = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}, \\ -100 \leq x_i \leq 100; \tag{12}$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^{10} \cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}} + 1), D = 10, \\ -512 \leq x_i \leq 512; \tag{13}$$

Rosenbrock 函数是单峰、非凸的病态函数,全局最优值位于一个平滑、狭长的抛物线性峡谷,在 $x = (1, 1)$ 处取得全局最小值 $f(x) = 0$.

Schaffer 函数在 $(0, 0)$ 处取得全局最小值 $f(x_1, x_2) = 0$,搜索范围为 $[-100, 100]$. 此函数的最小值峰周围有一圈脊,它们的取值均接近 0 点,在搜索过程中易停留在局部极小点.

Griewank 函数是一个连续多峰函数,全局最小值 $f(x_i) = 0$ 在 $(0, 0)$ 处取得,该函数存在许多局部极小点,主要用来考察算法平衡全局和局部搜索的能力.

实验中人工鱼群的参数设置如下:人工鱼数目 $N = 100$,最大迭代次数 $n = 50$,拥挤度系数 $\delta = 0.6$,视野由公式(9)确定,视野下限因子 $\beta = 1/3$,步长的控制系数 $\epsilon = 0.1$,最大重复试探次数 $try_number = 100$;均匀分布 Logistic 混沌序列的参数设置为: μ 为 4.0,初值 c_0 设为 0.630,迭代 40 000 次,舍去前 500 个值后的序列作为均匀分布混沌序列.

实验中,共有四种算法进行对比.算法 1 为文献[11]提出的云人工鱼群算法,简称 CAFSA;算法 2 为文献[12]提出的云遗传智能算法,简称 CGA;对比算法 3 是文献[5]提出的一种自适应人工鱼群算法,简称 NAFSA1;本文提出的自适应视野和步长的混沌鱼群算法在对比表中简称为 NAFSA2.

对函数 $f_1 \sim f_3$ 分别进行 20 次独立实验,记录函数的最优值和平均值.实验结果如表 1:

表 1 人工鱼群算法对比表

函数		f_1	f_2	f_3
参考函数值		0	0	0
最优值	CAFSA ^[11]	1.267 8e-07	9.339 e-10	0.610 0
	CGA ^[12]	9.625 3e-09	2.220 4e-16	3.505 1e-08
	NAFSA1 ^[5]	4.321 8e-13	1.716 8e-16	3.686 7e-10
	NAFSA2	2.451 7e-13	1.372 4e-16	4.847 5e-11

表 1 中,将以上算法按照结果的准确度排序,顺序为 NAFSA2>NSFSA1>CGA>CAFSA,本文 NAFSA2 算法不但高于云遗传算法 CGA,也高于引入社交行为的自适应人工鱼群算法 NSFSA1. 通过比较,文献[5]中的 NAFSA1 求得函数极值的最优值与本文算法 NAFSA2 比较接近,但 NAFSA2 重复实验 20 次后函数极值的平均值明显更优.这是由于 NAFSA2 方法通过均匀分布混沌序列对人工鱼群的初始位置和搜索行为进行了改进,具有更好的遍历性,使得求函数极值问题的全局寻优能力更高.而且,提出的优化算法是将平均点距作为种群多样性的度量主要依据,再结合衰减因子对视野和步长进行自适应调节,算法收敛速度快,步骤简洁.

5 结束语

本文提出从三个方面出发对基本鱼群算法进行了优化:

(下转第 14 页)

ticore Based IMA Platforms: Current Status and Potential Solutions[C]. Proceedings of the 29th Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, IEEE/AIAA ,2010;3E3-1—3E3-11.

作者简介:

王卫东 男,(1964-),博士,研究员.研究方向为事机载核心处理系统和网络技术研究.

E-mail:wwd6312004@sina.com.

邸海涛 男,(1970-),硕士,高级工程师.研究方向为机载软件技术研究.

张伟栋 男,(1981-),硕士,高级工程师.研究方向为机载计算机硬件设计.

范超 男,(1980-),硕士,高级工程师.研究方向为机载计算机硬件设计.

(上接第 9 页)

(1)从改进鱼群初始化的方式出发,引入均匀分布混沌序列,使得初始鱼群的分布具有更好的均匀性和遍历性.

(2)使用混沌序列替代个体鱼觅食、追尾等搜寻行为中需要的随机数,使得搜索行为不但具有基本人工鱼群算法的随机性,而且具有更好的遍历性,更可能在视野范围内找到最优值;而且,鱼群初始化和搜索行为的混沌化都由算法开始时产生的均匀分布混沌序列产生,即该混沌序列只产生一次,降低了算法的复杂度.

(3)将人工鱼之间的平均点距作为衡量种群多样性的指标,保证视野和步长可以进行自适应调节,在加快收敛速度的同时避免陷入局部最优.

经实验验证,相对于云遗传和之前的鱼群算法,在寻优准确度,跳出局部最优的能力等方面具有较好的提高.此外,文本算法是将一维混沌序列融入人工鱼群算法,计划将均匀分布的 Logistic 混沌和其他类型的混沌组成高维的复合混沌序列,以此对混沌行为鱼群算法进行优化可作进一步研究思路.

参考文献:

[1] GAO Y B, GUAN L W, WANG T J. Optimal artificial fish swarm algorithm for the field calibration on marine navigation [J]. Measurement, 2014 (50): 297-304.

[2] PRAKASH KUMAR K, SARAVANANA B, SWARUP K S. optimization of renewable energy sources in a microgrid using artificial fish swarm algorithm[J]. Energy Procedia,2016 ,90(12):107-113.

[3] ZHOU G L, LI Y M , HE Y C, et al. Artificial fish

swarm based power allocation algorithm for MIMO-OFDM relay underwater acoustic communication[J]. Iet Communications,2018,12 (9) :1079-1085.

[4] 马宪民,刘妮. 自适应视野的人工鱼群算法求解最短路径问题[J]. 通信学报,2014,35(1):1-6.

[5] HU X T, ZHANG H Q, LI Z C, et al. A Novel Self-Adaptation Hybrid Artificial Fish-Swam Algorithm [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46 (5): 583-588.

[6] 王明亮,闵新力,薛君志. 基于改进人工鱼群算法的 WSN 覆盖优化策略[J]. 微电子学与计算机,2015,32 (6):78-81.

[7] XINYUAN LUAN, ZHANPEI LI, TINGZHANG LIN. A novel attribute reduction algorithm based on rough set and improved artificial fish swarm algorithm [J]. Neurocomputing2016,174A(1):522-529.

[8] 李显,刘明生,李燕,等. 基于混沌鱼群改进算法的无线传感网覆盖优化[J]. 激光杂志,2015,36(1):98-101.

[9] 曹光辉,胡凯,佟维. 基于 Logistic 均匀分布图像置乱方法[J]. 物理学报,2011,60(11):133-140.

[10] 崔志华,曾建潮. 微粒群优化算法[M]. 北京:科学出版社,2011:133-134.

[11] 韦修喜,曾海文,周永权. 云人工鱼群算法[J],计算机工程与应用,2010 (22):26-29.

[12] 戴朝华,朱云芳,陈维荣,等. 云遗传算法及其应用[J]. 电子学报,2007,35(7):1419-1424.

作者简介:

张晓博 男,(1975-),博士研究生,讲师.研究方向为模式识别. E-mail:xbzhang@chd.edu.cn.

彭进业 男,(1964-),教授,博士.研究方向为模式识别、信号处理.

刘恬 女,(1993-),硕士研究生.研究方向为模式识别.