

基于模糊隶属度的图像空间距离修正插值算法*

徐 艳^{1)†} 董江涛²⁾ 王少华¹⁾

1)(军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

2)(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

(2010 年 1 月 8 日收到; 2010 年 2 月 6 日收到修改稿)

为解决传统图像插值算法存在的边缘模糊和边缘锯齿, 提出了一种基于像素点模糊隶属度的图像自适应插值方法. 该方法首先根据图像的梯度与相角特性, 确定像素点的模糊隶属度, 再根据图像的局部不对称性在一维方向上修正插值点空间距离, 并将一维修正结果转化到二维图像空间, 最终将修正后的空间距离应用到传统双线性插值和双立方插值中. 实验结果表明, 该算法改善了图像的信噪比, 有效抑制了边缘锯齿和边缘模糊的发生.

关键词: 模糊隶属度, 空间距离, 图像插值

PACC: 0210, 4230V

1. 引 言

受到光学成像系统或传输设备的制约, 计算机经常面临用不完备的数据进行图像重建的问题, 其结果必然造成图像质量的下降^[1]. 解决这一问题的一个有效途径就是对图像进行插值运算, 利用插值算法提高图像质量.

在图像插值技术中, 消除插值图像边缘细节模糊是提高图像整体视觉效果的关键, 而造成边缘模糊的主要因素就是插值函数和插值点位置的选择: 如果插值函数选择不当, 必然导致截断误差增大. 理论上和计算实践都说明高次插值不可取, 因此实际中, 通常采用分段低次插值方法^[2]. 最常用到的图像插值方法有最临近插值法^[3]、双线性插值^[4]、双立方插值^[5]等, 这些插值函数都具有低通特性, 不同程度上抑制了高频成分, 导致图像边缘模糊或图像存在边缘锯齿问题^[6]; 影响插值结果的另一主要因素为插值点位置的选择, 如果在插值过程中更加合理的选择插值点的位置, 势必能够减小截断误差, 从而达到提高图像质量的目的.

本文基于图像像素点的梯度和相角特性, 首先将图像空间点坐标进行修正, 即合理确定插值点位置, 随后利用双线性和双立方插值算法对低分辨率图像进行插值处理, 通过插值点空间距离修正来解

决传统插值算法中的边缘模糊或者锯齿问题, 从而得到高质量图像.

2. WaDi 空间距离修正方法

由于受到图像采集设备的限制, 在获取自然图像时, 图像的阶跃边缘通常会转化为 sigmodal 边缘^[7], 将其表示成一维形式, 如图 1 所示.

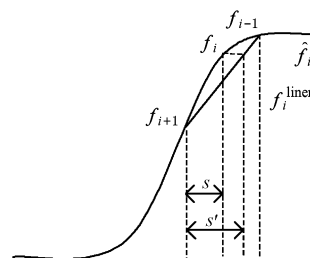


图 1 sigmodal 边缘一维表示形式

图 1 中, f_i 为理想的插值结果, f_i^{linear} 为线性插值的结果, 为使线性插值结果更加接近理想值, 可以对插值点位置(即空间距离)进行修正, s 为线性插值位置, s' 为修正后的空间距离, 从图上可以看出, 在 s' 点进行插值处理的截断误差要小于在 s 点直接进行插值的结果, 即空间距离修正后的线性插值结果将更加接近于理想值.

WaDi 插值算法对空间距离的空间不对称性修

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA701206)资助的课题.

† E-mail: hub_ami@163.com

正通过下式完成:

$$s' = s - kAs(s - 1), \quad (1)$$

式中, A 为插值点临域的几何相似性参数,

$$A = \frac{|f_{i+1} - f_{i-1}| + |f_{i+2} - f_i|}{L - 1}. \quad (2)$$

式中, L 为图像灰度级数, k 为修正因子, 通常取 1 或 2.

将修正后的空间距离 s' 取代 s , 进行线性插值运算的方法即为 WaDi 插值算法.

3. 基于局部特征的插值方法

WaDi 插值算法从图像全局的灰度级入手, 在一定程度上忽略了图像的局部特性; 为了适应图像中边缘的变化, 希望插值具有以下优点: 1) 局部性, 能够利用图像局部特性更加完善地表现图像的插值; 2) 对于每一个局部, 都有相应的参数与之对应, 以便于局部修改^[8]. 在经典的空域算法中, 通常需要对原始图像进行梯度运算^[9], 文献^[10]中定义了图 2 所示的图像局部梯度特征块.

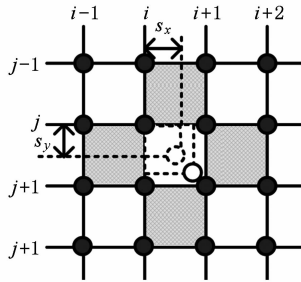


图 2 图像局部梯度特征块示意图

在插值点上、下、左、右四个方向上定义四个局部特征区域(又称掩模), 分别求取四个掩模的梯度权值, 即

$$\begin{aligned} H_{\text{Left}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i,j} - f_{i-1,j}| + |f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|)}}, \\ H_{\text{Right}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i+1,j} - f_{i+2,j}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|)}}, \\ V_{\text{Up}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i,j} - f_{i,j-1}| + |f_{i+1,j} - f_{i+1,j-1}|)}}, \\ V_{\text{Down}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i+1,j} - f_{i+2,j}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|)}}. \end{aligned} \quad (3)$$

利用(3)式得到各掩模的局部梯度特征权值, 将这些梯度特征权值应用到传统的双线性或双立

方插值中即得到文献^[8]中的 A-Bilinear 和 A-Bicubic 算法.

在 A-Bilinear 和 A-Bicubic 算法中方法存在两个比较明显的局限性:

1) 用同一梯度权值表示图像在水平或垂直方向上的梯度特征并不恰当: 以 H_{Left} 为例, 式中 $|f_{i,j} - f_{i-1,j}|$ 和 $|f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|$ 并不一定相等, 即左右两侧的梯度特征块对插值点影响可能不同, 将使插值算法不能准确反映图像的梯度特征.

2) 梯度权值对斜边缘可能无效, 以 45° 斜边缘为例, 按照(3)式的方法计算梯度权值, 以水平方向为例, 当图像存在 45° 斜边缘时,

$$|f_{i,j} - f_{i-1,j}| \approx |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|,$$

$$|f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}| \approx |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|.$$

由此可以看出, 在 45° 斜边缘状态下, 该算法的空间距离修正失效, 进而导致斜边缘的锯齿现象的发生.

4. 基于图像梯度和相角信息的空间距离修正方法

将图像像素点的梯度与相角信息相结合得到的信息更能够体现图像的特性^[11], 本文在(3)式算法的基础上, 建立像素之间的模糊关系^[12], 计算得到插值点的隶属度函数, 作为空间距离修正的权值, 从而得到一种新的空间距离修正方法.

4.1. 隶属度函数的确定

模糊关系可以用来描述图像中像素间的关联程度^[13], 对图像中的每一个像素点 (x, y) , 都通过(4)式求得其隶属度函数 $\mu(x, y)$, 即

$$\begin{aligned} \mu(x, y) &= k_1 [\max(\mu_g(x, y), \mu_p(x, y))] \\ &\quad + k_2 [\min(\mu_g(x, y), \mu_p(x, y))], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mu_g(x, y)$, $\mu_p(x, y)$ 分别表示像素点的梯度, 相角信息的隶属度函数. 利用模糊逻辑将多种信息加以融合来表示同一像素点的隶属度, 使像素点信息更加丰富.

用 $S_p(x, y, x', y')$ 表示点 (x, y) 与种子点 (x', y') 的相似程度. 这样, $\mu(x, y)$ 可以如下式表示:

$$\begin{aligned} \mu(x, y) &= S_p(x, y, x', y') \\ &= k_1 [\max(S_{s_1}(x, y, x', y'), S_{s_2}(x, y, x', y'))] \\ &\quad + k_2 [\min(S_{s_1}(x, y, x', y'), S_{s_2}(x, y, x', y'))], \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $S_{s1}(x, y, x', y')$ ($i = 1, 2$) 分别为 $\mu_g(x, y)$, $\mu_p(x, y)$ 具体表达形式.

$S_{s1}(x, y, x', y')$ ($i = 1, 2$) 由点 (x, y) 与种子点

$$S_{s1}(x, y, x', y') = \begin{cases} 1, & |\Delta P(x, y)| \geq P_{\text{similar}}, \\ 1 - \frac{|\Delta P(x, y)| - P_{\text{different}}}{P_{\text{similar}} - P_{\text{different}}}, & P_{\text{different}} < |\Delta P(x, y)| < P_{\text{similar}}, \\ 0, & |\Delta P(x, y)| \leq P_{\text{different}}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 P_{similar} 和 $P_{\text{different}}$ 两个参数分别代表点 (x, y) 与种子点 (x', y') 特征相似或不同的临界值.

当 $\Delta P(x, y)$ 表示梯度差量时, 可具体写成 $\Delta G(x, y)$, 代表点 (x, y) 与种子点 (x', y') 之间归一化了的梯度差

$$\Delta G(x, y) = (\nabla f(x, y) - \nabla f(x', y')) / \nabla f(x, y), \quad (7)$$

式中, ∇f 为像素点的梯度值; 同样, $\Delta\alpha$ 代表点 (x, y) 与种子点 (x', y') 之间的相角差, α 表示像素点的相角

$$\Delta\alpha(x, y) = \alpha(x, y) - \alpha(x', y'). \quad (8)$$

计算过程中, 利用文献[14]的方法寻找边缘, 并计算 8-邻域范围内的图像各点的 $\mu(x, y)$, 直至整幅图像遍历完毕, 从而确定出所有像素的 $\mu(x, y)$.

4.2. 边缘自适应梯度插值方法

利用 4.1 确定的像素点的隶属度作为权值修正因子, 并对预定插值点一维方向上的空间距离进行修正, 图 3 中黑色实心圆点为原始图像中像素点的位置. 虚线所示空心圆点所示的点的位置为预定插值点 s , 实线所示空心圆点的位置为进行空间距离修正后的位置 s' .

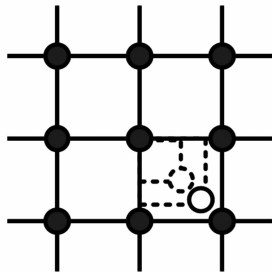


图 3 空间距离修正模型

比较预定插值点邻域范围内的隶属度的大小, 根据下式计算 s' 的位置:

(x', y') 间的差异值 $\Delta P(x, y)$ 决定, $\Delta P(x, y)$ 表示梯度差异 $\Delta G(x, y)$ 、相角差异 $\Delta\alpha(x, y)$

$$\begin{aligned} s'_{x1} &= \frac{\mu(i+1, j)s_x}{\mu(i, j)(1-s_x) + \mu(i+1, j)s_x}, \\ s'_{x2} &= \frac{\mu(i+1, j+1)s_x}{\mu(i, j+1)(1-s_x) + \mu(i+1, j+1)s_x}, \\ s'_{y1} &= \frac{\mu(i, j+1)s_y}{\mu(i, j)(1-s_y) + \mu(i, j+1)s_y}, \\ s'_{y2} &= \frac{\mu(i+1, j+1)s_y}{\mu(i+1, j)(1-s_y) + \mu(i+1, j+1)s_y}, \end{aligned} \quad (9)$$

上式得到了一维的空间修正距离 $s'_{x1}, s'_{x2}, s'_{y1}, s'_{y2}$, 为了将这些一维空间距离转化为二维空间的修正距离, 利用文献[6]的方法进行, 最终得到修正后的图像插值点的二维坐标, 计算公式为

$$\begin{aligned} s'_x &= \frac{s_{x1} + (s_{x2} - s_{x1})s_{y1}}{1 - (s_{y2} - s_{y1})(s_{x2} - s_{x1})}, \\ s'_y &= \frac{s_{y1} + (s_{y2} - s_{y1})s_{x1}}{1 - (s_{y2} - s_{y1})(s_{x2} - s_{x1})}. \end{aligned} \quad (10)$$

本文由于采用了梯度、相角信息的融合来指示图像各个像素点的信息, 尽管在梯度计算中会存在梯度相等的情况, 但是像素点的相角信息不同, 使得各个像素点隶属度有所区别, 只要合理选择隶属度计算中的参数 k_1, k_2 , 就可以调整在不同图像条件下的结果, 使最终修正的空间距离能够正确反应图像的边缘信息.

5. 算法步骤

对待处理图像 $f(x, y)$ 进行插值处理, 为了保证插值后的图像能够真实的反应图像的细节信息, 利用图像相邻像素的隶属度作为空间距离修正的参数, 将空间不对称型的空间距离修正与基于图像像素的梯度、相角信息相结合, 充分利用图像的空间不对称性, 最终完成插值运算. 具体算法步骤如下:

1) 按照(1)式分别对插值点空间距离进行水

平、垂直方向上的 1 维空间不对称性修正,得到 s'_{ox}, s'_{oy} .

2) 按照 4.1 的方法确定出各插值点邻域内各点的隶属度.

3) 根据(9)式对 s'_{ox}, s'_{oy} 进行 1 维的基于隶属度的修正,得到 $s'_{x1}, s'_{x2}, s'_{y1}, s'_{y2}$, 并根据(10)式将一维的空间修正距离转化为二维的空间修正距离 s'_x, s'_y .

4) 用修正后的空间修正距离 s'_x, s'_y 取代原始的预定的插值点 s_x, s_y , 按照传统的双立方插值或双线性插值对原始图像进行插值处理, 得到最终的插值图像.

6. 实验结果

在对图像进行评价时,通常采用的图像评价标准有:信噪比(SNR), 峰值信噪比(PSNR), 均方误差(MSE), 图像表述归一化均方误差(NMSE). 为了充分体现本文算法的优越性,进行了以下实验.

对灰度图像 Lena (512×512) 进行隔行隔列下采样,得到质量下降的图像 (256×256), 然后利用文献[10]的算法和本文改进的算法对缩小后的图像插值处理,将图像恢复为 512×512 大小. 在计算隶属度时,梯度 $\Delta G(x, y)$ 的相似和不同的阈值分别取为 0.1545 和 0.0927, 相角 $\Delta\alpha(x, y)$ 相似和不同的阈值分别取为 70° 和 10° , $k_1 = k_2 = 0.5$.

由于插值算法和空间距离修正方法的不同,插值后的结果图像也不同,利用 SNR, PSNR, MSE 和 NMSE 对插值结果进行分析评价,评价结果如表 1 所示.

表 1 不同方法下的插值评价结果

评价指标	A-Bilinear	A-Bicubic	F-Bilinear	F-Bicubic
SNR	2.5044	2.4191	5.1312	5.0941
PSNR	29.0863	29.0010	31.7694	31.7323
MSE	63.5942	64.8566	34.2857	34.5798
NMSE	0.2577	0.2628	0.1389	0.1401

表 1 中 A-Bilinear 和 A-Bicubic 表示文献[11]的算法结果, F-Bilinear 和 F-Bicubic 为本文算法结果.

由表 1 可见,本文算法信噪比和峰值信噪比两

项指标比文献[10]中的算法提高了 2—3 dB; 从误差角度看,本文算法插值结果的均方误差和图像表述归一化均方误差均比文献[11]的减小了将近 1/2, 从而更加能够显示出本文算法的优越性.

图 4 是取 Lena 图像的局部进行实验的结果, 上两幅图像为采用文献[10]的空间距离修正方法进行双线性插值和双立方插值后的结果(A-Bilinear 方法和 A-Bicubic 方法), 图 4(c), (d) 为本文采用的空间距离修正后进行双线性插值和双立方插值后的结果(F-Bilinear 方法和 F-Bicubic 方法). 可以看出, 上两幅图像对于水平或垂直方向的边缘插值基本与原图保持一致, 但是当图像中存在斜边缘时, 如帽沿部分, 插值结果中的锯齿现象就比较严重; 图 4(c), (d) 中, 虽然斜边缘部分仍然存在锯齿现象, 但是此时的边缘失真要明显小于图 4(a), (b).

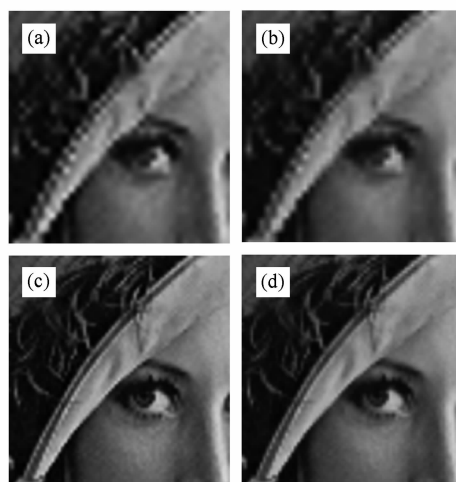


图 4 不同插值方法的比较 (a) A-Bilinear 方法; (b) A-Bicubic 方法; (c) F-Bilinear 方法; (d) F-Bicubic 方法

7. 结 论

在传统双线性插值和双立方插值的基础上, 充分利用图像像素点在梯度和相角方面的特性, 将模糊隶属度融入到插值算法中, 改进插值点空间距离修正的计算方法, 使得插值后的图像能够有效保护水平、垂直和斜方向的边缘, 在一定程度上解决了图像插值过程中的边缘模糊和边缘锯齿问题. 在工程应用中, 该算法可以广泛应用到图像质量改善和图像缩放处理中.

- [1] Xiang L Z, Xing D, Guo H, Yang S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4610 (in Chinese) [向良忠、邢 达、郭 华、杨思华 2009 物理学报 **58** 4610]
- [2] John H M, Kurtis D F 2009 *Numerical Methods Using MATLAB* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p144
- [3] Thévenaz P, Elu T B, Unser M 2000 *IEEE Transactions on Medical Image* **7** 739
- [4] Natale F D, Desoli G S, Giusto D D 1993 *IEEE Electronics Lett.* **9** 1638
- [5] Keys R G 1986 *IEEE Trans. Sign. Proces.* **29** 1153
- [6] Zhang M Y, Wang X T, Xu X G 2009 *Journal of Image and Graphics* **14** 853 (in Chinese) [张美玉、王孝通、徐晓刚 2009 中国图像图形学报 **14** 853]
- [7] Shuai Y, Massahide A A T, Masayuki K 2005 *Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems* p85
- [8] Wang Q, Tan J Q, Hu M 2007 *Journal of Computer-aided Design&Computer Graphics* **19** 1348 (in Chinese) [王强、檀结庆、胡 敏 2007 计算机辅助设计与图形学学报 **19** 1348]
- [9] Gonzalez R C, Woods R E 1992 *Digital Image Processing* (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) p402
- [10] Hwang J W, Lee H S 2004 *IEEE Trans. Sign. Proces. Lett.* **3** 359
- [11] Sendur L, Selesnick I W 2002 *IEEE Trans. Sign. Proces.* **50** 2744
- [12] Bezdek J C 1981 *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms* (New York: Plenum Press) p39
- [13] Liang Y M, Zhai H C, Mu G G 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2671 (in Chinese) [梁艳梅、翟宏琛、母国光 2002 物理学报 **51** 2671]
- [14] Zong X P, Xu Y, Dong J T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3223 (in Chinese) [宗晓萍、徐 艳、董江涛 2006 物理学报 **55** 3223]

Adaptive image interpolation algorithm based on the fuzzy logic *

Xu Yan^{1)†} Dong Jiang-Tao²⁾ Wang Shao-Hua¹⁾

1) (Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

2) (The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

(Received 8 January 2010; revised manuscript received 6 February 2010)

Abstract

Conventional image interpolation algorithm always introduces the blur and jagged edges. To solve this problem, an improved adaptive image interpolation algorithm with using membership function is proposed in this paper. Fuzzy logic is used to obtain the membership function with the local characteristics of the gradient and phase angle. The first step is to correct the special distance of interpolated pixels along one dimension in the basis of local asymmetry features and the membership function, and then to convert the corrected distance of one dimension into two dimensions, applying the corrected distance to conventional image interpolation algorithm. Experimental results demonstrate that the improved algorithm can produce better results in regard to the signal-to-noise ratio and succeed in preserving interpolation image edges in various directions.

Keywords: membership function, distance, image interpolation

PACC: 0210, 4230V

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA701206).

† E-mail: hbu_ami@163.com