

基于改进量子遗传算法的图像锐化研究

邵明省 李伟

(鹤壁职业技术学院, 河南 鹤壁 458030)

摘要 针对量子遗传在锐化图像出现的缺点,提出改进方法。对量子采用自适应量子旋转门步长调整策略,不同代染色体的进化操作采用不同的旋转角步长,同代的染色体仍用同一旋转角步长进行更新,通过比较每个量子染色体的汉明距离调节其自身的进化速度;将量子染色体更新,将比较适合的染色体解在目标数值范围内判定为级别较高的染色体;对量子交叉操作采用对角线交叉方式;对图像锐化给出了算法步骤。实验仿真表明本算法在锐化边缘和抑制噪声上明显优于其他锐化方法,并且图像的边缘也得到了很好的增强。

关键词 图像处理;步长;旋转角;锐化;汉明距离

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.011101

Image Sharpening Research Based on Improved Quantum Genetic Algorithm

Shao Mingsheng Li Wei

(Hebi Occupation Technology College, Hebi, Henan 458030, China)

Abstract Aiming at the problem of QGA in sharpening image, an improved QGA is proposed. An adaptive quantum revolve door step adjustment strategy is used, different rotate angles are adopted for the evolution of different generations, and the same generation still has the same length. The Hamming distance of every quantum chromosome is compared in order to adjust its evolution speed. The solutions of quantum chromosome are updated to higher grades in the target range. The diagonal crossover mode is adopted for quantum crossover operation. The flow chart of the image sharpening algorithm is given. The simulation results show that the proposed algorithm is much better than other methods in sharpening edges and reducing noise, and image edges also get a very good enhancement.

Key words image processing; step length; rotating angle; sharpening; Hamming distance

OCIS codes 110.4155;110.3080;120.1880

1 引言

图像平滑往往使图像中的边界、轮廓变得模糊,为了减少这类不利效果的影响,就需要利用图像锐化技术,使图像的边缘变得清晰。图像锐化处理的目的是为了使图像的边缘、轮廓线以及图像的细节变得清晰^[1]。从频率域来考虑,图像模糊的实质是因为其高频分量被衰减,目前锐化处理常用的有 Laplacian 锐化算法、Roberts 梯度算法。Laplacian 锐化算法为二阶差分,若只考虑边缘点的位置而不考虑周围的灰度差时可用该算法进行检测,对于阶跃状边缘,其二阶导数在边缘点出现零交叉,并且边缘点两旁的像素的二阶导数异号。Roberts 梯度算法适用于边缘明显且噪声较少的图像,同时 Roberts 算法通常会在图像边缘附近的区域内产生较宽的响应,边缘定位的精度不是很高^[2]。

量子遗传算法(QGA)是随着量子信息理论的发展而形成的新兴智能算法,以量子计算和量子理论为基础,用量子比特实现染色体编码,利用当前最优个体的信息更新量子门。传统的观点是量子编码染色体的多态性已经能够保证种群的多样性,同时具有开发和探索能力。但是,对于解决复杂图像锐化问题,该算法仍

收稿日期: 2011-06-25; 收到修改稿日期: 2011-07-18; 网络出版日期: 2011-09-03

作者简介: 邵明省(1980—),男,硕士,讲师,主要从事图像和语音信号处理、通信技术等方面的研究。

E-mail: wapinetcn@yahoo.com.cn

然容易陷入局部最优^[3]。

本文提出一种改进的量子遗传算法,对不同代染色体的进化操作采用不同的旋转角步长进行动态更新,同代的染色体仍可以采用同一旋转角步长进行静态更新,同时为了更好地进行量子寻优,通过比较每个量子染色体的观测态与当前最优个体观测态之间的汉明距离调节其自身的进化速度。为最优个体间汉明距离小的个体分配一个大的旋转角,加速个体的进化速度,汉明距离大的个体,分配较小的旋转角,避免个体的无效进化。量子染色体更新机制是将比较适合的染色体解在目标数值范围内判定为级别较高的染色体,将不太适合的染色体解在目标数值范围内判定为级别较低的染色体。量子交叉操作采用对角线交叉方式,让位于对角线上的染色体经过这种方式后位于同一行上面。实验仿真表明本文算法在锐化边缘和抑制噪声上明显优于其他锐化方法,并且图像的边缘也得到了很好的增强。

2 量子遗传算法及其改进

2.1 经典量子遗传算法分析

量子遗传算法是建立在量子的态矢量表述的基础上,将量子比特几率幅表示应用于染色体的编码,使得一条染色体可以表达多个态的叠加,并利用量子旋转门和量子非门实现染色体的变异更新操作,从而实现了目标的优化求解。但图像锐化不可知性却导致了量子遗传的本质缺陷,没有利用进化中未成熟优良子群体所提供的信息,因而收敛速度很慢,在进化中引入好的引导机制可以增强算法的智能性^[4],提高搜索效率,使其更适于解决问题。

2.2 自适应量子旋转门步长调整策略

2.2.1 动、静态调整策略

在量子理论中,各个状态间的转移是通过量子门变换矩阵实现的,因此用量子旋转门的旋转角度同样可表征量子染色体的变异,进而在变异中加入最优个体的信息,加快算法收敛。

量子旋转门表示

$$U(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta S) & -\sin(\Delta S) \\ \sin(\Delta S) & \cos(\Delta S) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 Δ 与 S 分别为旋转角 θ 的旋转方向和角步长。旋转量子位角是为了使当前解逼近当前得到的全局最优解。令 $\hat{\theta}$ 是当前搜索到的全局最优解中某量子位角, θ 是当前解中相应量子位角

$$A = \begin{vmatrix} \cos\theta & \cos\hat{\theta} \\ \sin\theta & \sin\hat{\theta} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

若 $A \neq 0$, 则 $\text{sgn}(\Delta\theta) = \text{sgn}(A)$, 若 $A = 0$, 则 $\text{sgn}(\Delta\theta)$ 取任何方向均可^[5]。

本文的动态调整策略是允许不同代染色体的进化操作采用不同的旋转角步长进行更新,静态调整策略是若同代的染色体可以仍采用同一旋转角步长进行更新^[6]。量子种群中遗传染色体数量为 p ($p > 1$), 则该方法规定同一代种群采用 p 个不同的量子门旋转角步长,且第 i ($1 \leq i \leq p$) 个量子门旋转角步长只用于第 i 个染色体的进化。第 i 个量子门旋转角步长通过角步长常量、算法最大迭代次数及当前迭代次数和第 i 个染色体的随机数等参数确定。

动态调整如下

$$S_{\text{dynamic}} = 0.05\pi \left(k - \frac{n}{m+1} \right), \quad (3)$$

式中 n 为当前的进化代数, m 为终止代数, $k = 10 \exp[-t/\max(t)]$ 为 0 到 1 的一个常数。在算法运行初期,搜索的范围较大,从而提高了算法的收敛速度,而在算法运行末期,搜索的范围较小,从而实现了精确搜索,有利于寻得最优解。

第 i 个染色体在本代量子门更新操作中所需的步长 S_{static} 静态调整为

$$S_{\text{static}} = \Omega \cdot R_i \cdot \frac{m+1-t}{m+1}, \quad (4)$$

式中初始角步长 $\Omega \in (0.05\pi, 0.5\pi)$; $R_i \in (0, 1)$ 为第 i 个染色体所对应的均匀分布随机数; t 为量子遗传算

法中当前的迭代次数信息。

$S_{\text{static}} \in \left(0, \Omega \cdot \frac{m+1-t}{m+1}\right); \Omega \cdot \frac{m+1-t}{m+1}$ 会随着 t 的增加而减小^[7], 这样每个染色体都获得一个专门为自己的进化而服务的量子门旋转角步长。

2.2.2 最优个体间汉明距离计算

为了更好地微调量子, 通过比较每个量子染色体的观测态与当前最优个体观测态之间的汉明距离调节其自身的进化速度。为最优个体间汉明距离小的个体分配一个大的旋转角, 加速个体的进化速度, 汉明距离大的个体, 分配较小的旋转角, 避免个体的无效进化。计算步骤为

$$\theta = \begin{cases} \left(\frac{-(g_2 - g_1)}{d_{\max} - d_{\min}}\right) \times d + \frac{g_2 \times d_{\max} - g_1 \times d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, & (d_{\max} \neq d_{\min}) \\ g_1, & (d_{\max} = d_{\min}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 g_1 与 g_2 均为正常数, 取值范围为 $0.005\pi - 0.05\pi$; 汉明距离为 $d = \sum_{i=1}^Q \text{mod}(x, x^*)$, x^* 为当前最优个体的观测态, Q 为染色体的编码位数, d_{\max} 和 d_{\min} 分别为当前种群个体与最优个体间的最大汉明距离和最小汉明距离。通过汉明距离的计算为第 t 代的第 j 个个体分配一个适合于自身进化的合适旋转角步长^[8]。得到适应度评价函数为

$$f(W) = \sum_{i=1}^I \left\| x_i - \sum_{j=1}^b x_{ij} \right\|^2, \quad (6)$$

式中 x_{ij} 为种群中第 i 代的第 j 个个体, I 为种群中个体的数量。

2.3 量子染色体更新机制

通过使用一组输入和一个目标函数(量子遗传适应度), 遗传算法生成“染色体”集合, 然后通过使用目标函数计算各解得值, 对染色体排序。目标函数确定各解对于目标数值的范围等级。将比较适合的染色体解在目标数值范围内判定为级别较高的染色体, 将不太适合的染色体解在目标数值范围内判定为级别较低的染色体。保存比较适合的染色体(存活), 丢弃不太适合的染色体, 创建新的适合的染色体以代替丢弃的不太适合的染色体。

2.3.1 量子比特染色体操作

量子比特是一个双态量子系统, 1 个量子位的状态可表示为

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (7)$$

式中 α 和 β 分别表示 $|0\rangle$ 和 $\beta|1\rangle$ 的几率幅, 对量子比特测量时得到 0 的概率为 $|\alpha|^2$, 得到 1 的概率为 $|\beta|^2$, 且满足归一化条件

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (8)$$

单条染色体编码形式为

$$q = \begin{pmatrix} \alpha_1 | \alpha_2 | \cdots | \alpha_l \\ \beta_1 | \beta_2 | \cdots | \beta_l \end{pmatrix}, \quad (9)$$

1 条染色体包含 n 位量子比特, 复数对 (α, β) 表示 1 位量子比特的状态, 每个量子比特测量后可能得到的状态为 0 或者 1, 由于每 1 个量子比特可以表示 2 个经典比特, 因而 1 个长为 l 位的量子比特编码能表示 2^l 条不同的经典比特^[9]。采用量子比特编码来形成多条染色体

$$P^j = \left(\underbrace{\left(\alpha'_{11} | \alpha'_{12} | \cdots | \alpha'_{1l_1} | \alpha'_{21} | \cdots | \alpha'_{2l_1} | \cdots | \alpha'_{m1} | \alpha'_{m2} | \cdots | \alpha'_{ml_1} \right)}_{\substack{K_1 K_2 K_3 \\ C_x}}, \underbrace{\left(\beta'_{11} | \beta'_{12} | \cdots | \beta'_{1l_1} | \beta'_{21} | \cdots | \beta'_{2l_1} | \cdots | \beta'_{m1} | \beta'_{m2} | \cdots | \beta'_{ml_1} \right)}_{\substack{K_1 K_2 K_3 \\ C_y}}, \underbrace{\left(\beta'_{11} | \beta'_{12} | \cdots | \beta'_{1l_1} | \beta'_{21} | \cdots | \beta'_{2l_1} | \cdots | \beta'_{m1} | \beta'_{m2} | \cdots | \beta'_{ml_1} \right)}_{\substack{K_1 K_2 K_3 \\ C_z}} \right) k, \quad (10)$$

式中 m 为染色体基因个数, 对应于现实中的任务数; k 为编码每个基因的量子比特数, 如果可以执行的任务数为基因数目 n , 则 $k = \lceil \ln n \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整; C_x, C_y, C_z 为量子多条染色体寻优区域划分, $K_1 K_2 K_3$ 为子区域划分。

2.3.2 交叉操作

量子染色体在实行全干扰交叉操作时,操作前的状态如表 1 所示,该量子交叉操作采用对角线交叉方式,让位于对角线上的染色体经过这种方式后位于同一行上面,保证了种群的所有染色体都有机会参与操作,全干扰交叉后染色体的状态如表 2 所示。它改变了普通交叉的局部性与片面性,在种群出现早熟时能够产生新的个体,给进化过程注入新的动力^[10]。

表 1 量子交叉前的染色体

Table 1 Chromosomes before quantum cross

No.	Chromosomes								
1	A(1)	E(2)	D(3)	C(4)	B(5)	A(6)	E(7)	D(8)	C(9)
2	B(1)	A(2)	E(3)	D(4)	C(5)	B(6)	A(7)	E(8)	D(9)
3	C(1)	B(2)	A(3)	E(4)	D(5)	C(6)	B(7)	A(8)	E(9)
4	D(1)	C(2)	B(3)	A(4)	E(5)	D(6)	C(7)	B(8)	A(9)
5	E(1)	D(2)	C(3)	B(4)	A(5)	E(6)	D(7)	C(8)	B(9)

表 2 量子交叉后的染色体

Table 2 Chromosomes

No.	Chromosomes after quantum cross								
1	A(1)	A(2)	A(3)	A(4)	A(5)	A(6)	A(7)	A(8)	A(9)
2	B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	B(5)	B(6)	B(7)	B(8)	B(9)
3	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	C(6)	C(7)	C(8)	C(9)
4	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)
5	E(1)	E(2)	E(3)	E(4)	E(5)	E(6)	E(7)	E(8)	E(9)

2.4 图像锐化

由于图像的边缘细节和噪声都在高频部分,因此将图像的高频成分分为

$$f_{hp} = f_h + f_m + f_1, \quad (11)$$

式中 f_1 为弱细节区高频成分,即图像平坦区域的高频成分,多由噪声引起; f_m 为中等细节区高频成分; f_h 为强细节区高频成分。 f_h 和 f_m 主要是图像边缘区域所包含的高频成分^[11]。图像边缘细节与噪声的一个重要区别在于边缘在空间上具有连通性,表现在边缘不会只是孤立的一个点或两个点,而是彼此直接相互衔接的连通区域,在做边缘锐化滤波的时候,滤波出来的边缘连通域面积越大,该片区域是边缘的概率就越大。

高通滤波后图像的灰度值可表示为

$$Z(d, h) = X(d, h) - \frac{[X(d, h-1) + X(d, h+1) + X(d, h-2) + X(d, h+2)]}{4}, \quad (12)$$

式中 $Z(d, h)$ 代表高通滤波后图像的灰度值, $X(d, h-2)$ 、 $X(d, h+2)$ 、 $X(d, h+1)$ 、 $X(d, h-1)$ 、 $X(d, h)$ 分别代表原图像中第 d 行的第 $h-2$ 、 $h+2$ 、 $h+1$ 、 $h-1$ 、 h 列像素点的灰度值^[12]。

假设改进量子遗传算法系统中任意 3 量子比特 $\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$ 对图像进行锐化,则锐化的量子状态表示为

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}|000\rangle + \frac{3}{4\sqrt{2}}|001\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}}|010\rangle + \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}|011\rangle + \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}|100\rangle + \\ & \frac{3}{4\sqrt{2}}|101\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}}|110\rangle + \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}|111\rangle, \end{aligned} \quad (13)$$

以上结果表示状态 $|000\rangle$ 、 $|001\rangle$ 、 $|010\rangle$ 、 $|011\rangle$ 、 $|100\rangle$ 、 $|101\rangle$ 、 $|110\rangle$ 、 $|111\rangle$ 出现的概率分别为 $\frac{3}{32}$ 、 $\frac{9}{32}$ 、 $\frac{1}{32}$ 、

$\frac{3}{32}$ 、 $\frac{3}{32}$ 、 $\frac{9}{32}$ 、 $\frac{1}{32}$ 、 $\frac{3}{32}$, 随着 α, β 趋于 1 或 0, 算法收敛。

改进量子遗传算法图像结果输出为

$$X_{out}(i, j) = X_{in}(i, j) + X_{um}(i, j), \quad (14)$$

$$X_{\text{um}}(i, j) = \gamma \left[\begin{array}{c} \alpha'_{11} | \alpha'_{12} | \cdots | \alpha'_{1l_1} | | \alpha'_{21} | \cdots | \alpha'_{2l_2} | \cdots | \alpha'_{ml} | | \alpha'_{m2} | \cdots | \alpha'_{ml_1} | \\ \beta'_{11} | \beta'_{12} | \cdots | \beta'_{1l_1} | | \beta'_{21} | \cdots | \beta'_{2l_2} | \cdots | \beta'_{ml} | | \beta'_{m2} | \cdots | \beta'_{ml_1} | \end{array} \right] \times X_{\text{in}}(i, j), \quad (15)$$

式中 $X_{\text{out}}(i, j)$ 为锐化增强后图像, $X_{\text{in}}(i, j)$ 为输入图像, $X_{\text{um}}(i, j)$ 为本文算法输出的锐化图像, γ 为锐化增强因子^[13]。

为了客观评价处理后图像的质量,用峰值信噪比(PSNR) R_{PSN} 来对图像进行评价

$$R_{\text{PSN}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{255^2}{E_{\text{MS}}} \right), \quad (16)$$

$$E_{\text{MS}} = \sqrt{\sum_{w=1}^w (X_n - P_n)^2}, \quad (17)$$

式中 X_n 是原始图像第 n 个像素值; P_n 是经过处理后第 n 个像素值。所提出的整个图像锐化算法流程如图 1 所示。

3 实验仿真

实验采用分辨率为 256 pixel × 256 pixel 的静止灰度图像 Lena(如图 2 所示),含有随机噪声。运行环境为 P4, 3.0 GHz, 2048MBDDR3。编程软件 Matlab7.0, 运行蒙特卡罗 30 次随机仿真实验。图 2 分别给出了本文算法与其他算法对比效果。



图 2 不同算法得出的结果比较。(a)原始图像;(b) Roberts 算法;(c) Laplacian 算法;(d) QGA 算法;(e)本文新算法

Fig. 2 Comparison of results from different algorithms. (a) Original image; (b) roberts algorithm; (c) laplacian algorithm; (d) QGA algorithm; (e) new algorithm

从图 2 中可以看出, Roberts 算法被增强后的噪声由于也具有高频突变的特点,对人眼会形成强烈刺激,严重影响视觉效果;Laplacian 算法虽然边缘得到了比较好的锐化,但是噪声也明显放大,特别是横条纹的非均匀性固定噪声也明显放大;量子遗传算法对噪声有很大的增强,锐化后图像质量很差;利用本文算法得到的结果,能够很好地对边缘进行锐化,同时也抑制了噪声,图像整体去除了模糊感,明显地改善了视觉效果。4 种方法的峰值信噪比对比结果如表 3 所示。

表 3 PSNR 对比结果

Table 3 PSNR contrast results

	Improvement algorithm	QGA	Laplacian	Roberts
PSNR	48.5990	30.7891	15.1907	6.5646

本文改进算法与其他算法相比,PSNR 值最大,对不同幅度的噪声具有比较好的抑制作用。由于强边缘已经具有较好的对比度,而其局部对比度也较大,如果对强边缘进行强锐化,很可能导致边缘部分出现饱和,使得图像质量很差,因此对强边缘的锐化程度需要适当减少,即通过锐化增强因子 γ 调整,减少灰度值溢出,降低图像的失真度。使整体轮廓和背景间对比度有一个明显的提升,目标边缘和内部细节信息被很好保存

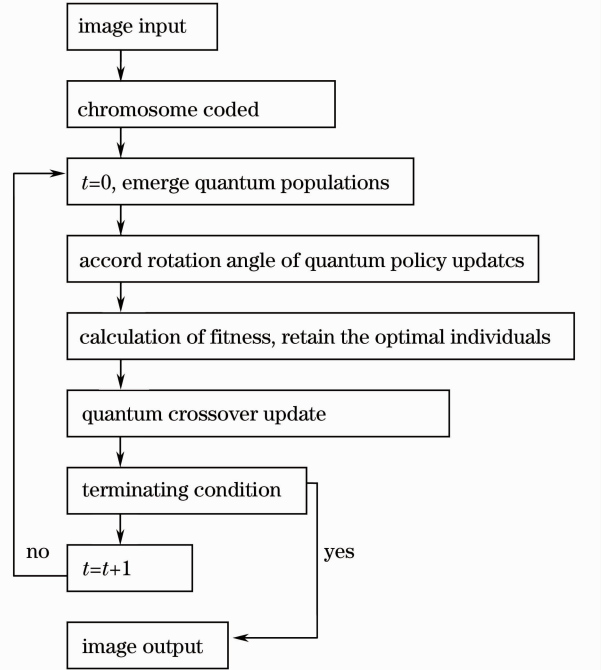


图 1 图像锐化算法流程

Fig. 1 Process of image sharpening algorithm

并得到明显改善,结果更为清晰。

图3是原图和本文方法锐化后的像素灰度曲线(在Lena图第50行处,迭代3次)。由图3可知,本文方法锐化像素灰度保留了原图像的重要信息,在灰度方差差别较大地方锐度明显增强。QGA产生了锐利的边缘,但是由于不同图像区域之间存在不连续的过渡,它看起来是不自然的,是一个虚假的分片常数图像。

4 结 论

提出一种改进的量子遗传算法,不同代染色体的进化采用不同的旋转角步长,同代的用同一旋转角步长更新,比较每个量子染色体的汉明距离调节其自身的进化速度,量子染色体更新机制选择比较适合染色体,量子交叉操作采用对角线交叉方式,实验结果表明,本文所提方法对图像进行锐化,图像整体去除了模糊感,明显地改善了视觉效果。

参 考 文 献

- Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205004
韦芙芽, 刘洪武, 付春林. 基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205004
- Gao Bin, He Tongdi. Self-adaptive multi-sensor image fusion using Curvelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051003
高 斌, 何同弟. 基于Curvelet变换的自适应多传感器图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 051003
- Zhan Xiaomei, Han Lujia, Liu Xian *et al.*. Genetic algorithm used for predicting meat and bone meal content in fishmeal by near infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2800~2803
湛小梅, 韩鲁佳, 刘 贤 等. 遗传算法在鱼粉中肉骨粉近红外光谱检测中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2800~2803
- He Minwei, Li Guihai, Ruan Boyao *et al.*. Application of modified quantum genetic algorithm in optimization of multi-peak functions[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, **44**(7): 41~43
贺敏伟, 李贵海, 阮柏尧 等. 改进量子遗传算法用于多峰值函数优化[J]. *计算机工程与应用*, 2008, **44**(7): 41~43
- Xiao Hong, Shang Fuhua, Cao Maojun. A novel quantum genetic algorithm with application[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, **10**(8): 1874~1877
肖 红, 尚福华, 曹茂俊. 一种新量子遗传算法及应用[J]. *科学技术与工程*, 2010, **10**(8): 1874~1877
- Bai Lin, Xing Huanlai. A used in quantum genetic algorithm step length of quantum gate rotation angle adjustment method [P]. China's patent, 200810227428, 2009-5-27
柏 琳, 邢焕来. 一种用于量子遗传算法的量子门旋转角步长调整方法[P]. 中国专利:200810227428, 2009-5-27
- Sun Lijuan, Wang Ruchuan, Liu Chunlin. A QoS multicast routing approach based on parallel quantum genetic algorithm [J]. *J. Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2007, **27**(2): 72~75
孙力娟, 王汝传, 刘春林. 基于并行量子遗传算法的QoS组播路由方法[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2007, **27**(2): 72~75
- Fu Jia, Ji Yuefeng. Adaptive quantum-inspired evolutionary algorithm for network coding resources optimization [J]. *Science Paper Online*, 2011, **6**(1): 20~25
付 佳, 纪越峰. 一种解决网络编码资源优化问题的自适应量子衍生进化算法[J]. *中国科技论文在线*, 2011, **6**(1): 20~25
- Li Hengjian, Yin Zhongke, Wang Jianying. Image sparse decomposition based on quantum genetic algorithm [J]. *J. Southwest Jiaotong University*, 2007, **42**(1): 19~23
李恒建, 尹忠科, 王建英. 基于量子遗传优化算法的图像稀疏分解[J]. *西南交通大学学报*, 2007, **42**(1): 19~23
- Li Zhiqian, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 710~712
李志全, 康莉莉, 苏凤燕 等. 光子晶体增益平坦滤波器设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 710~712
- Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Infrared image sharpening algorithm with noise inhibition [J]. *Acta Optica*

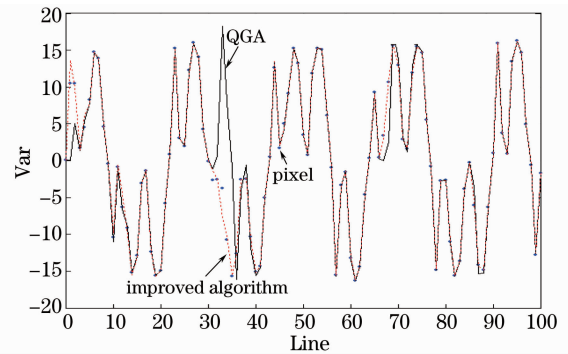


图3 原图与本文方法锐化像素灰度曲线
Fig. 3 Sharpening by the authors' algorithm and original pixel gray curve

Sinica, 2009, **29**(7): 1807~1811

钱惟贤, 陈 钱, 顾国华 等. 一种具有噪声抑制功能的红外图像锐化算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1807~1811

- 12 Guo Zhenhua, Wei Tingcun. Image sharpening algorithm and implementation for small size TFT-LCD[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2009, **24**(5): 756~761

郭振华, 魏廷存. 适用于小尺寸 TFT-LCD 的图像锐化算法及其硬件实现[J]. *液晶与显示*, 2009, **24**(5): 756~761

- 13 Li Cheng, Ju Ming, Bi Duyan *et al.*. Composite image contrast enhancement algorithm based on local adaptive stretching window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2756~2761

李 成, 鞠 明, 毕笃彦 等. 基于局部自适应拉升窗的复合图像增强算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2756~2761