

一种自适应 Catmull-Rom 样条图像缩放算法的设计实现

魏美荣, 蒋 林

(西安邮电学院 电子工程学院学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对基于图像边缘缩放处理导致的图像边缘瑕疵或模糊现象, 提出一种边缘自适应 Catmull-Rom 样条图像缩放插值算法. 该算法以相邻 4 个源像素点构造一段以 3 次多项式函数为基础, 自动选择与目标像素点相适应的像素组进行插值运算. 重点描述了该算法应用于图像缩放处理的硬件实现结构, 并通过功能仿真. 最后, 由 Sobel 边缘检测函数对目标图像进行边缘检测. 结果表明, 该算法能够获得边缘清晰的真彩色目标图像.

关键词: 自适应; Catmull-Rom; 图像缩放

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0063-05

Design and Hardware Implementation of a Catmull-Rom Spline Adaptive Image Scaler

WEI Mei-rong, JIANG Lin

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: To overcome the effect of edge defects and blur in image scaling, this paper proposes an adaptive Catmull-Rom spline interpolation algorithm for image scaling. The algorithm uses the cubic Catmull-Rom spline to interpolate pixels. Suitable pixel groups are automatically selected for interpolation. This paper emphasizes on the hardware implementation of algorithms used in image scaling, and the functional simulation of the scaler. Finally, the scaled image is further enhanced with sobel edge detection function. The results show that the algorithm can obtain the true edge of a clear target image color.

Key words: edge adaptive; catmull_rom; image zoom

1 引言

图像缩放处理的应用已经非常广泛. 目前图像处理主要采取插值的方法, 如邻近取样法、双线性插值方法、样条插值与 B 样条插值方法等^[1-3]. 但这些算法还存在一些不足之处, 邻近法使目标图像的各像素点间的方差较大, 出现很多斑点; 双线性法使目标图像更多地产生源图像不具有的像素值, 导致图像的一些细节丢失, 且不可逆转. 而 B 样条本身并不具有可插值性, 当其应用于图像采样时, 需要通过已知节点反求控制顶点, 插值效率并不高.

为了提高插值后目标图像边缘信息的精确度, 本文基于改进传统的 Catmull-Rom 样条, 提出适用于实时彩色图像缩放处理的自适应 Catmull-Rom

插值算法, 并给出硬件电路设计结构. 最终通过 matlab 工具对该算法与传统的插值算法所得到的缩放效果图进行性能比较. 结果表明, 该算法可以实现与原始图像相近的视觉效果, 并具有运行速度快与输出图像质量高的特点.

2 算法原理

Catmull-Rom 样条函数在各节点处的导数是通过利用其前后 2 个节点的值直接计算出来的. 利用每相邻 4 个节点的信息就可以构造出一段经过中间两点的 3 次多项式函数, 并且所构造的每一段样条在拼接时达到 C' 连续. 设有一组节点 $X_0, X_1, \dots, X_i, \dots$, 对应的值为 $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots$, Catmull-Rom 样条函数对节点 x_i 处的一阶导数进行如下的定义:

$$P'_i = \tau(P_{i+1} - P_{i-1}) \quad (1)$$

式中, τ 称为形状因子. 当该样条用于插值用途时, $\tau = 0.5$ 为最佳值^[4], 此时式(1)所定义的 P'_i 正好等于由点 (x_i, P_i) 及其两侧的两点所确定的 2 次多项式函数在节点 X_i 处的一阶导数. 从提高值 P'_i 的精度要求和硬件实现的复杂度考虑, 本文采用通过点 (x_i, P_i) 及其相邻两侧 5 个节点共同确定样条函数在节点 X_i 的导数, 图 1 所示的是一段 Catmull-Rom 样条, 节点 $X_{i-2}, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, X_{i+2}$ 对应的样条值分别是 $P_{i-2}, P_{i-1}, P_i, P_{i+1}, P_{i+2}$, 通过该 5 个节点的样条值就可以唯一地构造一个 4 次多项式函数:

$$F(X) = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \alpha_3 X^3 + \alpha_4 X^4 \quad (2)$$

式(2)表明利用 4 次插值多项式 $F(X)$ 求得 X_i 点的一阶导数: $P'_i = F'(X)$, 即 P'_i 值通过节点 X_i 两侧的 4 个节点的信息来计算得到. 根据节点导数定义的方法, 重新构造 Catmull-Rom 样条函数, 考虑数字图像的特殊性, 定义一组步长为 1 的等距点列, 任意相邻的 5 个节点的值依次为 $P_{i-2}, P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$ 和 P_{i+2} , 在其中的两点 (x_{i-1}, P_{i-1}) 和 (x_i, P_i) 之间构造一段 3 次样条函数, 设插值点坐标为 $x \in [x_i, x_{i+1}]$, 其对应的浮点坐标 $t = x - x_i \in [0, 1]$, 则该 3 次样条函数可表示为

$$P(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 = \sum_{k=0}^3 c_k t^k \quad (3)$$

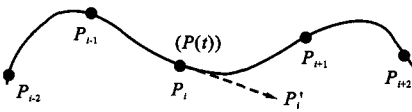


图 1 Catmull-Rom 样条

根据样条插值的端点信息可知, 式(3)三次样条函数在端点处应满足以下条件: 取 $P(0), P(1), P'(0)$ 和 $P'(1)$ 处的函数值为式(4):

$$\begin{cases} P(0) = c_0 = P_{i-1} \\ P(1) = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 = P_i \\ P'(0) = c_1 = \tau(P_i - P_{i-2}) \\ P'(1) = c_1 + 2c_2 + 3c_3 = \tau(P_{i+1} - P_{i-1}) \end{cases} \quad (4)$$

通过解式(4)可知文中 Catmull-Rom 样条函数的系数为

$$\begin{cases} c_0 = P_{i-1} \\ c_1 = (-\tau)P_{i-2} + \tau P_i \\ c_2 = (2\tau)P_{i-2} + (\tau - 3)P_{i-1} + (3 - 2\tau)P_i + (-\tau)P_{i+1} \\ c_3 = (-\tau)P_{i-2} + (2 - \tau)P_{i-1} + (\tau - 2)P_i + (\tau)P_{i+1} \end{cases} \quad (5)$$

通过上式对多项式系数计算方法的定义, 就可以得到自适应边缘 Catmull-Rom 样条函数插值矩阵如下:

$$P(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\tau & 0 & \tau & 0 \\ 2\tau & \tau - 3 & 3 - 2\tau & -\tau \\ -\tau & 2 - \tau & \tau - 2 & \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-2} \\ P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \end{bmatrix}, \quad t \in [0, 1], \tau = 0.5 \quad (6)$$

3 Catmull-Rom 插值算法在图像缩放中的应用

设输入图像 $f(x, y)$ 是定义在二维区域上的一个 $M \times N$ 的真彩色数字图像, 其中 $(x, y) \in [0, M-1] \times [0, N-1]$, 然后对 $f(x, y)$ 在 $[0, W-1][0, N-1]$ 上按照适当的规则进行重采样, 结果即为最终缩放的目标图像. 当 $W > M$ 且 $Q > N$ 时, 为图像缩放. 当 $W < M$ 且 $Q < N$ 时为图像放大.

因为 Catmull-Rom 插值算法是一种 3 次的分段插值样条, 所以每次插值选取与当前图像边缘节点相适应的相邻 4 个节点进行插值运算. 如图 2 所示, 坐标 xy 平面表示输入的 $M \times N$ 的真彩色数字图像, Z 轴表示对应 xy 平面源图像各节点的 RGB 像素值. 在实时条件下, 对该二维图像的缩放控制采取进行先横向(x 轴方向)缩放插值控制, 再纵向(y 轴方向)缩放插值控制处理机制. 定义浮点坐标 t 值为源图像的缩放系数, 目标节点位置由当前进行插值运算的 T 值决定, T 值定义为

$$\begin{cases} T = T + \Delta t \\ \Delta t = 1/t' \end{cases} \quad (7)$$

Δt 表示插值后目标节点之间的步长, 图像放大时 $\Delta t \in [0.0, 1.0]$ (图像缩小时 $\Delta t \geq 1.0$), 考虑到浮点数累加后 T 值可能取非整数, 本文中在选取参与 Catmull-Rom 插值运算的四个相邻节点的源像素时, 采取自适应方式选择与目标像素点相适应的像素组进行插值运算. 若当前计算的 $T_i \in (x_i, x_{i+1})$, 即为非整数或 $T = x_i$ 为整数, 则参与插值运算的四个源像素值选取坐标节点 X_{i-1}, X_i, X_{i+1} 和 X_{i+2} 对应源像素值 P_{i-1}, P_i, P_{i+1} 和 P_{i+2} ; 若每次计算目标像素点得到的浮点值 T 整数部分每递增步长等于 1 时, 则进行插值运算的四个节点为 $P_i, P_{i+1}, P_{i+2}, P_{i+3}$; 若每次计算目标像素点得到的浮点值 T 整数部分递增步长大于 1 时, 则进行插值运算的四个节点取 $[T]$ (T 值取整) 对应坐标节点相邻的源像素值

$P_{[T]-1}, P_{[T]}, P_{[T]+1}, P_{[T]+2}$. 按照以上几种方式选取四个像素点值后代入边缘自适应 Catmull-Rom 样条函数矩阵中进行插值运算. 进行图像缩放处理过程中,如图 2 所示:该算法分为两步进行,按照上述插值方法,先获得纵向分布的过渡插值节点的像素值 P_i ,然后再在 $x = T$ 平面上根据对应得像素值 $Q_{i-1}, Q_i, Q_{i+1}, Q_{i+2}$ 值进行纵向插值计算得到目标标处目标像素值,并将其赋给输出图像的像素值 P .

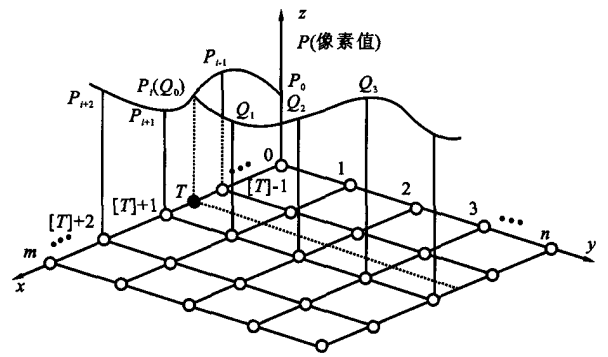


图 2 自适应 Catmull-Rom 插值算法示意图

4 图像缩放的硬件实现

在评价复杂算法硬件实现时,对于常数参与的加法和乘法运算占用的硬件资源可以忽略不计. 本文中提出的自适应插值算法(如式(7)),尽管其中 t 在取 T 整数部分时,针对不同的 Δt (步长)值会不一样,实际上只是输入的条件不同,进行插值运算过程均可按统一的过程处理,如式(8)所示:

$$\begin{cases} P(t) = 1/2(c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3) \\ c_0 = 2P_{i+1} \\ c_1 = -P_{i-2} + P_i \\ c_2 = 2P_{i-2} - 5P_{i-1} + 4P_i - P_{i+1} \\ c_3 = -P_{i-2} + 3P_{i-1} - 3P_i + P_{i+1} \end{cases} \quad (8)$$

为节省硬件资源在 t 已知 的情况下,本文算法每次计算的目标像素值只与选取的 4 个源像素值关联. 在硬件实现时,避免了将源图像的边缘信息全部保存所带来的资源消耗.

4.1 系统结构

要数据平方向和垂直方向进行插值处理求控制顶点,插值效率并不高,在实时条件下,缩放控制采取流水线方式,控制真彩色图像插值处理时的原像素数据的输入,伸缩判断^[5-6],横纵向插值运算单元,过渡像素数据缓存处理以及最后目标像素值的输出,如图 3 所示. 硬件实现主要接口信号描述如表 1 所示.

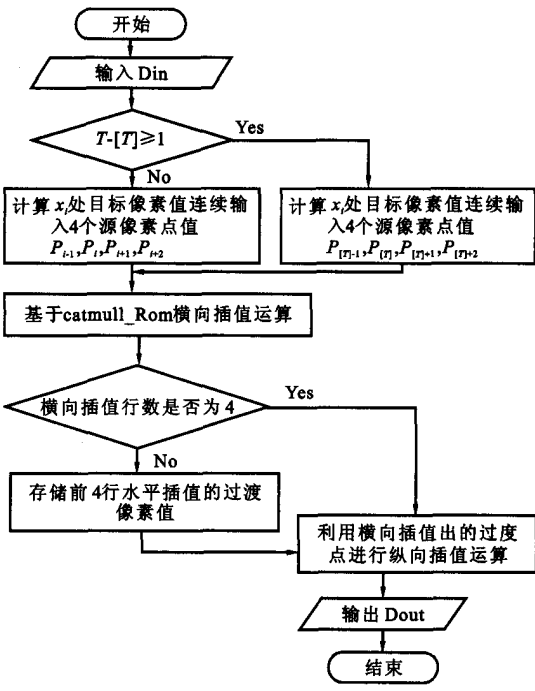


图 3 图像缩放处理流程图

表 1 本文算法硬件实现的主要接口信号

名字	类型	功能描述
Din[23:0]	输入	输入数据信息,其中 Din[23;16]、Din[15;8]、Din[7;0]分别代表原始像素 R,G,B 值
Dout[23:0]	输出	输出数据信息,其中 Dout[23;16]、Dout[15;8]、Dout[7;0]分别代表新像素 R,G,B 值
Vin	输入	输入数据有效信号,为高时输入数据有效,否则无效.
Rin	输出	接收上一级数据允许信号,为高时允许上一级向本级发送数据.
Rout	输入	下一级接收数据信号,为高时可以向下一级发送数据,否则就等待.
Vout	输出	输出数据有效信号,为高时输出数据有效,否则无效.
clk	输入	50% 的占空比,输入数据在 clk 的上升沿采样,输出数据在 clk 的上升变化.
Rst_n	输入	低电平有效的复位信号,为器件提供异步复位信号.
M[m-1:0]	输入	原始图像的宽度
N[n-1:0]	输入	原始图像的高度
t	输入	当前图像缩放的倍数

4.2 图像缩放的整体设计

该功能的整体硬件的电路设计如图 4 所示,主要功能模块由缩放判断、插值节点控制、横/纵向插值控制、行缓存管理、 T 值控制单元,输出控制单元组成,其中 Vin 、 Rin 、 $Vout$ 、 $Rout$ 是流水线的上一

级与下一级之间的握手信号。

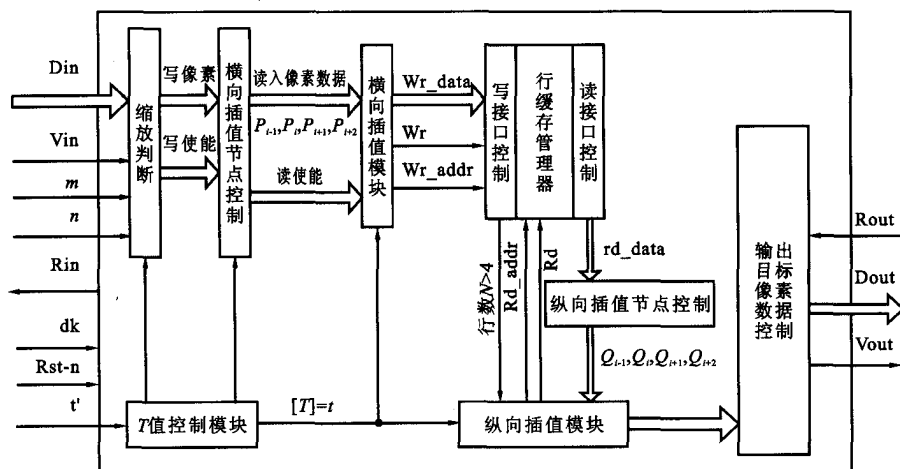


图4 缩放模块的整体逻辑结构框图

(1) 插值节点控制模块. 当 Rin 和 Vin 使能信号有效时, 通过移位寄存器控制输入的源像素 Din 个数, 并完成图像边界点像素值的复制. 根据当前给定的图像伸缩系数 t' 得出当前所求目标像素点的位置信息送到 T 值控制模块, 并且给前级模块输出本级模块的数据接收指示信号 Rin, 并将当前进行插值计算的 4 个相邻源像素值送入横向插值模块进行插值运算。

(2) T 值控制模块. 根据当前输入的图像缩放系数 t' 值 $0 < t' < 1$ (或 $t' \geq 1$), 判定当前图像进行放大控制(或缩小控制), 并且根据横向插值节点控制模块输入的源像素点的个数, 完成 T 值按照式(7)的累加, 并取 T 值的小数部分作为计算目标像素点值的参数 t 送入横向插值模块。

(3) 横向插值模块. 在横向插值使能信号有效时, 将由横向插值节点控制单元输入进来的 4 个源图像节点信息(即真彩色 RGB 值)和 T 控制单元求得的当前参数 t , 代入自适应 Catmull-Rom 插值公式(8)中, 计算出将参与纵向插值运算的过渡像素值送入行缓存模块进行待存储, 且三种色素 RGB 值是并行处理. 同时, 根据当前插值节点位置给出进行缓存的写地址和写请求。

(4) 行缓存管理模块. 该模块在横向插值模块提供的写使能 wr 有效的情况下, 将横向插值的结果数据 wr_data 存入相应的写地址 wr_addr 中. 并且当对源图像进行缩放控制的行数 $n \geq 4$ 时, 开启纵向插值使能信号, 并且在读使能信号 Rd 有效的情况下, 根据读地址信号 Rd_addr 从双口的 ram 存储中读取相应的过渡像素数据 Rd_data 送入纵向插值单元。

(5) 纵向插值模块. 在纵向缩放处理的使能信号开启后, 根据行缓存管理实时输出的 4 个相关的过渡像素数据 Rd_data 进行插值运算, 具体方法与横向插值控制处理类似. 并将最后得出的目标像素点的 RGB 值送入输出控制模块。

(6) 输出控制模块. 在 Vout 和 Rout 控制信号有效时, 将纵向插值得到的真彩色像素 RGB 值, 经过相应的格式转换, 作为最终的目标图像像素数据输出。

5 硬件实现结果及分析

5.1 仿真结果

采用 Verilog 语言描述电路, 通过 modesim6.5 进行仿真, 以验证实验结果. 仿真与设计一致, 电路能够实现图像缩放. 后换 rilog 的插值将仿真得到的目标图像的像素文件, 再经过图像转换后, 得到最终的效果图如图 5 所示。

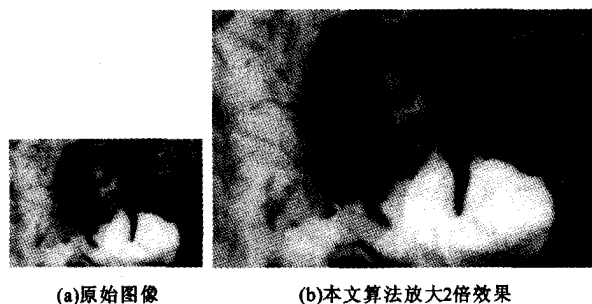


图5 本文算法硬件实现效果与原始图对比

5.2 峰值信噪比分析

对于图像灰度值均一的区域, 大多数的算法都可获得接近的视觉效果, 而在图像边缘区域, 由于灰度变化大, 不同算法插值的效果差别很大. 从峰值信

噪比和人眼视觉分辨效果两方面,将本文算法与传统的邻近法、双线性插值法生成的图像进行了效果比较.图6为各种算法得到的效果图.图6(a)是分辨率为 284×192 的原始图像.图6(b)~(d)分别为图6(a)方框区域采用不同的缩放算法实现放大2倍后的图像.



图6 各种不同算法缩放图像效果

由此可见,图6(b)用近邻插值法处理得到的图像产生了严重的斑点,边界出现毛疵,图像的质量很差.图6(c)用双线性插值法得到的图像边缘较为平滑,图像质量较好,但是图像中边缘的一些细节也被模糊了.图6(d)用本文算法得到的灰度图像,边缘轮廓清晰,整体层次分明些.峰值信噪比^[7](PSNR),一种评价图像的客观标准.公式如下:

$$\text{PSNR}(F_0, F) = 10 \lg 255^2 / \text{MSN}$$

式中,MSN代表原始图像与处理图像间的均方误差且

$$\text{MSN} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - F_0(i, j))^2 \quad (9)$$

F_0 是 $M \times N$ 的原始图像; F 是原始图像由某种算法先放大再缩小后的目标图像.由理论知, $\text{PSNR}(F_0, F)$ 越大,即图像的信噪比越高,表示图像缩放的效果越好.

将图6(a)放大2倍后,再经过近邻插值算法,双线性插值算法和本文算法缩小到与原始图像相同大小的图像如图6(b)~(d)所示.根据式(9)得到各相应算法插值处理后图像的PSNR分别为:70.424 5 dB,70.919 6 dB,73.363 6 dB.显然,本文算法获得的信噪比明显高于近邻插值算法和双线性

插值算法.

5.3 图像的边缘分析

由于人眼的关系,对于双线性插值和Catmull-Rom的插值效果的差别不是很明显,为了进一步检验使用本文研究算法对减少图像边缘插值误差的作用,对图6中各种插值算法得到的效果如图7(b)~(d)所示,采用Sobel边缘检测算子函数进行图像边缘检测,结果如图7所示.

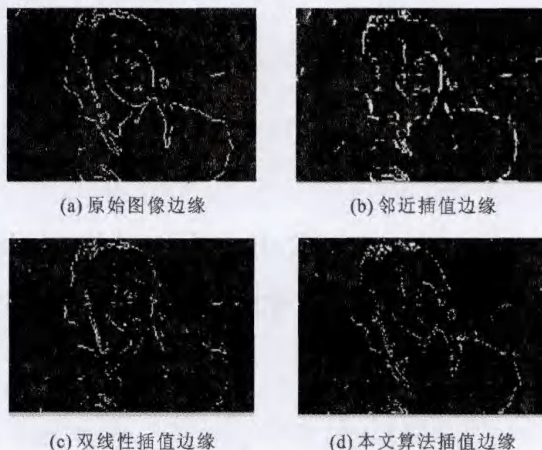


图7 不同插值算法的图像边缘比较

制路图给出什么样形式由边缘检测结果显示,近邻法的锯齿现象使得图像边缘线条过度不够细腻,双线性插值由于具有低通滤波器的性质,导致信息比较丰富的高频部分受损,造成图像轮廓模糊,边缘线条很不分明,而本文算法有效地避免了这点,得到与原始图像相近的边缘效果.

6 结束语

文中提出了一种边缘自适应的Catmull-Rom图像插值算法,并采用verilog语言完成了该算法的硬件设计.最终采用matlab工具对该算法与传统的插值算法所得到的缩放效果图进行性能比较.实验结果表明,采用该算法可得到比不基于边缘的插值算法更高的精度要求,可达到很好的视觉效果和更高的信噪比,且该算法实现过程简单,易于硬件实现.

参考文献:

- [1] 冈萨雷斯,伍兹.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2003:50—51.
- [2] 杨朝霞,遯峰,关履泰.用B样条的尺度关系来实现图像任意精度的放大缩小[J].计算机辅助设计与图形学报,2001,13(9):824—827.

(下转第71页)

6 结束语

本文将改进的粒子群优化算法应用到软件系统的可靠性分配问题中,实验结果表明,改进的粒子群优化算法在稳定性和收敛性上均优于基本粒子群优化算法、遗传算法、非平衡模拟退火算法等智能优化算法,为软件可靠性分配问题提供了一个新的高效的解决途径。

参考文献:

- [1] 韩冰青, 高建华. 基于模拟退火遗传算法的软件可靠性分配及研究[J]. 计算机工程, 2003, 29(4): 67—69.
- [2] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Australia: Perth, 1995: 1942—1948.
- [3] 裴胜玉, 周永权, 罗淇方. 求解约束优化问题的混合粒子群算法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 5—8.
- [4] 黄少荣. 基于随机加速系数的粒子群优化算法[J]. 微电

子学与计算机, 2010, 27(6): 114—117.

- [5] Lyu M R. Handbook of software reliability engineering [M]. New York: McGraw Hill, 1996.
- [6] Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [C]// Proceedings of 1999 Congress Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999: 951—957.
- [7] Kennedy J, Eberhart R C. A new optimizer using particle swarm theory [C]// Proceedings of the sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nogoya, Japan, 1995: 39—43.
- [8] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [C]// Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. USA: Alaska, 1998: 69—73.

作者简介:

贾冀婷 女, (1978—), 硕士, 工程师. 研究方向为软件测试、智能优化算法.

(上接第 67 页)

- [3] Lehmann T M, Conner C, Spitzer K. Addendum: B-spline interpolation in medical image processing [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(7): 660—665.
- [4] 江巨浪. 基于改进 Catmull_Rom 样条的图像缩放算法 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(4): 211—217.
- [5] 张阿珍, 刘政林, 雒雪城, 等. 基于双三次插值算法的图像缩放引擎的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 49—51.
- [6] 冯华, 徐维朴. 一种视频图像分辨率提升的 VLSI 设计与

实现 [J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(1): 118—120.

- [7] 刘政林, 肖建平, 雒雪城, 等. 基于边缘的实时图像缩放算法研究 [J]. 中国图象图像学报, 2008, 13(2): 225—229.

作者简介:

魏美荣 女, (1984—), 硕士研究生. 研究方向为集成电路设计.

蒋林 男, (1970—), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为专用集成电路设计.