

一种基于粒子群算法的色彩量化方案

沙秋夫¹⁾ 刘向东^{1),2)} 何希勤¹⁾ 焉德军²⁾

¹⁾(鞍山科技大学理学院, 鞍山 114004) ²⁾(大连民族学院非线性信息技术研究所, 大连 116600)

摘要 为提高色彩量化算法的效率,基于求解实优化问题时粒子群算法优于遗传算法这一事实,在基于遗传算法的色彩量化算法的基础上,设计了相应的适应度函数,给出了一种基于粒子群算法的色彩量化方案,并通过量化实例对算法的性能进行了比较。实验结果显示,基于粒子群优化算法的色彩量化方法在收敛速度方面明显优于基于遗传算法的色彩量化方法。

关键词 粒子群优化算法 色彩量化 K-均值算法

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)09-1544-05

Color Image Quantization Using Particle Swarm Optimization

SA Qiu-fu¹⁾, LIU Xiang-dong^{1),2)}, HE Xi-qin¹⁾, YAN De-jun²⁾

¹⁾(Faculty of Science, Anshan University of Science and Technology, Anshan 114044)

²⁾(The Research Institute of Nonlinear Information Technology, Dalian Nationalities University, Dalian 116600)

Abstract It is proved by experiments that the particle swarm optimization is superior to the genetic algorithm in solving the problems of real optimization. In order to enhance the efficiency of the color image quantification algorithm, in this paper, the corresponding fitness function is designed, and a kind of particle swarm optimization color image quantization method is provided on the basis of the genetic algorithm color image quantization method. The comparison of the performance of two kind of quantification method has been carried on through the examples. The experimental result shows that the particle swarm optimization color image quantization method is obviously superior to the genetic algorithm color image quantization method since it has higher convergence rate.

Keywords particle swarm optimization, color quantization, K-means algorithm

1 引言

色彩量化是图像处理最常用的操作之一。它是在尽量减少图像处理前后差别的前提下,把全色彩的图像映射到只有少数几种颜色的图像上,通过减少所用颜色的数量减小图像数据的存储空间^[1,2]。

色彩量化的核心是量化码本,高质量的码本设计是改善量化性能的关键。目前,色彩量化的方法主要有均匀量化和自适应量化两类。均匀量化采用色彩分布均匀的调色板,且对任何图像都保持不变。这种量化方法简单,但对彩色图像压缩效率不高,常应用

在对存储要求不高的场合。自适应量化根据不同的图像选择不同的调色板,以使所有图像都有理想的结果和较高的压缩效率,经常应用在较少比特位量化的场合。自适应量化的方法很多,如文献[1]所述的统一量化算法、频度序列算法、中位切割算法等,其中借鉴模式识别中聚类分析的量化方法是一种常用的量化方法。基于聚类的量化算法量化质量高,但算法时空复杂度高,且处理效果不稳定。在实际应用过程中人们发现,基于聚类的量化方法与初始码本的选择有关,存在可能产生空胞腔及难于避开局部最优解等问题,从而可能得不到最优的码本^[3-5]。鉴于此,许多学者提出了基于遗传算法的色彩量化编码方法^[6-8]。

基金项目:国家自然科学基金项目(60573124);辽宁省自然科学基金项目(20040948);辽宁省教育厅高等学校科学研究项目(2004P039)

收稿日期:2006-03-21; 改回日期:2006-06-21

第一作者简介:沙秋夫(1959-),副教授。2005年于东北大学理学院获应用数学专业硕士学位。研究方向为人工智能与统计学习方法等。E-mail: liuxd@dlu.edu.cn

这种方法在聚类量化算法的基础上,使用遗传算法进行聚类划分的优化。研究者发现,基于遗传算法的量化算法不需要关于量化图像的先验知识,也较少受初始码本的影响而得到次优解。

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是 1995 年由 Kennedy 和 Eberhart 在鸟群、鱼群和人类社会的行为规律的启发下提出的一种基于群智能的演化计算技术^[9]。由于算法收敛速度快、需要设置及调整的参数少、实现简洁而受到学术界的广泛关注。现在,粒子群算法已经在函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他工程领域得到广泛地应用。大量实验已经证实,对求解实优化问题,粒子群算法较遗传算法收敛效率高、速度快^[10],为此,本文提出了基于粒子群的图像量化方案,并对算法进行了实验分析,与基于遗传算法的色彩量化算法进行了对比。结果表明,基于粒子群算法的色彩量化方法较基于遗传算法的色彩量化方法量化质量基本一致,但收敛速度快。

2 图像色彩量化的最优化描述

色彩量化面临的问题是如何利用有限色彩,尽可能再现原图像的色彩效果。其问题实质是在只有有限颜色数的调色板上,如何选择颜色代表值设置彩色调色板,以便利用它最好地显示一幅颜色数超

$$d(A, B) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{(A_R(m, n) - B_R(m, n))^2 + (A_C(m, n) - B_C(m, n))^2 + (A_B(m, n) - B_B(m, n))^2} \quad (3)$$

对颜色数为 K 的调色板,色彩量化即对彩色图像 $A(m, n)$, 寻找 K 个固定颜色 $(C_{1R}, C_{1C}, C_{1B}), (C_{2R}, C_{2C}, C_{2B}), \dots, (C_{KR}, C_{KC}, C_{KB})$, 其中 $0 \leq C_{jR}, C_{jC}, C_{jB} \leq 1$, 使得对如下定义取值有限的彩色图像

$$B(m, n) = (C_{iR}, C_{iC}, C_{iB}) \quad (4)$$

$$1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$$

其中, (C_{iR}, C_{iC}, C_{iB}) 使得

$$\sqrt{(A_R(m, n) - C_{jR})^2 + (A_C(m, n) - C_{jC})^2 + (A_B(m, n) - C_{jB})^2}$$

取值最小, $1 \leq j \leq K$, 使 $d(A, B)$ 达到最小。

3 基于粒子群的色彩量化算法

3.1 粒子群算法

粒子群算法采用速度-位置搜索模型。粒子群由若干粒子组成,每个粒子的位置 $z_i(t)$ 代表问题在搜索空间的候选解,解的优劣程度由适应度函数 F

过调色板颜色数的图像。数学上这一过程可以表述为如下的优化问题。

将源彩色图像记作

$$f(x, y) = \{f_R(x, y), f_C(x, y), f_B(x, y)\},$$

其中 $0 \leq f_R(x, y), f_C(x, y), f_B(x, y) \leq 1$, $f_R(x, y), f_C(x, y), f_B(x, y)$ 的定义域为 $I^2 = \{(x, y): 0 \leq x, y \leq 1\}$ 。这样 2 幅彩色图像 f, g 的误差可以通过 $d(f, g)$ 的大小来衡量。其中,

$$d(f, g) = \iint_{I^2} \sqrt{(f_R - g_R)^2 + (f_C - g_C)^2 + (f_B - g_B)^2} dx dy \quad (1)$$

设调色板颜色数为 K, K 为常数,色彩量化即对彩色图像 $f(x, y)$, 寻找 K 个固定颜色 $(C_{1R}, C_{1C}, C_{1B}), (C_{2R}, C_{2C}, C_{2B}), \dots, (C_{KR}, C_{KC}, C_{KB})$, 其中 $0 \leq C_{jR}, C_{jC}, C_{jB} \leq 1$, 使得对如下定义取值有限的彩色图像

$$g(x, y) = (C_{iR}, C_{iC}, C_{iB}) \quad 0 \leq x, y \leq 1 \quad (2)$$

其中, (C_{iR}, C_{iC}, C_{iB}) 使得

$$\sqrt{(f_R(x, y) - C_{jR})^2 + (f_C(x, y) - C_{jC})^2 + (f_B(x, y) - C_{jB})^2}$$

取值最小, $1 \leq j \leq K$, 使 $d(f, g)$ 达到最小。

在实际应用中,常采用离散像素图像模型。这时彩色图像可以记作

$$A(m, n) = \{A_R(m, n), A_C(m, n), A_B(m, n)\}$$

其中 $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N, M, N$ 为图像的大小, $A_R(m, n), A_C(m, n), A_B(m, n)$ 为 $M \times N$ 阶实矩阵。此时, 2 幅彩色图像 A, B 的误差可以通过下式衡量:

决定。

每一次迭代,粒子通过动态跟踪两个极值来更新其速度 $v_i(t)$ 和位置 $z_i(t)$ 。一个是粒子从初始到当前迭代次数搜索产生的最优解:个体极值 $p_i(t)$, 一个是粒子群目前的最优解:全局极值 $g(t)$ 。其中,

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & F(z_i(t+1)) \geq F(p_i(t)) \\ z_i(t+1) & F(z_i(t+1)) < F(p_i(t)) \end{cases} \quad (5)$$

$$g(t+1) = \min\{p_i(t+1), \text{对一切 } i\} \quad (6)$$

每个粒子根据以下公式更新其速度和位置^[8]:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1(t) (p_i(t) - z_i(t)) + c_2 r_2(t) (g(t) - z_i(t)) \quad (7)$$

$$z_i(t+1) = z_i(t) + v_i(t+1) \quad (8)$$

其中, $\omega \geq 0$ 称为惯性因子,较大的 ω 有利于跳出局部极小点,而较小的 ω 有利于算法收敛; c_1 和 c_2 是

非负常数,称为学习因子,一般取 $c_1 = c_2 = 2^{(9)}$; $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 是均匀分布在 $(0, 1)$ 区间的随机数。为防止粒子飞行速度过大导致算法过早收敛到局部最优解,算法一般根据问题人为设定常数 $V_{max} > 0$, 通过阈值截取强制 $v_i(t)$ 的每个分量绝对值不超过 V_{max} 。设置较大的 V_{max} 可以保证粒子群的全局搜索能力,较小的 V_{max} 则使粒子群的局部搜索能力加强。粒子群算法通过粒子在解空间内不断跟踪个体极值与全局极值进行搜索,直到达到规定的迭代次数或满足规定的误差标准为止。

3.2 基于粒子群的色彩量化算法

我们采用离散图像模型描述基于粒子群算法的色彩量化算法。记彩色图像为 $A(m, n)$, 其中 $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ 。每个粒子代表调色板的 K 个色彩。这样,每个粒子 $z_i = ((C_{1R}^{(i)}, C_{1G}^{(i)}, C_{1B}^{(i)}), (C_{2R}^{(i)}, C_{2G}^{(i)}, C_{2B}^{(i)}), \dots, (C_{KR}^{(i)}, C_{KG}^{(i)}, C_{KB}^{(i)}))$, 其中 $0 \leq C_{Rj}^{(i)}, C_{Gj}^{(i)}, C_{Bj}^{(i)} \leq 1$, 代表第 i 个粒子的第 j 个色彩向量。粒子群由若干候选调色板方案构成。对调色板方案优劣进行评价采用第 2 部分中描述的方式:通过计算 $A(m, n)$

与由粒子 z_i 构造的 $B(m, n)$ 的距离得到。

基于粒子群的色彩量化算法步骤如下:

① 通过在颜色空间随机选取 K 个色彩初始化每个粒子的位置 $z_i(t)$ 组成初始调色板,再通过在颜色空间随机选取 K 个色彩初始化每个粒子的速度向量。

② 从 $t=1$ 到最大迭代次数,进行如下循环。

(i) 对每个粒子 $z_i(t)$, 利用式(4)计算待量化图像 A 在粒子 $z_i(t)$ 对应的调色板量化后的图像 B ;

(ii) 利用公式(3)计算 $d(A, B)$, 即粒子的适应度 $F(z_i(t))$;

(iii) 计算粒子的个体最优与群最优;

(iv) 通过粒子群优化算法的速度 $v_i(t)$ 和位置 $z_i(t)$ 更新式(7)和(8)对粒子状态进行更新。

4 实验结果和讨论

通过 256×256 大小的真彩色图像(图 1)的色彩量化来比较基于粒子群算法和基于遗传算法的色彩量化算法的性能。



(a) Peppers 原始图像(256 × 256 真彩色)



(b) Baboon 原始图像(256 × 256 真彩色)

图 1 进行色彩量化比较测试的图像

Fig. 1 The testing images for color quantification comparison

将图 1(a)、(b)图像量化为 64 色的彩色图像。对 2 类算法参数作常规选取。基于遗传算法的量化采用的参数如下:种群大小取为 100,交叉概率 0.8,变异概率 0.1。基于粒子群算法的量化采用的参数如下:粒子个数取为 100,惯性因子取 $\omega = 0.72$,学习因子取 $c_1 = c_2 = 1.49$,速度阈值取 $V_{max} = 0.4$ 。我们做了量化失真度和量化处理时间的测试,并与均匀量化算法的处理结果做比较,所得结果如图 2,图 3 及表 1~4 所示。

可以看出,基于粒子群量化的结果明显优于均匀

量化的结果,其色彩失真小,并保留了更丰富的色彩层次。其量化结果的误差对比表 1 也说明了这一点。表 1 中量化误差为 R、G、B 3 个分量误差的和。

表 2、表 3 和表 4 分别列出了基于遗传算法量化和基于粒子群量化对 Peppers 的量化结果,为了比较方便,表 2 为两类算法均迭代 50 代的结果对比,表 3 为两类算法均迭代 100 代的结果对比,表 4 为两类算法均迭代 500 代的结果对比。由于 2 类算法均是随机算法,每次比较均运行 50 次,记录最小误差、最大误差和平均误差。

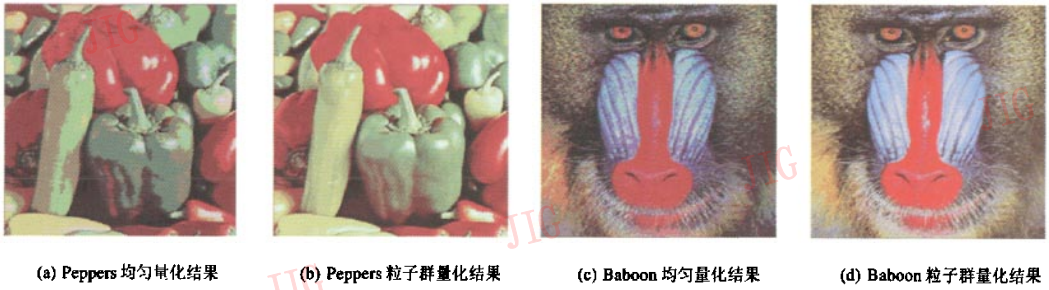


图 2 色彩量化后图像的比较

Fig. 2 Images after color quantification by uniform quantification method and PSO

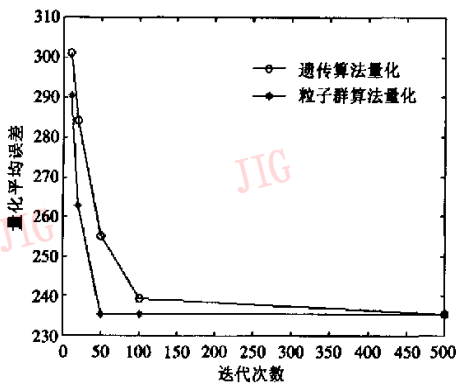


图 3 两类算法迭代次数与量化平均误差的对比

Fig. 3 Plots on the number of iteration and quantification error of two kind of color quantification method

表 1 色彩量化后图像的误差比较

Tab. 1 Comparison of color quantization processing for two images

	Peppers 量化误差	Baboon 量化误差
均匀量化	1.4940×10^4	1.5741×10^4
粒子群量化	235.28	240.64

表 2 迭代 50 代两类量化算法处理结果

Tab. 2 Errors of two kind of color quantization processing after 50 iterations

	最小误差	最大误差	平均误差
遗传算法	246.32	301.25	255.15
粒子群算法	235.28	237.06	235.40

图 3 为基于遗传算法量化和基于粒子群量化对 Peppers 量化其不同迭代次数与平均误差对比曲线。

表 3 迭代 100 代两类算法处理结果

Tab. 3 Errors of two kind of color quantization processing after 100 iterations

	最小误差	最大误差	平均误差
遗传算法	237.20	245.66	239.37
粒子群算法	235.28	236.72	235.32

表 4 迭代 500 代两类算法处理结果

Tab. 4 Errors of two kind of color quantization processing after 500 iterations

	最小误差	最大误差	平均误差
遗传算法	235.28	236.32	235.45
粒子群算法	235.28	235.28	235.28

由表 2 ~ 表 4 及图 3 可以看出,基于粒子群的量化算法收敛速度较基于遗传算法的量化方法明显快,在迭代次数较小时,粒子群算法就基本收敛到全局最优了,而这时遗传算法还未进入收敛阶段。在迭代次数较大时,遗传算法也将基本收敛到全局最优解,这两类算法收敛到全局最优解的能力基本一致,与文献 [10] 关于 2 类算法的实验分析结果相符。

5 结论

基于聚类的量化算法是较少比特位色彩量化的最常用的方法之一,但普通聚类量化的结果依赖于初始调色板的选择,对于有些初始值可能收敛不到最优解。许多研究者利用遗传算法较好的自组织、自适应和自学习能力来解决聚类色彩量化的这一缺陷。本文基于粒子群优化算法在解决实优化问题时

较遗传算法具有更高效这一事实,提出了一种基于粒子群优化算法的色彩量化方法,并设计了相应的适应度函数。对本文方法进行的实验结果表明,基于粒子群的色彩量化算法继承了粒子群优化算法收敛速度快,搜索全局最优能力强的特性,在收敛速度方面明显优于基于遗传算法的色彩量化方法。并且还可以通过设计不同的适应度函数,方便地将局部量化精度与图像局部色彩密度联系起来,达到与人视觉更相复合的效果。

参考文献 (References)

- 1 Heckbert P. Color image quantization for frame buffer display [J]. *Computer Graphics*, 1980, 16(3): 297 ~ 307.
- 2 Orchard M, Bouman C. Color quantization of image [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(12): 2667 ~ 2690.
- 3 Geng Guo-hua, Zhou Ming-quan. Characters analysis of current algorithms for color quantization [J]. *Mini-Micro Systems*, 1998, 19(9): 46 ~ 491. [耿国华,周明全. 常用色彩量化算法的性能分析[J]. 小型微型计算机系统, 1998, 19(9): 46 ~ 491.]
- 4 Oleg Verevka. Local K-means algorithm for color image quantization [A]. In: *Proceedings of Graphics Interface 95 [C]*, Quebec City, Canada, 1995: 128 ~ 136.
- 5 Selim S Z, Iemal M A. K-Means type algorithms; a generalized convergence theorem and characterization of local optimality [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1984, 6(1): 81 ~ 87.
- 6 Bandyopadhyay S, Maulik U. Genetic clustering for automatic evolution of clusters and application to image classification [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(6): 1197 ~ 1208.
- 7 Sun Qi-bin, Cheng Yi-min, Wang Yi-xiao, et al. Image VQ coding using genetic algorithm [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1996, 26(2): 154 ~ 159. [孙启彬,程义民,王以孝等. 一种基于遗传算法的图象矢量量化方法[J]. 中国科技大学学报, 1996, 26(2): 154 ~ 159.]
- 8 Fu Jing-guang, Xu Gang, Wang Yu-guo. Clustering based on genetic algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(4): 122 ~ 124. [傅景广,许刚,王裕国. 基于遗传算法的聚类分析[J]. 计算机工程, 2004, 30(4): 122 ~ 124.]
- 9 Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y. *Swarm Intelligence* [M]. San Francisco: Morgan Kaufman Publisher, 2001.
- 10 Kennedy J, Spears W M. Matching algorithms to problems: an experimental test of the particle swarm and some genetic algorithms on the multimodel problem generator [A]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation [C]*, Anchorage, AK, USA, 1998: 78 ~ 83.