

区域指导的彩色图像插值

郎文辉¹, 江朝晖¹, 周荷琴², 冯焕清¹

(1. 中国科学技术大学电子科学与技术系, 安徽合肥 230026 2. 中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027)

摘 要: 本文提出了一种针对彩色图像的区域指导的插值算法. 该方法首先从低分辨率图像中计算像素沿梯度方向的 1、2 阶方向导数, 然后把彩色图像划分为常数、线性和非线性区域, 并对不同的区域施用不同复杂度的滤波器. 实验结果表明, 与传统的双线性插值相比, 该方法可以明显改进插值图像的质量; 重建所需的时间也比单纯使用复杂滤波器的时间减少很多, 并且可以实现彩色图像的任意放大.

关键词: 彩色空间; 边界特征; 自适应插值; 图像重建

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0035-05

A re-directed Interpolation of Color Image

LANG Wen-hui¹, JIANG Zhao-hui¹, ZHOU He-qin², FENG Huan-qing¹

(1. Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract The paper proposes an area-directed interpolation algorithm for color images. The basic idea is to first estimate first and second direction derivatives around interpolated pixels along the gradient directions from a low-resolution image and then identify constant zones, linear zones, and non-linear zones based on these direction derivatives in color image. Thus different filters are applied only to zones that require it. Experiment results demonstrate that our new interpolation algorithm substantially improves the quality of the interpolated images over conventional bilinear interpolation and possesses reconstruction cost less than pure complex filters. In addition, the proposed method can be used irrespective of the magnification factor (MF).

Key words color space; edge feature; adaptive interpolation; image reconstruction

1 引言

图像插值提出了从低分辨率图像产生高分辨率图像的问题. 传统的双线性插值方法基于空间不变的模型, 计算简单, 但不能精确捕捉边界附近的快速变化, 产生的插值图像带有令人讨厌的锯齿. 为此人们研究了各种自适应方法来改进插值图像的主观质量^[1-6]. 其中, 多分辨率基于金字塔的技术^[1,2]和基于协方差的插值技术^[3-5]可以重建彩色图像, 但计算成本很高, 而且由于多分辨率金字塔公式需要利用图像上、下部分间的相关性, 而基于协方差的插值公式依赖边界的连续性, 因此这两类插值技术中的放大因子 (MF) 通常限制为 2 的幂. 虽然文献 [6] 没有这种限制, 并根据边界方向自适应地采用了最近邻和一维双线性插值, 但这种自适应插值算法仍必须借助硬件才能实现实时重建.

针对上述问题, 本文提出了一种高效、高质量的插值算法. 首先对彩色边界特征进行分析, 在不同的颜色分量场中, 利用插值点附近像素沿梯度方向的 1、2 阶方向导数来描述图像区域的边界特征, 进而把图像区域分为常数、线性和非线性区域, 并对不同的区域施用不同复杂度的滤波器. 实验结果表明, 与传统的双线性插值相比, 该方法可以明显改进插值图像的主、客观质量; 重建所需的时间也比单纯使用复杂滤波器的时间减少很多, 并且可以实现彩色图像的任意放大.

2 彩色边界特征分析

原始彩色图像通常位于 RGB 彩色空间中, 即每个像素由 R、G、B 三个颜色通道值表示. 由于需要计算色彩差异, 而 RGB 彩色空间是感知不均匀的颜色空间, 因而需要转换到感知均匀的色彩空间. CIE 推荐的两种匀色空间是

CE L* u* v* 和 CE L* a* b* .前者着重展示了 Munsell 色品系中彩色特征的差异,而后者倾向于展示比 JND (just noticeable differences) 阈值大,比 Munsell 色品系中色品差异小的差异^[7].为了精确地重建彩色图像中的细节,我们选择了 CIE L* a* b* 匀色空间,即由明度 (L*)、红绿 (a*) 和黄蓝 (b*) 三分量组成的空间,每一分量也是感知均匀的.

2.1 边界模型

在明度场中,相邻的两个对象的分界线称为边界.同一对象的内部特征是一致或相近的(如颜色值),而相邻的不同对象的特征是不同的,其差异发生在边界处^[8].

假定在边界处,相邻对象在物理属性上有尖锐的、不连续的变化,则理想的物理边界可用阶跃函数表示,实际测量后的结果应近似等于阶跃函数与高斯函数的卷积,即对高斯的积分,称为误差函数 erf^[9].

2.2 1D 数学边界分析

对于 1D 信号,误差函数 erf 定义如下^[9]:

$$\text{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (1)$$

据此可以在明度场中构造描述边界的方程:

$$l(x) = O_{\min} + (O_{\max} - O_{\min}) \frac{1 + \text{erf}\left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{2} \quad (2)$$

这里 $l(x)$ 表示穿过边界处的明度值, O_{\max} 和 O_{\min} 分别对应相邻对象的明度值;边界的厚度为 2σ , $\pm\sigma$ 对应 $l'(x)$ 的拐点; $x = 0$ 对应边界的准确位置,即 $l'(x)$ 最大值 ($l''(x)$ 过零值) 处.

$l(x)$ 的 1、2 阶导数如下:

$$l'(x) = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (3)$$

$$l''(x) = -\frac{x(O_{\max} - O_{\min})}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (4)$$

由式 (2) ~ (4) 可以看到,当 $x \rightarrow 0$ 时, $l'(x) \rightarrow \frac{v_{\max} - v_{\min}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, $l'' \rightarrow 0$

边界呈现线性.当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, $l(x) \rightarrow 0$, $l'(x) \rightarrow 0$, $l''(x) \rightarrow 0$, $l(x)$ 为常数;其它区域边界呈现非线性.

图 1 显示了穿过边界处的明度值和其 1、2 阶导数的测量结果.根据上面的讨论我们给出以下定义:

(1) 当 $|l''(x)| \leq T_s$ 时,如 $l'(x) \leq T_F$,则称 $l(x)$ 位于常数区内,对应 x 轴的浅色实线;如 $l'(x) > T_F$,则位于线性区,对应 x 轴的深色实线.

(2) 当 $|l''(x)| > T_s$ 时,称 $l(x)$ 位于非线性区.

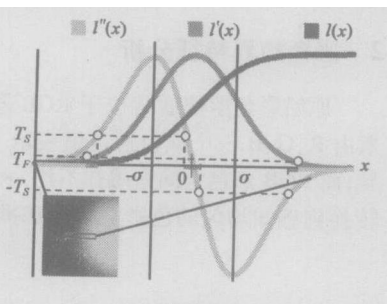


图 1 穿过边界的 l 和 l''

相应地,对通道 a^* 和通道 b^* 来说,也有类似的结果.

3 自适应插值方法

3.1 插值滤波器的选择

实验中,我们使用分离滤波器,在二维图像中的表达式为

$$h(x, y) = h_x(x) \cdot h_y(y) \quad (5)$$

这里 $h_x(x)$, $h_y(y)$ 是一维滤波器.

在不同的颜色分量场中,针对不同的区域,我们使用不同的滤波器,分为三种类型:

(1) 线性区的插值使用线性滤波器,如式 (6);

$$h_s(x) = \begin{cases} (1 - |x|), & \text{if } |x| < 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 非线性区的插值使用 cubic B 样条滤波器,如式 (7). 使用 cubic B 样条,是因为它在合理的时间内产生了高质量的重建图像,与 Sinc 滤波器的重建质量非常接近,但计算成本要低^[10];

$$h_s(x) = \frac{1}{6} \begin{cases} 3|x|^3 - 6|x|^2 + 4 & \text{if } |x| < 1 \\ -|x|^3 + 6|x|^2 - 12|x| + 8 & \text{if } 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

(3) 常数区域无需插值.

3.2 1D 信号区域探测

为了在 1D 明度场中判别两个象素间的区域性质,可以通过分析相邻象素明度值与 1、2 阶导数间的 1-1 对应关系得到如下判别规则:

(1) 平均规则: 如果 $\frac{l'_i + l'_{i+1}}{2} \leq T_s$, 插值区为线性区域或常数区域; 如果 $\frac{l'_i + l'_{i+1}}{2} \leq T_s$ 且 $\frac{l'_i + l'_{i+1}}{2} \leq T_F$, 对应常数区域.

(2) 与规则: 如果 $l'_i \leq T_s$ 且 $l'_{i+1} \leq T_s$ 为真, 插值区为线性区域或常数区域; 如果 $l'_i \leq T_s$ 且 $l'_i \leq T_F$ 且 $l'_{i+1} \leq T_s$ 且 $l'_{i+1} \leq T_F$ 为真, 对应常数区域.

(3) 或规则: 如果 $l'_i \leq T_s$ 或 $l'_{i+1} \leq T_s$ 为真, 插值区为线性区域或常数区域; 如果 $l'_i \geq T_F$ 且 $l'_{i+1} \geq T_F$ 或 $l'_i \leq T_s$ 且 $l'_{i+1} \leq T_s$ 为真, 对应常数区域.

当 $l'_i = T_s + \epsilon$, $l'_{i+1} = T_s - \epsilon$ 时, 只有平均和或规则能得出准确判断, 但 $l'_i = T_s + \epsilon$, $l'_{i+1} = T_s$ 时, 由或规则得出的结果是错误的, 可见平均规则更好地探测了各个区域.

在 a^* 和 b^* 颜色场中同样可以采用平均规则进行判别.

3.3 2D 判别准则

如果直接利用颜色分量的 1、2 阶方向导数进行 2D 判别, 很可能只能找到非常少的线性区域, 这将降低插值的速度.

我们发现, 当彩色图像的某个颜色通道在某一方向

(例如 X 轴方向)上具有很高的非线性时, 对应通道在另一个方向上却可能是线性或常数. 因此为了提高插值速度, 我们并没有直接利用颜色分量的 1/2 阶方向导数来判别空间区域, 而是沿着彩色图像每个颜色通道的每个轴向 X 和 Y , 利用 1/2 阶偏导分别完成 1D 的区域探测, 并选择不同的滤波器进行插值.

在这种方式中, 插值是用 $h(x, y) = h_x(x) \cdot h_y(y)$ 滤波器完成的, 这里当 $h_x(x)$ 是高阶滤波器 (如 cubic B 样条) 时, $h_y(y)$ 可以是线性滤波器. 因为线性插值仅使用两个样本点, 而 cubic B 样条插值使用四个样本点, 因而插值的复杂度从 n^2 降低到 $2n$.

虽然在每个轴向上采用 1D 区域探测, 但对每个重采点来说, 仍需要邻域内的多个相邻点进行区域探测.

图 2(a) 表示用 16 个样本点进行插值. 图 2(b) 表明了, 在明度场中, 由 8 个样本关于 x 的 1/2 阶偏导来判别重采点沿 X 轴向上的插值类型, 即分别对每对 $\frac{\partial^2 l_{ij}}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 l_{i+1,j}}{\partial x^2}$ ($j = j-1, \dots, j+2$) 施用 1D 平均规则, 如果有一个平均值大于阈值 T_F , 就认为该区域是非线性的. 此外如果所有的 1 阶偏导平均值都小于等于 T_F , 则无需插值.

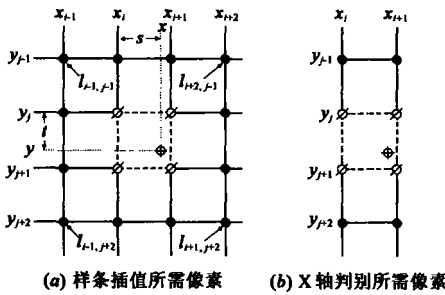


图 2 2D 判别准则

考虑到样本对插值点的贡献大小不同, 在与阈值比较前, 首先应对平均值取不同的权重. 从图中容易看到, 离重采点最近的 4 个样本 (用 \odot 表示) 对插值点的贡献较大, 因此应给这些样本赋较大的权重值; 角落上的 4 个点对插值点的贡献较小, 因此应赋较小的权重值.

表 1 针对测试图像的评价指标: $PNSR(10 \lg_{10}(255^2 MSE))$ 和计算时间 (ms)

图 像	双线性		自适应 $T_F = 5 T_S = 40$		自适应 $T_F = 5 T_S = 15$		cubic		协方差	
	时间	PSNR	时间	PSNR	时间	PSNR	时间	PSNR	时间	PSNR
Lighthouse	228	27.32	347	29.54	736	28.81	1146	28.41	8564	24.65
Baboon	311	28.34	479	30.86	779	30.34	1383	30.31	9495	26.74
Pepper	173	39.89	294	40.69	582	40.13	1061	40.08	9772	38.23
Flower	217	35.68	309	37.21	618	36.78	1125	36.68	7012	33.82
Lena	194	38.34	277	39.69	663	39.60	1209	39.52	8139	38.11

3.4 实现

(1) 预处理

- 色彩空间转换. 把 RGB 色彩空间转换到 $CIE L^* a^* b^*$ 匀色空间.

- 查找表计算. 沿着彩色图像每个颜色通道的每个轴向计算像素的 1/2 阶偏导数, 依据 2D 准则判别每个颜色通道每个轴向使用的插值类型, 因为只使用了三种插值类型, 因此每个像素每个颜色通道的轴向插值类型可用 2 位编码, 从而得到插值类型查找表.

(2) 自适应插值

利用查找表提供的插值类型进行自适应插值.

假设 l 表示输入彩色图像明度分量的 2D 数组, G 表示插值函数, g 是输出彩色图像明度分量的 2D 数组, 由下式表示:

$$g_{m,n} = G\left(\frac{m}{r}, \frac{n}{r}\right) \quad (8)$$

这里 r 是放大因子, m 和 n 是像素位置.

在明度场中, 当 (x, y) 是图 2(a) 矩形细分 $[x_j, x_{j+1}]$ ($[y_j, y_{j+1}]$) 中的一个点时, 如果沿 X 和 Y 轴向上的插值类型均为线性, 则插值函数由式 (9) 给出:

$$G(x, y) = (1-t)((1-s)l_{ij} + sl_{i+1,j}) + t((1-s)l_{i,j+1} + sl_{i+1,j+1}) \quad (9)$$

这里 $s = x - x_j, t = y - y_j$.

4 实验结果与讨论

我们在 P4/1.6G 512M 内存的 PC 机上, 使用 JAVA 语言实现了本文的方法、双线性、cubic B 样条和基于协方差的方法. 并对 5 幅不同的标准图像进行了测试, 原始图像的分辨率是 512×512 24 位真彩. 使用 2×2 平均滤波器对所有原始图像进行滤波, 然后缩小 1 倍 (分辨率为 256×256).

表 1 给出了放大了 2 倍的插值图像与原始图像间的峰值信噪比 ($10 \lg_{10}(255^2 MSE)$) 和插值时间 (ms). 实验表明, 在 $0 \leq T_F \leq 5$ 且 $0 \leq T_S \leq 40$ 区间中, 本文方法所对应的 PNSR 值要高于其它方法. 在表中, 自适应 $T_F = 0 T_S = 40$ 的 PNSR 值不仅最高, 而且与复杂滤波器相比, 大大缩短了插值计算时间.

图 3给出了针对图像 Lighthouse的插值结果. 图 3(a)是原始图像, 可以注意到, 该图像不仅包含了强边界信息, 也包含了大量的以重复模式形式出现的细节信息. 单纯的双线性插值结果如图 3(b)所示, 在边界处可以看到明显的锯齿伪影. 如图 3(c)所示, 利用本文提出的方法, 通过选择合适的阈值 $T_r = 5$ $T_s = 40$ 可以提高插值精度, 与图 3(b)相比, 不仅减少了锯齿伪影, 而且在一定程度上改善了图像的对比度, 提高了视觉质量. 随着阈值范围改变为 $T_r = 5$ $T_s = 15$ 如图 3(d)所示, 更多的区域被判定为非线性区域, 在图像中引入了模糊伪影. 图 3(e)是利用基于协方差方法对图 3(a)的插值结果. 基于协方差的方法在强边界处可以很好地维护边界完整性, 如存放救生圈的围栏, 但图像看起来倾向于过度平滑, 特别是在纹理区域有严重的模糊伪影. 因此, 特别是对包含大量细节信息图像而言, 本文提出的方法可以获得更好的视觉效果和满意的图像保真度.

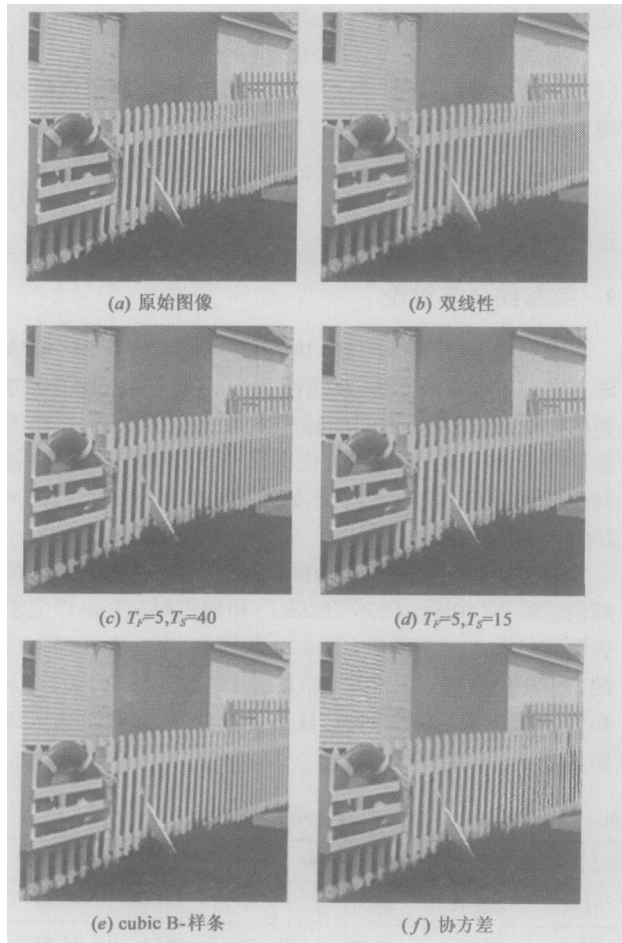


图 3 针对 Lighthouse的插值结果

5 结束语

本文提出了一种新颖的区域指导的彩色图像插值算法. 该方法基于象素的不同颜色通道 1、2阶偏导数进行自

适应插值. 与双线性和立方样条插值相比, 该方法明显改进了插值图像的主、客观质量. 重建所需的时间也比单纯使用复杂滤波器的时间减少很多, 并且可以实现彩色图像的任意放大.

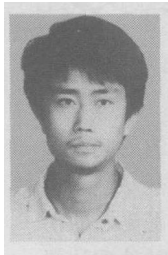
本文提出的方法虽然比双线性方法慢, 但在某些情况下, 特别是当彩色图像细节未知或非线性特征非常丰富时, 利用本方法可以获得很好的效果.

该方法不仅适合于彩色图像缩放, 也适合于任何需要样本点重采、梯度重建和曲率重建的算法.

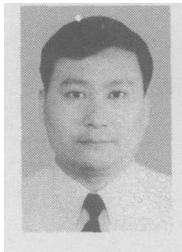
参考文献:

- [1] Qiu G. Interresolution look-up table for improved spatial magnification of image[J]. Journal of Visual Communications and Image Representation, 2000, 11(4): 360–373.
- [2] Carey W K, Chung D B et al. Regularity-preserving image interpolation[J]. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(9): 1293–1297.
- [3] Li X, Orchard M T. New edge-directed interpolation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2001, 10(10): 1521–1527.
- [4] Carrato S, Tenze L. A high quality 2\Theta image interpolator[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2000, 7(6): 132–134.
- [5] 刘晓松, 杨新, 汪进. 基于统计特征的彩色图像快速插值方法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 29–33.
LU Xiaosong, YANG Xin, WANG Jin. Statistical feature based fast color image interpolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 29–33 (in Chinese).
- [6] Hong K P, Pak J K. An edge-preserving image interpolation system for a digital cam coders[J]. IEEE Trans Consumer Electron, 1996, 42(3): 279–284.
- [7] Anil K. J. Fundamentals of Digital Image Processing[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 49–76.
- [8] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 12–19.
Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision—Computation Theory and Procedural Elements[M]. Beijing: Science Press, 1998. 12–19 (in Chinese).
- [9] Kindhann G, Duik in J. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering[A]. In Proceeding of IEEE Symposium on Volume Visualization [C]. Los Angeles, California USA, 1998. 79–86.
- [10] Lee S W, Pak J K. Image interpolation using adaptive fast B-spline filtering[A]. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. Minneapolis, Minnesota USA, 1993. 177–179.

作者简介:



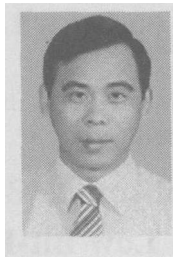
郎文辉 男, 1965年 5月生于安徽合肥, 博士, 现为中国科学技术大学电子科学与技术系副教授, 主要研究方向为医学影像图像处理、三维可视化等. Email langwh@ustc.edu.cn



江朝晖 男, 1968年生于安徽桐城, 博士, 现为中国科学技术大学电子科学与技术系讲师, 主要研究方向为生物医学信号采集与信息处理等.



周荷琴 女, 1946年生于江苏武进, 中国科学技术大学自动化系教授、博士生导师, 主要研究方向为医学影像图像处理、计算机网络、智能信息处理等.



冯焕清 男, 1945年生于江苏武进, 中国科学技术大学电子科学与技术系教授、博士生导师, 主要研究方向为医学影像图像处理、计算机仿真、生物医学工程、智能医疗仪器等.