

基于 Powell 算法与改进遗传算法的医学图像配准方法

李超^{1*}, 李光耀¹, 谭云兰^{2,1}, 徐祥龙¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 井冈山大学 电子与信息工程学院, 江西 井冈山 343009)

(* 通信作者电子邮箱 lic321@163.com)

摘要: 针对基于互信息图像配准的局部极值问题, 提出一种基于 Powell 算法与改进遗传算法结合的医学图像配准方法。该方法对标准遗传算法存在的收敛速度慢、易早熟、有可能导致误配的缺陷, 提出了相应的改进策略; 采用 Logistic 混沌映射生成迭代过程中的个体; 运用基于小波变换的多分辨率分析策略, 采用混合优化算法在图像的最低分辨率层进行全局优化, 以全局最优值, 结合 Powell 算法完成医学图像配准。实验结果表明, 所提方法可有效避免优化算子陷入局部极值, 并提高了配准速度; 相对于纯 Powell 方法和未改进的遗传算法, 配准的精确度和性能更好。

关键词: 互信息; Powell 算法; 改进遗传算法; 医学图像配准; Logistic 混沌映射

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Medical image registration algorithm based on Powell algorithm and improved genetic algorithm

LI Chao^{1*}, LI Guangyao¹, TAN Yunlan^{2,1}, XU Xianglong¹

(1. College of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Jinggangshan University, Jinggangshan Jiangxi 343009, China)

Abstract: Concerning the faults of local extremum in image registration based on mutual information, a new medical image registration method based on Powell and improved genetic algorithm was proposed in this paper. It put forward an improved method regarding the shortcomings of the standard genetic algorithm, such as slow convergence and prematurity that will result in artifacts, and generated the iteration individual by Logistic chaos map. This method utilized the multi-resolution analysis strategy and searched for the optimal of the objective function by this hybrid optimized algorithm in the lowest resolution image level. Then it continued the optimization course and accomplished the image registration by this optimal data with the Powell algorithm. The experimental results indicate that this algorithm can effectively improve the image registration velocity and avoid local extremum of the operator while getting better performance of image precision in contrast to the Powell algorithm and unimproved genetic algorithm.

Key words: mutual information; Powell algorithm; improved genetic algorithm; medical image registration; Logistic chaos map

0 引言

当前, 快速发展的医学成像技术可为临床提供大量的实用解剖及功能方面的影像数据; 在临床医学中, 单一模态的图像往往不能提供医生所需的足够信息, 通常需要配准并融合多模态图像以得到更为丰富的信息, 从而帮助医生了解病变组织或器官的情况, 为临床诊断和手术治疗提供更全面、更准确的信息^[1]。医学图像配准^[2-3]主要目的是寻找两幅图像间的对应关系, 是进行图像融合的前提, 也是目前医学图像处理领域中的一个研究热点。

目前, 医学图像配准中使用较多的优化算法^[4-7]主要有单纯形法、Powell 法、模拟退火算法和遗传算法。这些优化算法各有优点和不足之处: 单纯形法和 Powell 法都不需要计算导数, 但单纯形法收敛速度过慢; 而 Powell 法在配准过程中又极易陷入局部极值无法跳出, 从而导致图像的误配; 模拟退火算法能够跳出局部最优, 但计算时间较长, 且有时会进入错误

的搜索方向而不能得到最优解; 遗传算法是基于进化论的原理发展起来的一种高效的随机搜索算法, 它具有的鲁棒性和隐含并行性的特性使得其能够有效地按照概率进行全局搜索, 从而可以克服局部极值并获得全局最优解, 然而遗传算法的随机性使得其收敛速度较慢, 迭代过程中容易出现早熟。因此, 在选择优化搜索策略时需要考虑如何避免局部极值和加快搜索收敛速度。本文以互信息为配准测度, 对标准遗传算法提出了改进的方法, 采用 Powell 与改进遗传算法结合的混合优化方法作为搜索策略进行寻优, 准确地实现了医学图像的配准。

1 Powell 局部优化算法

作为医学图像配准中常用的一种多参数局部最优化配准搜索算法, Powell 算法虽具有较快的搜索速度, 但容易受到局部极值的影响, 其优化效果的关键在于初始点的选择。当参数的导数不易计算时, Powell 多方向集算法^[8-10]是一种常用

收稿日期: 2012-09-14; 修回日期: 2012-12-14。 基金项目: 国家 863 计划项目(2010AA122200)。

作者简介: 李超(1979-), 男, 安徽合肥人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实、图形图像处理; 李光耀(1965-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 大规模城市建模与仿真、图形图像处理; 谭云兰(1972-), 女, 江西新干人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 图像处理; 徐祥龙(1988-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地形建模与仿真、图形图像处理。

的算法。应用多方向集的概念,可以把求多元函数的极值问题简化为一维极值问题。

Powell 方法把优化过程分为若干阶段,每一轮迭代由 $n+1$ 次一维搜索组成。在算法的每次迭代过程中,先依次沿着已知的 n 个方向搜索,得到一个最好位置。然后沿本次迭代的初始点与该最好点连线的方向进行搜索,求得这一阶段的最好点,再用最后的搜索方向取代前 n 个方向之一,开始下一个阶段的迭代。

Powell 方法的具体构造过程如下:

- 1) 首先将方向集 C 初始化为坐标轴的单位向量: $c_i = e$ ($i = 1, 2, \dots, N$);
- 2) 然后重复 3) ~ 6), 直至函数值不再减小;
- 3) 记录初始位置 P_0 ;
- 4) 对 $i = 1, 2, \dots, N$, 将 P_{i-1} 移至目标函数沿 c_i 方向的极小值位置, 并记此点为 P_i ;
- 5) 对 $i = 1, 2, \dots, N$, 将 c_{i+1} 赋给 c_i , 并置 $c_N = P_N - P_0$;
- 6) 将 P_N 移至目标函数在 c_N 方向上的极小值点, 并记录此点为 P_0 。

2 改进的遗传算法

全局优化算法主要有模拟退火算法^[11-14]、粒子群算法^[15-17]和遗传算法^[18-20]等。作为全局优化算法中的一种典型算法,遗传算法相对于局部优化算法,整体搜索能力更强,但算法更复杂、更耗时。

2.1 标准遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)起源于20世纪60年代对自然和人工自适应系统的研究^[21],最早由美国密执安大学的Holland教授提出。遗传算法是生命科学与工程科学相互交叉、渗透的产物,是一种可有效解决最优化问题的方法。遗传算法将繁殖、杂交、变异、竞争和选择等概念引入到算法中,通过维持一组可行解,并重新组合可行解,改进可行解在多维空间内的移动轨迹或趋势,最终趋向最优解。作为一种全局优化算法^[22],它克服了传统优化方法容易陷入局部极值的缺点。

标准遗传算法^[23]通常包括以下五个组成部分:

- 1) 问题的解的遗传表示;
- 2) 创建解的初始种群的方法;
- 3) 根据个体适应度对其进行优劣判定的评价函数;
- 4) 用来改变复制过程中产生的子个体遗传组成的遗传算子;
- 5) 遗传算法的参数值。

2.2 改进的遗传算法

标准遗传算法的并行性可以避免搜索陷入局部极值,但是易过早收敛。为此本文对标准遗传算法作了改进,改进后的遗传算法增设了基池和记忆池,其迭代过程如图1所示。

算法改进之处主要包括如下三个方面:

1) 编码方式。常用的编码方式是固定长度的二进制编码,在算法开始执行前需将十进制编码转换为二进制编码,在算法执行结束后又需将结果从二进制解码为十进制,降低了搜索效率^[24-25]。改进后的算法在图像配准过程中,每个个体表示一个变换中待确定的参数,变换参数采用实数编码,个体的长度等于待确定参数的个数,这样可有效提高搜索效率。

2) 适应度的表示。这里采用基于局部频率信息和区域

信息相结合的双向配准度量作为变换优劣的评价标准,以该相似性测度作为适应度函数来指导参数搜索方向。

3) 对迭代过程的改进。为解决标准遗传算法的过早收敛问题,通过增设基池和记忆池对算法的迭代过程进行了改进。基池中个体不断地用新产生的个体替换适应度较低的个体,将每次迭代过程中基池中适应度高的个体更新记忆池,使记忆池中保存的是适应度排在前面的个体及相应的参数。这样在算法结束时,记忆池中排在最前面的个体对应的参数即为搜索过程中得到的最优参数。

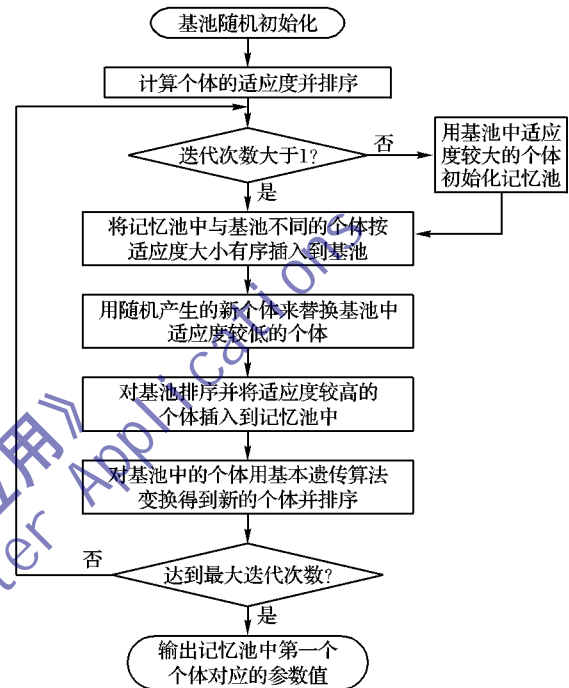


图1 本文改进遗传算法的迭代流程

3 Logistic 混沌映射

在使用优化算法进行寻优过程中,需要通过随机生成函数生成搜索过程中的随机个体,个体生成的快慢以及是否具有良好随机性将直接决定优化搜索的精度和速度。在传统的优化搜索方法中,通常使用 $\text{randomize}()$ 或 $\text{rand}()$ 随机函数生成新个体;而 Logistic 映射函数具有混沌特性^[26],用该函数生成的随机个体具有可再现性和可控性,且个体的生成速度比 $\text{rand}()$ 函数快。为提高搜索速度和精度,本文使用 Logistic 混沌映射生成随机个体。

3.1 Logistic 映射的性质

Logistic 映射是一类用迭代方程表达的简单却被广泛研究的混沌动力系统^[27],它具有非线性动力系统的特性,通过不断地倍周期分叉产生混沌现象,是混沌研究中的热点和焦点之一;随着理论研究的不断深入,其在实际生活中的应用也在不断扩展。Logistic 映射的方程^[28-29]为:

$$f(\lambda, X_k) = X_{k+1} = \lambda(1 - X_k)X_k; k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中: $X_k \in (0, 1)$, $\lambda \in [0, 4]$ 。

Logistic 映射通过倍周期分叉进入混沌,随着 λ 值增大,Logistic 映射依次呈现出不动点→分叉(周期2, 周期4, ...)→阵发混沌→混沌带,在 λ 值 $\in [3.571448 \dots, 4]$ 期间还包含着奇数周期和不动点轨道。当 $\lambda_m \approx 3.57 < \lambda \leq 4$ 时,Logistic 映射进入混沌区域;并且当 $\lambda = 4$ 时其轨迹混沌特性

表现的最为明显,相应的函数轨迹区间特性如图2所示。

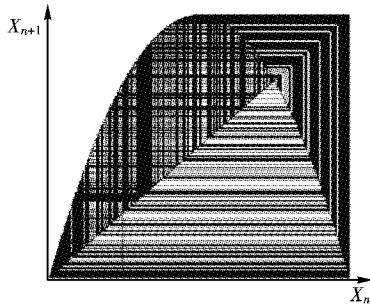


图2 $\lambda = 4$ 时的轨迹

3.2 Logistic 随机数生成算法

由于在 $\lambda = 4$ 时轨道的混沌特性表现的最为明显,因此本文采用 $\lambda = 4$ 时的 Logistic 映射来产生混沌随机序列。

该函数描述如下:选择一个初始混沌序列种子,在第一次调用前,将其中的标志 flag 置为 0;利用 Logistic 方程迭代 10 次之后作为混沌序列的输出,同时将 flag 重置为 1;然后再调用该函数迭代 5 次后作为混沌序列的输出。

本文选取的混沌序列发生器种子设定为不在 20 周期内的平凡不动点序列内的数 $seed = 0.40$ 。该混沌随机序列的产生函数描述如下:

```
double Chaos( double seed)
{
    int i;
    double t;
    Static int flag, double t1;
    if (flag == 0)
    {
        t = seed;
        for (i = 0; i < 10; i++)
            t = 4 * t * (1 - t);
        flag = 1; t1 = t;
    }
    else
    {
        t = t1;
        for (i = 0; i < 5; i++)
            t = 4 * t * (1 - t);
        t1 = t;
    }
    return t;
}
```

鉴于用 rand() 等函数生成的随机数的不可再现性,本文采用上述混沌随机数生成函数生成优化搜索过程中的个体,由此产生的随机个体具有可再现性和可控性。

4 本文的混合优化算法

本文在最低分辨率层采用 Powell 算法与改进遗传算法相结合的混合优化算法进行寻优,该算法的主要步骤如下:

- 1) 设置基池的大小、记忆池的大小、个体的活动范围、交叉概率、变异概率和算法的最大迭代次数 N , 定义初始变量 $i = 0$, 并用 Logistic 映射随机生成一个初始解 S_0 ;
- 2) 以 S_0 为初始值,运用 Powell 法进行搜索,得到一个局部最优解 S_1 及相应的互信息值 I_1 ;
- 3) 以 S_1 为中心,运用 Logistic 映射生成的随机数填充基池,利用改进的遗传算法得到一个解 S_2 及相应的互信息值 I_2 , $i = i + 1$;
- 4) 若 $I_1 > I_2$, 则令 $S_2 = S_1$;
- 5) 判断 S_2 是否满足精度要求,若满足,则转 7);
- 6) 判断 $i < N$ 是否成立,若成立,则令 $S_0 = S_2$ 后转 2);

7) 算法结束,输出搜索结果 S_2 。

在近似配准结果的尺度变换方面,两幅图像的伸缩、旋转和平移配准问题可以分别转化为对其作小波分解后的两幅图像近似分量的伸缩、旋转和平移配准问题。两幅图像配准时的平移量若为 $(2x, 2y)$, 则它们小波分解后的两幅图像近似分量的平移为 (x, y) , 而旋转角度保持不变。基于上述原理,将待配准的两幅图像进行三层小波分解,先对最低分辨率层的图像进行配准,然后利用配准的结果来确定前一层的搜索范围,在该限定范围内进行高分辨率层图像的配准,从而有效减少了计算量。

由于多分辨率小波分解的过程本身也是一个图像平移的过程,能够避免陷入局部极值,因此设计算法时,可在最低分辨率层图像采用混合优化方法,而在接下来的较高分辨率层图像中仅采用 Powell 算法。

小波变换和混合优化方法运用于图像配准的步骤如下:

- 1) 将参考图像 A 和待配准图像 B 分别进行三级小波分解,每一层均取近似分量,结果分别为 A_i 和 B_i ($1 \leq i \leq 3$), i 越大表示分解层次越高、分辨率越高,设定变量 i 的初始值为 3;
- 2) 对小波分解的结果 A_i 和 B_i 采用混合优化算法进行优化,得到配准结果 $[x_i, y_i, \theta_i]$;
- 3) 若 $i \geq 1$, 则反复执行以下操作:对于 A_{i-1} 和 B_{i-1} , 设定搜索范围为 $[2x_i - 10, 2x_i + 10]$, $[2y_i - 10, 2y_i + 10]$ 和 $[\theta_i - 10, \theta_i + 10]$, 用 Powell 算法进行迭代, 得到结果为 $[x_{i-1}, y_{i-1}, \theta_{i-1}]$, $i = i - 1$;
- 4) 输出配准结果。

5 实验与分析

为验证本文方法进行配准的性能,在实验过程中分别对单模和多模医学图像进行了配准。将图像进行三级小波分解后,首先用 Logistic 映射得到一个初始变换参数,在相同的初始位置条件下,在图像小波分解的最低分辨率层分别使用纯 Powell 算法、Powell 与标准遗传算法混合、本文的混合优化方法;然后在其他分辨率层则采用纯 Powell 方法进行优化搜索;并与未对图像进行小波分解而直接使用 Powell 算法寻优的方法进行配准实验,实验过程中所用的随机数由 Logistic 函数生成。

实验中,设定最低分辨率层的混合优化算法的最大迭代次数为 3, 个体的交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.2, 个体的数目为 30, 并设置基池和记忆池的大小分别为 30 和 15。

5.1 图像三层小波分解

小波影像金字塔完全保存了影像的高频和低频信息,有效避免了由于分块而造成的极值点偏移。在金字塔的最高层面上整体配准时,可有效减少运算量,同时细节对总体信息提取时的干扰也会大大降低。在分辨率逐步降低的过程中,噪声能量也将减少,从而能够有效避免陷入局部极值的情况。图3显示了对一幅 MRI 图像进行三层小波分解后,各个分辨率下的近似结果。

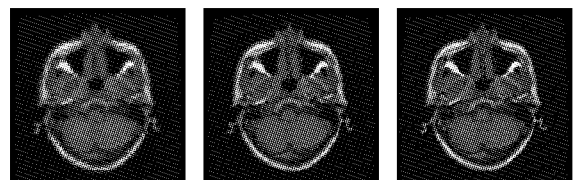


图3 图像三层小波分解的近似量

从图3可看出,经小波分解后的图像能够保持原始图像的大部分信息。

5.2 单模图像的配准

这里选取同一个人在不同时刻扫描得到的两幅图像进行配准实验。实验所用图像如图4所示,表1~2为相应的实验结果。

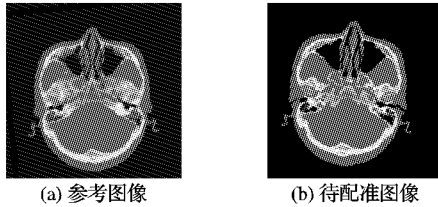


图4 同一个人的两幅CT图像

表1 单模图像配准中各算法的比较

算法	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息	时间/s
未使用小波分解的 Powell	4.664 1	4.365 4	5.223 5	1.486 6	134.72
Powell 算法	3.367 1	2.092 3	5.391 4	1.487 3	82.76
Powell 与标准遗传算法混合	2.580 8	1.551 3	5.282 1	1.489 1	115.02
本文方法	3.310 6	2.084 8	5.251 8	1.489 8	90.48

表2 单模图像配准中混合算法和本文方法的比较

层数	Powell 与标准遗传算法的混合算法			
	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息
3	0.760 7	0.163 9	3.748 2	1.537 4
2	1.145 3	3.984 9	5.282 1	1.500 1
1	2.775 8	2.290 4	4.718 1	1.487 7
0	2.580 8	1.551 5	5.282 1	1.488 8
层数	本文方法			
	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息
3	0.693 8	0.072 5	3.710 1	1.539 3
2	1.327 5	0.521 1	5.251 9	1.500 8
1	3.042 3	1.655 1	4.748 2	1.488 7
0	3.310 4	2.084 8	5.251 9	1.489 7

5.3 多模图像的配准

本文选取同一个人的MRI图像和CT图像来进行配准实验。所用图像如图5所示,图像的分辨率为 512×512 ,实验结果如表3~4所示。

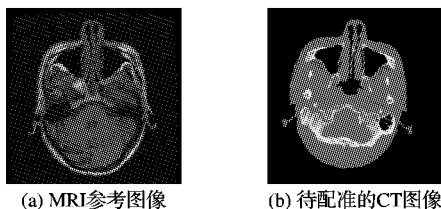


图5 同一个人的MRI和CT图像

表3 多模图像配准中各算法的比较

算法	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息	时间/s
未使用小波分解的 Powell	6.664 1	12.365 7	4.225 7	1.100 5	217.78
Powell 算法	2.668 3	7.443 6	5.242 7	1.126 9	123.07
Powell 与标准遗传算法混合	3.008 2	7.003 7	5.093 9	1.127 5	159.53
本文方法	2.941 8	6.654 7	4.927 1	1.127 8	134.81

表4 多模图像配准中混合算法和本文方法的比较

层数	Powell 与标准遗传算法的混合算法			
	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息
3	2.000 1	-0.342 9	4.075 8	1.473 6
2	1.102 9	3.984 9	5.919 1	1.181 3
1	2.969 7	8.025 9	6.080 9	1.126 8
0	3.008 2	7.003 7	5.093 9	1.127 4
层数	本文方法			
	X/像素	Y/像素	$\theta/(^{\circ})$	互信息
3	1.992 5	0.006 6	4.080 1	1.475 3
2	1.000 1	4.000 1	5.924 2	1.181 7
1	3.000 1	8.000 2	6.075 9	1.126 9
0	2.941 8	6.654 7	4.927 1	1.127 8

5.4 实验结果分析

由表1和表3可以看出,相对于直接在原始图像上运用 Powell 算法进行搜索的方法,采用对图像先进行小波分解再在其近似分量上运用 Powell 算法进行优化搜索的方法,可大大缩短局部寻优的时间,并能得到更为有效的近似解;由表2和表4可知,Powell 方法的配准精度最低,而本文方法的配准精度最高,采用全局和局部优化算法相结合的搜索策略可集成两者的优势,可在一定程度上提高配准精度。本文方法能够实现较精确的医学图像配准,相对于 Powell 方法和未改进的遗传算法,不仅在小波分解后各层图像上的配准精度均有所提高,且可有效缩短寻优时间。

6 结语

针对互信息作为图像相似度的判别方法容易陷入局部极值和运算量大的缺点,同时考虑到最低分辨率下获得的参数对后续搜索过程的指导作用,本文提出了一种新的基于 Powell 算法与改进遗传算法相结合的医学图像配准方法。该方法针对标准遗传算法存在的收敛速度慢、易早熟、有可能导致误配的缺陷,提出了相应的改进策略:采用 Logistic 混沌映射生成迭代过程中的个体,并运用基于小波变换的多分辨率分析策略,在图像不同分辨率层采用不同方法来进行优化搜索。

通过对单模和多模医学图像配准仿真实验,结果表明,相对于 Powell 方法和未改进的遗传算法,本文提出的混合优化方法能够实现较精确的医学图像配准,且可有效缩短寻优时间。

参考文献:

- [1] 郑莹,李光耀. 基于区域互信息和局部频率信息的双向医学图像配准[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(1): 90-96.
- [2] 张汗灵,杨帆. 基于互信息和混合优化算法的多模医学图像配准[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(1): 117-120.
- [3] 杨日容. 基于遗传算法及最大互信息的医学图像配准研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005: 10-16.
- [4] 刘斌,彭嘉雄. 图像配准的小波分解方法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2003, 15(3): 1070-1073.
- [5] PARADLOS P M, SHALOWAY D, XUE G L. Optimization methods for computing global minima of nonconvex potential energy functions[J]. Journal of Global Optimization, 1994, 4(1): 17-133.
- [6] NELDER J A, MEAD R. A simplex method for function minimization[J]. The Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.
- [7] WILKINSON B, ALLEN M. Parallel programming techniques and applications using networked workstations and parallel computers[M]. 影印版. 北京: 机械工业出版社, 2002: 45-56.

- [8] 袁伟, 时公涛, 蒋咏梅. 一种基于 ROEWA 算子和 GA-Powell 算法的 SAR 图像配准方法[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 190-193.
- [9] DING H, BIAN Z H. A sub-pixel registration approach based on powell algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 46-49.
- [10] 刘叶青, 刘三阳, 谷明涛. Powell 算法在线性支持向量机中的应用[J]. 计算机工程, 2011, 37(12): 161-163.
- [11] INGBER L. Very fast simulated re-annealing[J]. Mathematical and Computer Modeling, 1989, 12(8): 967-973.
- [12] ARTS E, KORST J. Simulated annealing and boltzmann machine [M]. New York: John Wiley & Sons, 1989: 23-36.
- [13] DEKKERS A, ARTS E. Global optimization and simulated annealing[J]. Mathematical Programming, 1991, 50(3): 367-393.
- [14] 江军, 於文雪, 舒华忠. 鲍威尔和模拟退火优化算法结合的多分辨率三维图像配准[J]. 生物医学工程研究, 2004, 23(3): 175-177.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995, 4: 1942-1948.
- [16] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Micromachine and Human Science. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995, 10: 39-43.
- [17] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]// IEEE World Congress on Computational Intelligence. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998, 1: 69-73.
- [18] de JONG K A. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1975: 23-42.
- [19] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Upper Saddle River: Addison Wesley, 1989: 67-88.
- [20] BACK T. The interaction of mutation rate, selection and self-adaptation within a genetic algorithm[C]// Proceedings of the 2nd Conference on Parallel Problem Solving from Nature. North-Holland: Elsevier, 1992: 82-94.
- [21] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 37-64.
- [22] DAVIS L. Handbook of genetic algorithms[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991: 21-45.
- [23] MENG F L, WU S X. Research of genetic algorithm in function optimizer based on HCI[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008, 1: 1049-1052.
- [24] MEHMET C, OZSAGIAM M Y. A comparative study on particle swarm optimization and genetic algorithms for traveling salesman problems[J]. Cybernetics and Systems, 2009, 40(6): 490-507.
- [25] NASER Z, JAN K S, AIOTHMAN A K. Real coded genetic algorithm compared to the classical method of fast Fourier transformation harmonics analysis[C]// Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, 3: 1021-1025.
- [26] 盛昭瀚, 马军海. 非线性动力系统分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 19-33.
- [27] 王兴元. 复杂非线性系统中的混沌[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 26-37.
- [28] SAKAGUCHI H, TOMITA K. Bifurcation of the couple logistic map[J]. Progress of Theoretical Physics, 1987, 78(2): 305-309.
- [29] 赵德平, 彭鹏. 广义 Mandelbrot 集和 Logistic 映射在图像压缩中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2008, 24(4): 694-698.

(上接第 617 页)

- [4] HO J, ENGELS D W, SARMA S E. HiQ: a hierarchical q-learning algorithm to solve the reader collision problem[C]// Proceedings of International Symposium on Applications and the Interact Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 23-27.
- [5] HWANG K I, KIM K T, EOM D S. DiCA: Distributed tag access with collision avoidance among mobile RFID readers [C]// Proceedings of EUC 2006 Workshops: NCUS, SecUbiq, USN, TRUST, ESO, and MSA. Berlin: Springer, 2006: 413-422.
- [6] EPCglobal. EPC radio-frequency identity protocols class-1 generation-2 UHF RFID protocol for communications at 860MHz - 960MHz, Version 1. 2. 0 [EB/OL]. [2012-07-10]. http://www.gs1.org/gsm/kc/epcglobal/uhf1g2/uhf1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf.
- [7] European telecommunications standards institute. Final draft ETSI EN 302 208-2 V1. 4. 1 [EB/OL]. [2012-07-10]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30220802/01.04.01_40/en_30220802v010401o.pdf.
- [8] 田景贺, 范玉顺, 朱云龙, 等. RFID 读写器防冲突问题的混沌神经网络建模与求解[J]. 高技术通讯, 2008, 18(8): 811-816.
- [9] 梁嘉. RFID 读写器管理与协调技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [10] 陈颖, 张福洪. RFID 传感网络中多阅读器碰撞算法的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 265-268.
- [11] 白煜. 超高频射频识别(UHF RFID)系统抗干扰策略的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [12] LEONG K S, NG M L, COLE P H. The reader collision problem in RFID systems[C]// 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 658-661.
- [13] 孙洪民. 第三代移动通信系统中功率控制与网络优化的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2009.
- [14] 吕玲. 第三代移动通信系统中功率控制和系统容量的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [15] 王亚军, 宋杰, 王传安. Ad Hoc 网络退避算法研究与仿真[J]. 科技信息, 2012(9): 33-34.
- [16] YU J, LEE W, DU D Z. Reducing reader collision for mobile RFID[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(2): 574-582.
- [17] CHEN H Y, BAE S, BHADKAMKAR A, et al. Coupling passive sensors to UHF RFID tag[C]// Proceedings of 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 255-258.
- [18] 徐磊, 方红雨, 李晓辉. 基于对数函数的 Ad Hoc 网络 MAC 退避算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(1): 18-24.
- [19] 张力锴, 吴黎明, 李怡凡, 等. 新型 RFID 交通卡的设计与实现[J]. 科技通报, 2010, 26(2): 265-268.
- [20] 王永华, 杨健, 詹宜巨, 等. RFID 网络读写器冲突避免 MAC 协议[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(3): 388-391.
- [21] 王建伟, 王东, KORHONEN T O, 等. 一种新的 RFID 传感网络中多阅读器防碰撞协议[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1411-1416.
- [22] 陈泰伟, 吴黎明, 吴学文, 等. 一种基于图论的 RFID 防冲突建模与优化方法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(1): 155-158.
- [23] 袁超文. RFID 读写器网络防冲突技术研究 with 开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.