

基于小波的方向自适应图像插值

程光权 成礼智

(国防科学技术大学理学院 长沙 410073)

摘要: 图像插值是图像处理的一项重要技术,经典的插值算法会产生细节模糊和边缘锯齿现象。该文提出一种基于小波的方向自适应图像插值方法,将小波变换思想和局部方向自适应插值方法结合。为了获得清晰的细节部分,对图像实施改进的方向自适应双线性插值;结合小波方法,提高插值图像的高频细节信息,并进行相关后处理,增强视觉效果。实验结果表明,该文方法插值后的图像边缘清晰光滑,有效抑制了边缘模糊和锯齿现象,相比较传统方法,插值图像的客观质量和视觉效果都得到明显增强,更加适合人眼视觉系统。

关键词: 图像插值; 小波变换; 方向预测; 双线性插值; 边缘保护

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0265-05

Direction Adaptive Image Interpolation via Wavelet Transform

Cheng Guang-quan Cheng Li-zhi

(Science College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Image interpolation is an important technique of image processing. The blur and jaggy of image details or edges are inevitable during conventional image interpolation. In order to obtain interpolation images with better quality, the improved bilinear interpolation method with adaptive direction is applied to the image. Wavelet is implemented to provide more high frequency information, post-processing is applied to improve the visual quality of interpolation images. The experiments show that the interpolation images have much clearer edge, and much smoother along their direction. The results effectively remove the jaggy and blur at the edge. The subjective quality and visual effect of images interpolated using the proposed method have obviously improved, which is more in accord with the human visual system characteristic.

Key words: Image interpolation; Wavelet transform; Direction predict; Bilinear interpolation; Edge-preserving

1 引言

图像插值技术通常是指在不改变观测系统的前提下,利用已经获得的低分辨率图像插值得到较高分辨率的方法。图像插值有着十分重要的应用,如在医学成像系统、航空航天等领域已得到广泛的应用。

研究表明,人眼对图像的边缘纹理等细节部分特别敏感,插值后图像细节部分的视觉效果对一幅图像质量有十分重要的影响。因此,一个好的图像插值方法应该既能保证图像的清晰度,又能保持图像边缘的光滑性。已有的一些经典算法^[1]如最近邻点插值,双线性插值,双立方插值等,不能很好地抓住边缘处图像的统计信息,插值图像在边缘处会出现模糊或锯齿等现象,严重影响了插值图像边缘的视觉效果。为了更好地表现插值图像细节部分,提出了基于图像边缘方向的插值方法, Li 等^[2]以边缘为导向,利用局部邻域的统计和边界信息对图像进行插值, Hwang 等^[3]根据局部梯度

信息对双线性和双三次插值进行修正。这类方法能够得到较为清晰的边缘,但是大多计算复杂,且需要对边界给出阈值,不同的边界阈值有不同的效果。近年发展迅速的小波理论,在图像插值领域得到了广泛应用,提出了许多新的方法^[4],但是单独应用小波非线性插值的结果仍然不能令人满意。本文在前人研究的基础上,提出基于改进小波的方向自适应图像插值方法,考虑将小波变换和方向自适应插值结合,改进传统的小波变换方法,在预测的纹理方向上实施小波变换,有效地降低高频系数的相关性,同时确定图像的方向流,在插值过程中,根据纹理和边缘方向,考虑梯度信息,调整插值核函数及权值,局部自适应地应用双线性插值方法。本文方法在改进图像边缘处插值效果的同时,保证了纹理信息区域插值得到改进,插值方法能够有效保护图像边缘和纹理信息,边缘和纹理信息更加光滑清晰,有效抑制锯齿现象,细节信息丰富,更加符合人眼的视觉原理。

2 方向自适应插值

2.1 经典插值方法及其改进

图像插值可以简单的理解为利用周围邻域已知的像素

2007-07-23 收到, 2008-01-04 改回

国家自然科学基金(60573027)和全国优秀博士学位论文作者专项资助(200543)资助课题

点, 加权平均估计未知的插值点灰度值。经典的双线性插值模型如图1所示, 实点 $F(i, j)$ 、 $F(i+1, j)$ 、 $F(i, j+1)$ 和 $F(i+1, j+1)$ 是整数像素点, 空心点 $F(i+u, j+v)$ 为需要插值点, 经典双线性插值方法如式(1)所示。

$$F(i+u, j+v) = (1-u)(1-v)F(i, j) + (1-u)vF(i, j+1) + u(1-v)F(i+1, j) + uvF(i+1, j+1) \quad (1)$$

这里, $F(i, j)$ 代表图像在 (i, j) 点的灰度值, u 、 v 代表需要插值点距离 (i, j) 点的水平和竖直距离。双线性插值方法没有考虑该点具有的方向性, 应用的模型简单, 不能抓住图像边缘与纹理发展的统计信息, 产生细节模糊和锯齿现象^[5], 降低了对比度使得整体图像变暗。后面的实验结果也说明了这点。

图像边缘处存在这样的事实: 沿着边缘方向, 图像灰度值变化缓慢, 而跨越边缘时, 图像灰度值变化剧烈。经典的线性插值方法忽略了这个性质, 没有考虑到图像中奇异点的这种几何结构, 在边缘和纹理区域插值时, 不是沿着这个方向进行插值, 从而在边缘和纹理处出现锯齿和模糊现象。因此为了获取插值图像清晰的纹理和边缘, 改进方法在进行插值运算时, 必须考虑该点的方向性, 调整插值核函数, 使得核函数能够自适应于图像局部内容, 插值获取的图像不破坏原图像局部区域的纹理和边缘的方向性。考虑方向性时, 插值时就不能像双线性插值法简单地利用相邻的4个像素点, 必须考虑插值点处的方向, 选择合适的像素点进行加权平均。如图2所示, 设虚线 l 为经过插值点 $(i+u, j+v)$ 的纹理边缘方向, 进行插值时, 选择经过该点方向上的平行四边形区域相邻的4个整数像素点, 进行加权平均。如图2所示中, 设 A, B, C, D 为 $(i+u, j+v)$ 在方向 l 上的4个相邻点, 此时方向自适应插值方法可以表示为

$$F(i+u, j+v) = a_1A + a_2B + a_3C + a_4D \quad (2)$$

其中 a_i 为各点的加权系数, 用 A, B, C, D 代表该点像素的灰度值。通常方法如双线性插值法中, 参数 a_i 的设计仅由插值点到核函数区域边界的距离决定, 没有考虑各点奇异变化的情况, 导致插值图像平滑模糊, 因此选择参数时候, 除了考虑距离因素, 还应该根据图像局部特征, 考虑各点的梯度信息^[3], 自适应调整参数, 使得插值结果边缘和纹理更加尖锐。

2.2 权值和方向选择

采用新的自适应于图像局部方向的核函数, 可以得到更加清晰的边缘和纹理信息。但在新的插值公式(2)中存在两个

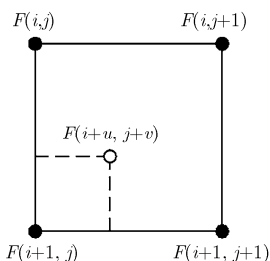


图1 经典双线性插值方法

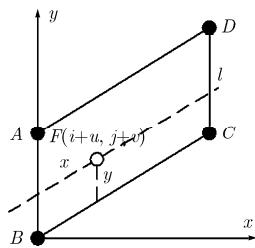


图2 方向自适应双线性插值方法

问题: 插值点方向上相邻点 A, B, C 和 D 的选择以及权值 a_i 的设计。前者的核心就是如何确定经过插值点 $(i+u, j+v)$ 的边缘或纹理方向; 后者的核心就是在确定了插值点的方向以后, 如何根据各点在该方向上的梯度值和插值点位置设计权值。

首先考虑方向的确定。为了简化计算, 事先将图像进行分块, 在同一个子块中, 只有唯一的方向, 所有子块的方向组成整个图像的“方向流”。子块方向确定的方法很多, 但传统的方法大多是基于边缘检测的, 这是由于传统插值方法只考虑边缘区域, 没有考虑图像纹理区域也具有方向性, 本文从另外一个角度考虑方向的选择, 根据小波变换的特点来确定图像的方向流。类似的思想在图像压缩中已有讨论^[6], 经典小波变换仅在图像的水平或竖直方向进行, 从而只能选择出水平、竖直和对角线方向的信息, 如果事先知道了子块图像的正则方向(即方向流), 那么沿着这个方向进行小波变换的效果应该最好, 变换结果的能量将更大地集中于低频部分。正是基于这个先验信息, 通过小波变换来确定每个子块的方向性。同样的为了降低计算复杂度, 将方向选择限制在有限几个方向上, 本文设方向集合为 $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8$, 共计8个方向, 如图3所示。

根据上面的讨论, 可以确定基于小波的方向选择实现步骤如下:

- (1) 在每个允许的方向对图像应用小波滤波;
- (2) 对滤波图像分割成大小为 $K \times L$ 的子块图像;
- (3) 计算每个子块在所有允许方向上滤波后高频能量;
- (4) 选择对应高频能量最小的方向作为这个子块的自适应变换方向;
- (5) 确定每个子块图像的方向, 构成整个图像的方向流。

通过上述过程确定的图像的方向流, 是根据图像局部内容自适应变化的, 平行于局部图像的边缘和纹理的方向, 试验中分块大小选择设为 4×4 。小波变换的提升格式^[7]在降低计算量的同时, 可以实现即位运算, 非常适合本文方向预测中应用的小波变换。经过上述处理, 解决了自适应插值方法中方向确定的问题。确定了方向以后, 选择插值点在这个方向上相邻的像素点就变得容易了。需要说明的一点是, 由于仅选择有限几个离散方向, 存在一定的误差, 因此确定方向以后, 本文没有采用沿方向进行一维插值^[8], 而是选择了平行四边形区域进行插值。设插值点所在子块的方向为 θ , 通过该插值点方向为 θ 的一条直线设为 l , 根据 θ 的范围, 根据下面的规则^[5]选择相邻像素点: (1) 若 $\pi/4 \leq \theta < 3\pi/4$ 时, l 与竖直网格线相交点设为 t_1, t_2 , 此时, 选择与 t_1, t_2 上下相邻的4个像素点作为插值点在该方向上的相邻点; (2) 若 $0 \leq \theta < \pi/4$ 或 $3\pi/4 \leq \theta < \pi$, l 与水平网格线相交点设为 t_3, t_4 , 此时选择与 t_3, t_4 左右相邻的4个像素点为需要的相邻点。

下面考虑每点考虑局部图像的特征^[4], 如图4所示, 以

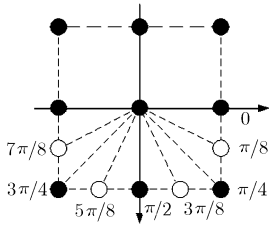


图 3 方向选择

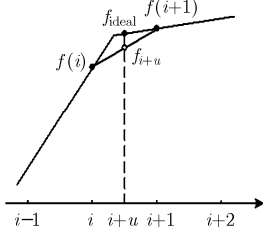


图 4 一维双线性插值

一维信号插值为例, f_{i+u} 为经典线性插值方法得到的插值点, f_{ideal} 为该点的真实值, 由于仅考虑插值点的距离因素, f_{i+u} 不能准确地反映真实值。直观上可以看出, 插值应该和 f_{i+1} 较接近, 这是由于 f_{i+1} 处梯度较小, 在二维图像插值中存在类似的情形。因此, 需要修改传统的权值设定, 如前讨论, 权值的设计还应考虑相邻各点的梯度信息, 与其梯度成反比, 即每点的加权系数是该点在插值区域中位置和相邻各点梯度的函数, 因此, 这里将式(2)中的权值设计为

$$\alpha_i = s_i / \sqrt{1 + r g_i} \quad (3)$$

其中 s_i 表示插值点与第 i 个相邻点的位置参数, g_i 表示第 i 个相邻点的方向梯度值, 参数 $0 \leq r \leq 1$ 。调整参数 r 可以修正梯度与距离在权值中的重要性, 如 $r=0$ 时, 就类似于经典双线性插值方法中的参数设定了, 本文试验中取 $r=0.2$ 。权值确定以后代入式(2)中需进行归一化处理。经过上面的修改, 插值核函数能够自适应于图像的局部内容, 可以有效地抑制锯齿现象的产生, 有效地保护图像中边缘和纹理信息, 使得插值图像边缘和纹理处更加清晰。

3 基于小波的自适应插值方法

第 2 节讨论了经典双线性插值方法不足, 改进的方法可以抑制锯齿现象的产生, 保护边缘和纹理信息, 但由于线性插值方法不能提供更多的高频信息^[4], 改进的方法仍然会存在这个问题, 从而引起插值图像整体较暗。因此, 尝试用一些非线性方法从低分辨率图像中预测高分辨率图像的精细结构, 小波分析由于其良好的多分辨分析功能, 可以将图像分解成不同频率特性、方向特性的信号, 更加适合人眼的视觉特性, 在图像处理的各个领域都得到了广泛的应用。在插值问题中, 低分辨率的图像其细节和边缘信息损失较多, 这部分正是人眼较为关注的, 而小波分解各层之间是具有相似性的, 因此可以采用基于小波的插值方法, 根据低频图像预测损失掉的高频细节部分, 再通过逆变换获得高分辨率图像, 这种方法得到的插值图像将更加适合人类的视觉系统特性, 近年已出现一系列基于小波的插值方法^[4], 获得很好的插值效果。

高分辨图像经过小波分解可以得到 4 个子带图像 LL, LH, HL 和 HH, 如图 5 所示。基于小波的方法通常认为给定的低分辨率图像是高分辨率图像滤波后采样的低频部分, 即在图 5 中 X 为高分辨率图像, LL 为其分解的低频子带,

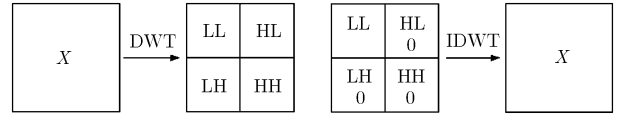


图 5 传统小波插值方法

然后认为给定的低分辨率图像就是 LL, 那么在图像插值中, 剩下的关键就是如何从低分辨率图像出发估计高频子带 LH, HL 和 HH, 通常方法将其余高频子带补零, 重构就得到需要的高分辨率图像, 这种方法不能提供插值图像的高频信息, 图像细节不丰富。根据小波分解子带分解系数相关性的特性, 这里建立本文方法, 将原图像按照第 2 节介绍的方法进行方向自适应插值, 对获得的插值图像进行小波分解得到细节部分高频子带 LH, HL, HH, 将这 3 个高频子带作为小波逆变换的高频部分, 将原始图像作为小波逆变换的低频部分, 进行小波逆变换, 就得到了需要的高分辨率图像, 其中小波变换采用改进的方向预测小波变换^[6]。通过上述讨论, 可以发现基于小波的方向自适应插值方法在图像边缘和纹理区域都得到了考虑, 整体插值图像的边缘和纹理方向保持清晰, 有效抑制锯齿现象的产生, 通过小波的多分辨分析结构, 有效预测高频细节部分, 使得插值图像整体自然真实, 更加适合人眼视觉系统。

4 插值图像后处理

通过上述方法产生的插值图像可以克服传统方法的不足, 但是在实际情况中, 低分辨率图像存在着噪声等污染, 边缘等细节部分对比度不够, 为了提高插值图像视觉效果, 这里进行相关增强处理。

含噪图像增强问题的一个主要难点是凸显高频细节部分的同时, 将不可避免地放大噪声, 结果是增强后的图像淹没在更严重的噪声中。为了避免出现这种情况, 我们注意到自然图像中边缘信息是有几何结构的, 通常沿着某个曲线连续, 而噪声就没有这种几何结构信息。从这点出发, 区别噪声和边缘, 对变换系数分为 3 类: 强边缘、弱边缘、噪声。设每个像素点在所有子带上的均值和最大值为 $mean$ 和 max , 分类规则^[10]为

$$\left. \begin{aligned} & \text{强边缘, } mean \geq c\sigma \\ & \text{弱边缘, } mean < c\sigma, max \geq c\sigma \\ & \text{噪声, } mean < c\sigma, max < c\sigma \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 σ 是子带的标准噪声方差, c 为一个取值在 1 和 5 之间的参数。图像增强的目标是放大弱边缘等细节信息, 同时抑制噪声。为了达到这个目的, 根据上面的分类, 用下面的非线性映射函数^[9]修正小波系数。

$$y(x) = \begin{cases} x, & \text{强边缘点} \\ \max\left(\left(\frac{c\sigma}{|x|}\right)^p, 1\right)x, & \text{弱边缘点} \\ 0, & \text{噪声点} \end{cases} \quad (5)$$

这里 x 为输入原始图像的变换系数, $0 < p < 1$ 是一个增益因子, 本文试验中, 取 $p=0.2$, $c=3$ 。这个函数保持强边缘的系数, 放大弱边缘的系数, 同时将噪声系数变为零。

经过前面论述, 可以得出, 基于小波的方向自适应图像插值方法实现框图如图 6 所示。

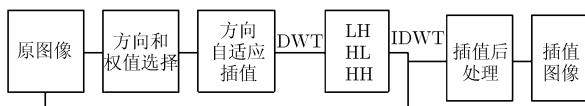


图 6 本文算法实现框图

5 试验

为了验证本文方法的有效性, 测试标准图像, 将经典的双线性插值方法、传统基于小波方法、基于边缘的插值方法(Nedi)^[1]和本文方法进行比较。以VC6.0实现本文算法, 试验中, 首先将图像模糊(2×2), 再采样获取低分辨率图像, 将原图像看成无失真的图像, 插值图像看成有失真的图像, 则可得插值结果的峰值信噪比(PSNR)和误差图像。为简单计仅进行插值2倍的试验, 表1是3幅标准图Lena(512×512)、Baboon(512×512)和Cameraman(256×256)在4种不同方法下插值结果PSNR的比较。图7(a)~7(d)是Lena图在4种不同方法插值结果的局部图像, 图7(e)~7(h)是对应方法插值的误差图像。

表 1 几种方法插值后图像的 PSNR 比较

图像	双线性方法	小波方法	Nedi方法	本文方法
Lena	30.10	30.25	30.39	30.82
Baboon	23.45	23.81	23.83	24.18
Cameraman	24.05	24.27	24.25	24.56

由表 1 可见, 基于小波的方向自适应图像插值方法与其他几种方法相比, PSNR 都有不同程度的提高。以 Lena 图试验结果为例, 本文方法与经典双线性插值方法相比, PSNR 提高了 0.72dB, 与传统小波方法相比提高了 0.57dB, 与 Nedi 方法相比提高了 0.43dB, 其他两幅图像也有类似的结果。此外, 本文从插值图像的视觉效果上, 比较几种方法的优劣。为了便于比较, 选择 Lena 图中细节信息特征较为典型的眼睛和帽子部分, 图 7 中显示了插值结果的局部图像及对应的误差图像, 首先从整体上看, 双线性插值方法和 Nedi 方法插值结果图像整体较暗些, 这也与前文述及的线性插值方法不能提供更为丰富的高频信息, 从而整体图像较暗的结论相符。从细节方面看, 双线性插值方法, 利用相邻方形区域像素加权平均, 插值图像在细节处较为模糊, 如图 7(a)在帽沿, 眼睛等处, 其误差图像图 7(e)也说明了此点; 传统小波方法, 将高频系数补零, 因此不能提供高频细节信息, 如图 7(b)在



图 7 几种方法插值结果局部及其对应的误差图像

帽沿等图像的边缘处, 出现人工效应, 从其误差图像 7(f)也可以看出, 在边缘细节处剩余也较多; Nedi 方法使用统计关系从而对图像造成一定的平滑作用, 如图 7(c), 图像质量较好, 但显得不是很真实, 其误差图像 7(g)相较于前面两种能量已明显减少; 相比较于其他方法, 本文方法在边缘纹理等细节处更加清晰细腻, 如图 7(d)所示, 插值图像保持了良好的视觉效果, 图像整体更加真实自然, 图 7(h)显示的误差图像纹理边缘等细节处能量已显著降低, 优于其他方法。

6 结束语

本文讨论了经典线性插值方法的不足, 为使插值算法保

护图像纹理边缘等细节部分, 改进双线性插值方法, 调整插值核函数, 使其能够根据图像局部内容, 自适应调整方向, 修正加权系数。在方向选择中, 利用小波去相关的特性, 确定图像的方向流, 设计权重时, 考虑插值点位置和相邻点的梯度信息, 使得插值函数更符合实际情况。为弥补线性插值方法不能提供更为丰富的高频信息, 结合小波方法, 利用其多分辨表示的功能, 建立基于小波的方向自适应图像插值方法, 在插值图像后处理过程中, 抑制插值图像中的噪声, 保护细节部分。试验结果表明了本文方法得到的插值图像在边缘纹理等细节处清晰细腻, 相比较其他传统方法, 峰值信噪比都得到了一定程度的提高, 且本文方法插值图像真实自然, 视觉效果更好。

参 考 文 献

- [1] Castleman K R. Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996: 335-343.
 - [2] Li X and Orchard M T. New edge directed interpolation. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(10): 1521-1527.
 - [3] Hwang J W and Lee H S. Adaptive image interpolation based on local gradient features. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(3): 359-362.
 - [4] Temizel A and Vlachos T. Wavelet domain image resolution enhancement. *IEE Proceedings-Vision, Image, and Signal Processing*, 2006, 153(2): 25-30.
 - [5] Wang Q and Ward R K. A new orientation-adaptive interpolation method. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2007, 16(4): 889-900.
 - [6] Cheng Guang-quan and Cheng Li-zhi. A new image compression via adaptive wavelet transform, Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing, China, Nov. 2-4, 2007, 1560-1564.
 - [7] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1998, 29(2): 511-546.
 - [8] Muresan D D. Fast edge directed polynomial interpolation. Proceedings of ICIP, Arlington, VA USA, 2005, 2: 990-993.
 - [9] Cunha A L, Zhou J, and Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, 15(6): 1610-1620.
- 程光权: 男, 1982 年生, 博士生, 研究领域为新型小波理论、图像处理、计算数学。
成礼智: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为信息科学中新型算法与软件、小波变换与图像处理。