

# 基于误差修正的自适应边缘保持图像插值

申利平<sup>1</sup>, 李开宇<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300;  
2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:**传统插值算法容易产生细节模糊和边缘锯齿效应,而边缘是图像的重要信息,直接影响插值图像的视觉效果。为了解决这一问题,提出了一种新的基于误差修正的自适应边缘保持插值算法。首先将原图像向插值图像进行映射,再定义一个3×3的滑动窗口,用水平和垂直两个模板确定边缘类型,根据边缘类型进行插值,最后对仍未定义像素点用插值误差定理进行处理,总体上对所有像素都进行了分情况插值处理。实验结果表明,本算法有效地保持了图像的边缘信息,能够获得视觉质量较好的插值图像,且算法比较简单,容易实现。

**关键词:**图像插值;边缘;误差修正

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2011)02-0116-04

## Adaptive Edge-Preserving Image Interpolation Based on Error Correction

SHEN Li-ping<sup>1</sup>, LI Kai-yu<sup>2</sup>

(1. Engineering Technical Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Conventional interpolation algorithms suffer visually the effects of blurred details and jagged artifacts in image to some extent. Edges are important to an image and have direct effect on interpolation images. To solve these problems, a new algorithm for image interpolation based on error correction was proposed. Firstly, map the original image to the interpolation image. Then define a 3×3 sliding window and decide the type of edges using a horizontal and a vertical edge masks, interpolate the image according to the types of edges. Finally, evaluate the undefined pixels using interpolation error theorem. Experimental results show that the proposed method effectively maintains the edge information and can obtain better visual quality of interpolated images. The algorithm is simple and easy to implement.

**Key words:** image interpolation; edge; error correction

## 0 引言

图像插值已广泛应用于数字图像处理领域的很多方面,这些应用包括为适应特殊显示设备如液晶显示屏、等离子彩电、数字高清晰度电视等进行图像分辨率的转换;为用户专注于图像的某个细节或获得图像的整体概貌而进行图像的缩放;为进行图像几何变换进行图像的重采样等<sup>[1]</sup>。

传统的插值方法,如最近邻插值、线性插值、立方插值、样条插值算法<sup>[2]</sup>及对 Catmull-Rom 样条进行的改进算法<sup>[3]</sup>等简单,容易实现。但这些算法在物体的

边缘会出现模糊或锯齿现象。缩放后图像的边缘对一幅图像质量的好坏十分重要。为了保持良好的边缘特性,出现了很多基于边缘的插值算法<sup>[4-11]</sup>。例如文献[8]通过计算插值点邻域多个方向的相关性,在相关性最大的方向插值,文献[11]给出了一种新的边缘方向插值算法,文献[12]用矢量量化逼近的方法放大图像,以上这些算法一定程度上改善了图像边缘的模糊效应,但都存在算法复杂、运算速度慢的缺点。受文献[12]启发,文中提出了一种新的基于误差修正的自适应边缘保持插值算法。

此算法首先将原图像向插值图像进行映射,再用水平和垂直两个模板确定边缘类型,根据边缘类型进行插值,最后对仍未定义像素点用插值误差定理进行处理,算法简单,容易实现,一定程度上改善了传统算法的不足。

收稿日期:2010-06-10;修回日期:2010-09-10

作者简介:申利平(1981-),女,河北邢台人,助教,研究方向为数字信号处理、数字图像处理;李开宇,博士,副教授,研究方向为数字信号处理、数字图像处理和数据采集。

## 1 插值误差定理及误差修正方法

为了方便插值算法的描述,首先介绍一下插值误差定理及误差修正方法<sup>[13]</sup>。

### 1.1 插值误差定理

插值误差定理在数值方法课程中定义如下:

设区间被分割为  $\{a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b\}$ ,  $N$  次多项式  $p_N$  在插值节点处插值  $u$ 。如果对每一个  $x \in [a, b]$ ,  $u^{(N+1)}(x)$  存在,则存在一个点  $\xi \in [a, b]$ ,使得:

$$u(x) = p_N(x) + \frac{u^{(N+1)}(\xi)}{(N+1)!} \prod_{j=0}^N (x - x_j) \quad (1)$$

根据这个定理,当  $N=1$  时,对两点  $x_0$  和  $x_0 + h$ ,存在一点  $\xi \in [x_0, x_0 + h]$ ,使得:

$$u(x) = u(x_0) + \frac{u(x_0 + h) - u(x_0)}{h}(x - x_0) + \frac{u''(\xi)}{2}(x - x_0)(x - (x_0 + h)) \quad (2)$$

对于  $x = x_0 + \frac{j}{k}h$ , ( $k$  为整数 ( $k \geq 2$ )),  $j = 1, \dots, k-1$ ,  $\xi_j \in (x_0, x_0 + h)$ , 有:

$$u(x_0 + \frac{j}{k}h) = (1 - \frac{j}{k})u(x_0) + \frac{j}{k}u(x_0 + h) - \frac{u''(\xi_j)}{2} \frac{j(k-j)}{k^2} h^2 \quad (3)$$

特别的,当  $k=2$  且  $j=1$  时,即  $\xi_1 \in (x_0, x_0 + h)$ , 上述恒等式变为:

$$u(x_0 + h/2) = \frac{u(x_0) + u(x_0 + h)}{2} - \frac{u''(\xi_1)}{2} \frac{h^2}{4} \quad (4)$$

即在两点  $x_0$  和  $x_0 + h$  之间插入一点  $u(x_0 + h/2)$ 。

### 1.2 误差补偿方法

以一维信号  $u$  为例,如图 1 所示,取  $p \in (x_i, x_{i+1})$ ,  $u$  为待估计值,令  $p$  为  $x_i$  和  $x_{i+1}$  的中点:

$$p = x_{i+1/2} = (x_i + x_{i+1})/2$$

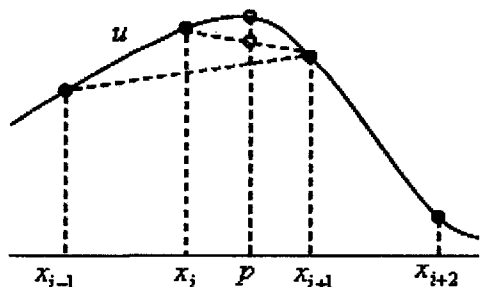


图1 一维信号插值示意图

令  $u_i = u(x_i)$ , 且对所有  $i$ , 有  $x_{i+1} - x_i = 1$ , 由公式(4)可得:

$$u(x_{i+1/2}) = \frac{u_i + u_{i+1}}{2} + C_{i+1/2} \quad (5)$$

其中  $C_{i+1/2}$  为误差修正值,对某一  $\xi_1 \in (x_i, x_{i+1})$ ,

其定义如下:

$$C_{i+1/2} = -\frac{u''(\xi_1)}{2} \frac{1}{4} = -\frac{u''(\xi_1)}{8} \quad (6)$$

误差修正值就是连接图 1 中两圈点的垂直距离。

由上式无法直接得到误差修正值  $C_{i+1/2}$ ,但是可以用下式近似计算得到:

$$C_L = u_i - \frac{u_{i-1} + u_{i+1}}{2}$$

$$C_R = u_{i+1} - \frac{u_i + u_{i+2}}{2} \quad (7)$$

例如:因为  $u_i = \frac{u_{i-1} + u_{i+1}}{2} + C_L$ , 对某  $\xi_2 \in (x_{i-1}, x_{i+1})$ , 从公式(4)可得:

$$C_L \approx -\frac{u''(\xi_2)}{2} \frac{2^2}{4} = -\frac{u''(\xi_2)}{2} \quad (8)$$

假设二阶偏导数  $u''$  在  $(x_{i-1}, x_{i+1})$  之间变化不大, 从式(6)和式(8)可得:

$$C_{i+1/2} \approx \frac{1}{4}C_L$$

由此可见,可以用  $C_L$  和  $C_R$  作为信号  $u$  的插值误差修正值。对一维信号插值进行误差修正可归纳如下:

$$u(x_{i+1/2}) \approx \frac{u_i + u_{i+1}}{2} + \frac{1}{4} \cdot \minmod(C_L, C_R) \quad (9)$$

其中  $C_L$  和  $C_R$  按下式定义:

$$\minmod(a, b) =$$

$$\begin{cases} a, & \text{if } ab > 0 \text{ and } |a| \leq |b| \\ b, & \text{if } ab > 0 \text{ and } |a| > |b| \\ 0, & \text{if } ab \leq 0 \end{cases}$$

Minmod 决定了误差修正的方向,当  $C_R$  和  $C_L$  符号不同时,  $(x_i, x_{i+1})$  之间不包含边缘或变形点,这样线性插值算法就能准确地估计  $u(x_{i+1/2})$ <sup>[13]</sup>。

## 2 文中算法介绍

以上介绍了误差修正方法,文中提出的图像放大算法就是基于误差修正的。整个图像放大过程主要分为以下三步:

第一步,将原始图像  $I_0(n \times n)$  放大为  $I_Z((2n-1) \times (2n-1))$ ,如图 2 所示。

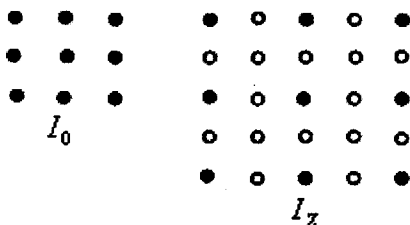


图2 原图像  $I_0$  和放大图像  $I_Z$

$I_0(i, j)$  代表原图像的第  $i$  行第  $j$  列,  $I_z(l, k)$  代表放大图像的第  $l$  行第  $k$  列, 这个映射过程  $E: I_0 \rightarrow I_z$  可描述如下:

$$E(I_0(i, j)) = I_z(l, k) = I_z(2i - 1, 2j - 1) \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

经过这个过程, 放大图像  $I_z(l, k)$  坐标  $l, k$  中至少一个为偶数的像素点 (即图 2 中白色圆点) 为待插值像素点, 将在后续过程中被赋值。

第二步, 图像中是否存在边缘对插值质量十分重要, 定义一个  $3 \times 3$  的滑动窗口 (见图 3), 4 个黑色圆点代表已定义像素, 其它未定义, 分别用一个水平模板  $M_h$  和垂直模板  $M_v$  检测图像中是否包含边缘 (见图 4)。图 4(c) 中四个字母代表放大图像  $I_z$  滑动窗口中的 4 个已定义像素。

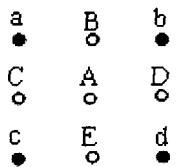


图 3 滑动窗口

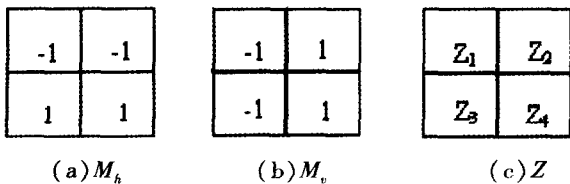


图 4 边缘模板和滑动窗 Z

确定未定义像素时, 需要判断滑动窗中是否含有边缘及所包含的边缘类型<sup>[12]</sup>:

(1) 如果  $\text{Max}(a, b, c, d) - \text{Min}(a, b, c, d) < TH_1$ , 则判定滑动窗为非边缘块, 定义

$$A = (a + b + c + d)/4, B = (a + A + b)/3, \\ C = (a + A + c)/3, D = (b + A + d)/3, \\ E = (c + A + d)/3,$$

其中  $\text{Max}$  和  $\text{Min}$  分别为已知像素  $a, b, c$  和  $d$  的最大值和最小值,  $TH_1$  为阈值;

(2) 令  $R_{mh} = \left| \sum_{i=1}^4 z_i \times M_{hi} \right|$ ,  $z_i$  和  $M_{hi}$  分别代表滑动窗  $Z$  和边缘模板  $M_h$  的第  $i$  个像素值, 令  $R_{mv} = \left| \sum_{i=1}^4 z_i \times M_{vi} \right|$ ,  $z_i$  和  $M_{vi}$  分别代表滑动窗  $Z$  和边缘模板  $M_v$  的第  $i$  个像素值, 根据  $R_{mh}$  和  $R_{mv}$  的计算结果来判定滑动窗所包含的边缘类型:

(2.1) 如果  $|R_{mh}|$  和  $|R_{mv}|$  均大于一个阈值  $TH_d$ , 则判定滑动窗为对角边缘块, 定义  $A = (a + d)/2$ 。

(2.2) 如果  $||R_{mh}| - |R_{mv}|| < TH_2$ , 则判定滑动

窗为锯齿边缘块, 定义:

$$A = \begin{cases} \frac{(a+b+c)}{3}, & \text{if } \left| \frac{(a+b+c)}{3} - d \right| > \left| a - \frac{b+c+d}{3} \right| \\ \frac{(b+c+d)}{3}, & \text{if } \left| \frac{(a+b+c)}{3} - d \right| < \left| a - \frac{b+c+d}{3} \right| \end{cases}$$

其中  $a, b, c$  和  $d$  按升序排列。

(2.3) 如果  $|R_{mh}| - |R_{mv}| > TH_3$ , 则判定滑动窗为水平边缘块, 定义

$$A = (a + b)/2, B = (a + A + b)/3, \\ C = (a + A + B)/3, D = (A + B + b)/3.$$

(2.4) 如果  $|R_{mv}| - |R_{mh}| > TH_4$ , 则判定滑动窗为垂直边缘块, 定义

$$A = (a + c)/2, B = (a + A + C)/3, \\ C = (a + A + c)/3, E = (A + C + c)/3.$$

第三步, 用误差修正的方法对至少有一个坐标为奇数的未定义像素点进行插值。

先对放大图像  $I_z(l, k)$  进行奇数行扫描, 未定义像素用误差修正定理进行行插值处理, 再对其进行奇数列扫描, 未定义像素点用误差修正定理进行列插值处理。对于坐标均为偶数的未定义像素点, 沿对角线方向进行误差修正, 至此, 放大图像  $I_z(l, k)$  中所有像素点均被定义。

### 3 实验结果分析

选用了 3 幅分辨率为  $512 \times 512$  的 Lena、Couple 和 Zelda 标准图像作为原始图像, 对原始图像进行降采样得到低分辨率图像, 然后分别用不同插值方法对低分辨率图像进行插值实验, 得到原始图像大小的插值图像, 将插值图像与原图像分别从客观和主观两个角度进行比较。通常采用峰值信噪比 (PSNR) 作为客观评价标准。比较结果见表 1。

其中最佳阈值参数  $TH_1$ 、 $TH_d$ 、 $TH_2$ 、 $TH_3$  经实验得出分别为 75, 5, 5 和 250。

表 1 各种插值算法结果比较 (PSNR)

	最近邻插值	双线性插值	双立方插值	文中算法
Lena	28.2959	29.6172	31.5444	32.9927
Couple	23.5299	23.6905	26.5481	26.7632
Zelda	32.1927	33.5199	33.4129	33.9984

图 5 和 6 分别是 Lena 局部 ( $256 \times 256$ ) 和文字图像“永”字 ( $128 \times 128$ ) 几种插值算法的视觉效果比较, 可以看出, 文中插值算法, 边缘块状效应、锯齿效应明显减少, 整体视觉效果比传统插值算法更好, Lena 局部图像帽子边沿处、头发处及“永”字的一撇和一捺等边

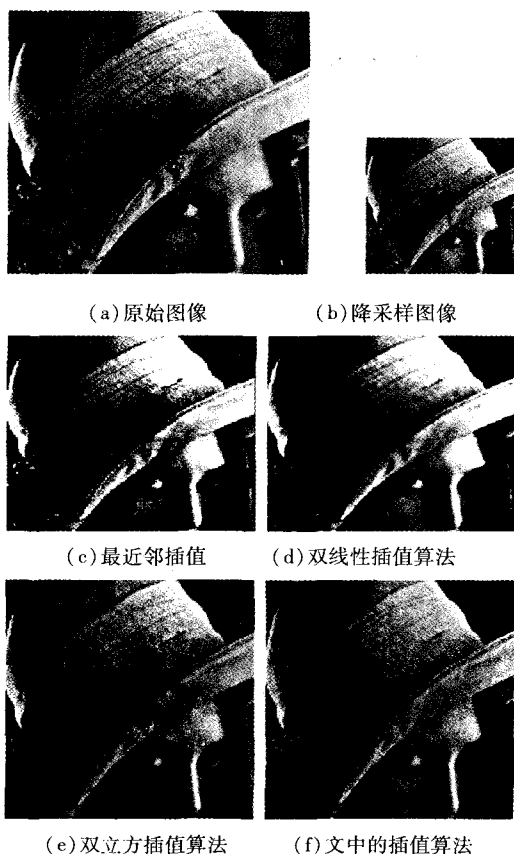


图5 Lena局部几种插值效果比较



图6 “永”字几种插值效果比较

缘处都比较清晰,有效地保留了图像的细节和纹理特征。

#### 4 结束语

文中提出的插值方法,用两个边缘模板来检测原图像中是否含有边缘,并确定边缘类型,进而分情况进行插值,充分利用了低分辨率图像的局部边缘信息,另外,对经前两步仍未定义的像素点用误差修正的方法进行处理,这样使得每一种像素点都有适合的定义方法,消除了插值图像产生的锯齿和模糊现象,保持了图像的边缘特征,获得了很好的插值效果。

#### 参考文献:

- [1] 王效灵,陈涛,汪颖,等.边缘自适应图像缩放算法[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(9):1507-1510.
- [2] Lehmann T M, Gonner C, Spitzer K. Addendum: B-spline interpolation in medical image processing[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(7):660-665.
- [3] 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.
- [4] 王立国,张晔,谷延锋.基于自适应边缘保持算法的图像插值[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(1):19-21.
- [5] 陈小藩,张俊,吴乐南.一种改进的边缘方向插值算法[J].中国图像图形学报,2004,27(6):684-686.
- [6] 高岚,方康玲,付旭,等.一种边缘保护的灰度图像插值算法[J].中国图像图形学报,2004,27(2):188-190.
- [7] 罗毅,文玉梅,肖义男.改进的 PDE 边缘保持图像插值算法[J].仪器仪表学报,2004,25(8):404-406.
- [8] 陈建辉,王博亮,徐中佑,等.一种自适应最大相关性数字图像插值算法[J].厦门大学学报(自然科学版),2005,44(3):355-358.
- [9] Battiato S, Gallo G, Stanco F. A new edge-adaptive zooming algorithm for digital images[C]//Proceedings of Signal Processing and Communications SPC. Marbella, Spain: [s. n.], 2000:144-149.
- [10] Battiato S, Gallo G, Stanco F. A locally-adaptive zooming algorithm for digital images[J]. Elsevier Image Vision and Computing Journal, 2002, 20(11):805-812.
- [11] Xin li, Orchard M T. New edge-directed interpolation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10):1521-1527.
- [12] Chang Chin-Chen, Chou Yung-Chen, Yu Yuanhui, et al. An image zooming technique based on vector quantization approximation[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(13):1214-1225.
- [13] Cha Y, Kim S. Error-Amended Sharp Edge (EASE) Schemes for Image Interpolation[C]//IEEE International Conference on Image processing. [s. l.]: [s. n.], 2006:701-704.