

改进的图像自适应梯度插值

张美玉^{1),3)} 王孝通^{1),3)} 徐晓刚^{2),3)}

¹⁾(海军大连舰艇学院航海系,大连 116018) ²⁾(海军大连舰艇学院装备系统与自动化系,大连 116018)

³⁾(海军大连舰艇学院光电技术研究所,大连 116018)

摘要 传统的图像插值算法存在边缘模糊和边缘锯齿,已有改进算法改善了插值图像质量,但存在斜边缘锯齿或局部扭曲变形等问题。为解决上述问题,提出了改进的图像自适应梯度插值。该方法首先根据图像的局部不对称性和局部梯度特征在1维方向上修正插值点空间距离,并将1维修正结果合并到2维空间,然后将修正的空间距离应用到传统的插值算法中。实验结果表明,该方法改善了插值图像的峰值信噪比,有效保护了图像在各个方向上的边缘信息。

关键词 图像插值 距离修正 梯度 边缘保护

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-853-06

An Improved Adaptive Image Interpolation with Gradient Features

ZHANG Mei-yu^{1),3)}, WANG Xiao-tong^{1),3)}, XU Xiao-gang^{2),3)}

¹⁾(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

²⁾(Department of Automatization, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

³⁾(Institute of Photoelectric Technology, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

Abstract Conventional image interpolation introduces blur and jagged edges. Existing improved interpolation algorithm obtains better visual quality of interpolated images than traditional interpolation algorithm. But interpolated images may still introduce jagged edges or distortion around the edge. To solve the problem, the paper proposes an improved adaptive image interpolation algorithm with gradient features. The basic idea is to first correct the special distance of interpolated pixels along one dimension on the basis of the local asymmetry features and gradient features of the original images, convert the corrected results of one dimension into two dimensions and then apply the corrected distance to conventional interpolation algorithm. Experimental results demonstrate that the improved method produces good results in regard to the peak signal-to-noise ratio(PSNR) and succeeds in preserving interpolation image edges of various directions.

Keywords image interpolation, distance correction, gradient, edge preserved

1 引言

受硬件限制,高质量的图像插值技术一直是人们追求的目标。从最邻近插值法^[1],到双线性插值^[2]、双立方插值^[3]等,由于其插值函数的低通性,在插值结果中容易丢失图像的高频信息,导致图像

边缘模糊。

为了解决图像插值中的边缘模糊问题,学者们提出了很多图像插值算法。文献[4]提出了一种基于协方差的边缘导向插值算法,从低分辨率图像中估计局部协方差系数,根据高、低分辨率局部协方差之间的几何对偶关系实现高分辨率插值。文献[5]利用和插值点相邻的6个降采样像素估计高分辨率

基金项目:国家自然科学基金项目(60473141);辽宁省自然科学基金项目(20062191)

收稿日期:2007-07-23;改回日期:2007-12-27

第一作者简介:张美玉(1982~),男。海军大连舰艇学院航海系交通信息工程及控制专业研究生,主要研究方向为图像超分辨率处理。

E-mail: meiyuzhang@sohu.com

图像的局部协方差,提出了一种改进的边缘导向插值算法。文献[4]、[5]中的基于协方差的边缘导向插值算法需要进行大量的矩阵求逆运算,加大了算法的复杂度;此外,该方法只能用于图像的 2 的幂次方倍插值。文献[6]提出了 Bi-Cubic 算法,该算法综合利用 1 维的线性插值和三次立方插值,根据图像在行、列方向上的梯度大小将图像的 2 维插值转换为 2 个 1 维插值,在插值效果和运算量上优于双立方插值算法,但在图像边缘区域仍有模糊现象。文献[7]考虑了图像的局部不对称性,对插值点的空间距离进行非线性修正,将 2 维插值转化为两个 1 维插值,并与传统的双线性、双立方插值算法相结合,提出了 Warp Distance 插值算法(WaDi-Bilinear, WaDi-Bicubic)。

此外,一种基于图像梯度特征的插值方法也取得了较好的结果。文献[8]对基于图像梯度特征的插值算法进行了理论分析,并进行了基于梯度的线性插值,取得了优于双线性插值的结果。文献[9]通过边缘检测封闭图像边缘,然后对非边缘区域进行反梯度插值,取得了优于一般非线性插值的结果。文献[10]通过权值函数将图像局部梯度特征融合到传统的插值方法中,提出了基于图像局部梯度特征的插值算法(A-Bilinear, A-Bicubic)。文献[11]结合文献[7]中的 WaDi-Bilinear 算法和文献[10]中的 A-Bilinear 算法提出了基于图像梯度特征的改进的 WaDi 插值算法。

上述算法虽然改善了插值结果,但存在一些问题:文献[8]、[9]中的方法不能应用于图像的任意倍插值且存在局部扭曲变形,文献[8]~[11]中的方法均无法有效处理存在斜边的图像。针对上述问题,结合梯度权值和空间距离修正,提出了一种新的图像插值方法,该方法具有边缘自适应能力(G-Bilinear, G-Bicubic),能够有效保护插值图像的边缘信息。

2 相关工作

2.1 Warp Distance 插值

通常情况下,在获取自然图像时,图像的阶越边缘会因图像采集设备的低通性而转化为图 1 所示的 sigmoidal 边缘^[11]。图中 f_i^{ideal} 为图像 i 处的理想像素值, f_i 为线性插值结果。为了得到更加准确的插值结果,可对线性插值的空间距离 s 修正到图 1 中的

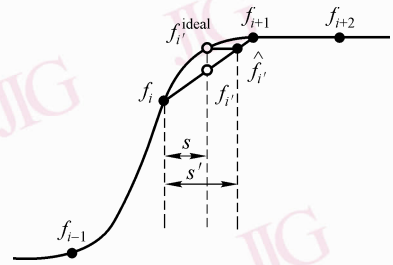


图 1 1 维线性插值

Fig. 1 One-dimensional bilinear interpolation

s' 处,则再通过线性插值能得到较接好的插值结果。基于这一思想,Warp Distance 插值算法^[7]对空间距离 s 进行了如下的修正:

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

式中, A 为插值点邻域的几何相似性参数,由下式定义:

$$A = \frac{|f_{x_{k+1}} - f_{x_{k-1}}| - |f_{x_{k+2}} - f_{x_k}|}{L - 1} \quad (2)$$

L 为灰度级最大值,8 位图像取 256, k 为修正因子,通常取 $k=1$ 或 2。则将 s' 取代 s ,应用到传统的线性插值中则得到对应的 WaDi 插值算法。

2.2 基于图像局部梯度特征的空间距离修正

文献[8]中已证明在对二阶连续可微函数进行插值时,待插值点的值与其已知的相邻点值相比更接近于较平坦的点,也就是说,在利用其相邻点进行插值时,导数越小的点对应的权值越大。这种思想还可以推广到 2 维曲面图像插值中。文献[10]为了利用图像的局部梯度特征,按照图 2 方式定义了图像的局部梯度特征块,并得到了式(3)中的梯度权值。

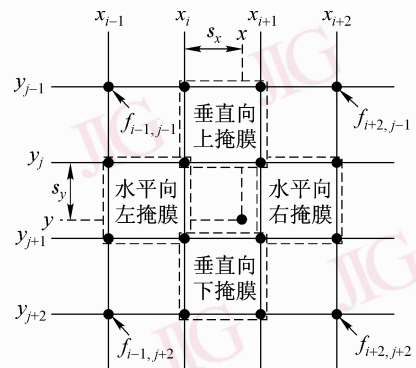


图 2 局部梯度特征块

Fig. 2 Masks for local gradient feature

$$H_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i,j} - f_{i-1,j}| + |f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|)}}$$

$$\begin{aligned}
 H_r &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha (|f_{i+1,j} - f_{i+2,j}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|)}} \\
 V_u &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha (|f_{i,j} - f_{i,j-1}| + |f_{i+1,j} - f_{i+1,j-1}|)}} \\
 V_l &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha (|f_{i,j+1} - f_{i,j+2}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j+2}|)}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中, H_l, H_r 为水平方向上左、右特征块的梯度权值, V_u, V_l 为垂直方向上上、下特征块的梯度权值; f 为对应点的像素值。将上述的梯度特征权值应用到传统的双线性插值、双立方插值中即得到文献 [10] 中 A-Bilinear 算法和 A-Bicubic 算法。式 (3) 中, α 为权值调节参数, 在 A-Bilinear 算法中取 1, 在 A-Bicubic 算法中取 0.1 左右。

3 改进的边缘自适应梯度插值

文献 [10] 中用唯一的梯度权值表示图像在水平或垂直方向上同一方格内的梯度特征, 这将使插值算法不能准确反映图像的梯度特征。以表示水平方向左侧梯度特征的 H_l 为例, 式 (3) 中的 1 维梯度值 $|f_{i,j} - f_{i-1,j}|$ 与 $|f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|$ 并不一定相等, 因而用同一梯度权值来表示它们的梯度特征并不恰当。基于这一考虑, 分别定义图像在水平和垂直方向上的 1 维梯度特征权值, 并对插值点 1 维方向上的空间距离进行调整, 再利用文献 [11] 中的方法将 1 维的空间修正距离转化到插值平面上, 最后将其应用到传统的双线性插值和双立方插值中。

3.1 对空间距离修正的改进

图 2 中定义的梯度特征块分别用 H_l, H_r 和 V_u, V_l 描述插值图像的局部水平、垂直梯度特征。这种方法对于图 3 中所示的水平和垂直边缘而言, 能够很好地保护插值图像的边缘信息, 但对于斜边缘, 由于算法中对于插值方格在同一方向的梯度描述 (如水平方向的 H_l, H_r) 没有考虑局部的梯度差异, 因而不能很好地保护图像在斜边缘上的信息, 造成斜边缘的模糊和锯齿现象。

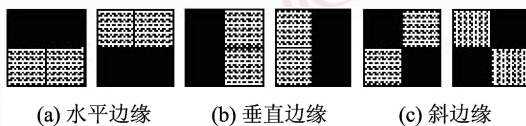


图 3 图像边缘类型
Fig. 3 Types of image edge

3.1.1 插值图像的 1 维梯度特征

为了较好地保护图像在各个方向上的边缘信息, 同时又不加大算法的复杂性, 通过在水平、垂直方向上分别定义插值区域的 1 维梯度特征, 然后对其进行有效组合, 使梯度特征块能够反映插值图像在各个方向上的边缘特征。如图 4 所示, 对图像的局部梯度特征进行 1 维描述, 得到下式的局部梯度特征权值。

$$\begin{aligned}
 H_{l1} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i,j} - f_{i-1,j}|}} \\
 H_{l2} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|}} \\
 H_{r1} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i+2,j} - f_{i+1,j}|}} \\
 H_{r2} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i+2,j+1} - f_{i+1,j+1}|}} \\
 V_{u1} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i,j} - f_{i,j-1}|}} \\
 V_{u2} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i+1,j} - f_{i+1,j-1}|}} \\
 V_{l1} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i,j+1} - f_{i,j+2}|}} \\
 V_{l2} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha |f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j+2}|}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

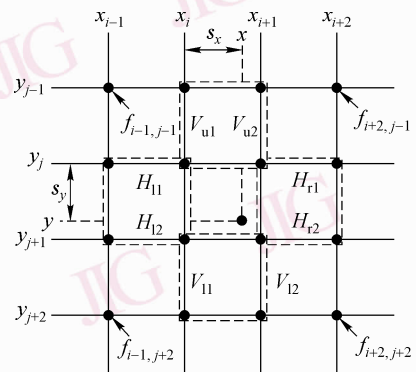


图 4 改进的图像局部梯度特征块
Fig. 4 Proposed masks for local gradient features

为了能够在插值算法中体现图像的局部梯度特征, 利用式 (4) 中的梯度权值对图 4 中的插值点空间距离 s_x, s_y 分别在 1 维方向上进行如下修正:

$$s_{x1}^g = \frac{H_{r1} s_x}{H_{l1} (1 - s_x) + H_{r1} s_x}$$

$$s_{x2}^g = \frac{H_{12}s_x}{H_{12}(1-s_x) + H_{22}s_x}$$

$$s_{y1}^g = \frac{V_{u1}s_y}{V_{11}(1-s_y) + V_{u1}s_y} \quad (5)$$

$$s_{y2}^g = \frac{V_{u2}s_y}{V_{12}(1-s_y) + V_{u2}s_y}$$

3.1.2 1 维空间距离向 2 维的转换

式(5)中得到了 1 维的空间修正距离 $s_{x1}^g, s_{x2}^g, s_{y1}^g, s_{y2}^g$, 下面利用文献[11]中的方法将其转化为 2 维的空间修正距离:

$$s_X^g = \frac{s_{x1}^g + (s_{x2}^g - s_{x1}^g)s_{y1}^g}{1 - (s_{y2}^g - s_{y1}^g)(s_{x2}^g - s_{x1}^g)} \quad (6)$$

$$s_Y^g = \frac{s_{y1}^g + (s_{y2}^g - s_{y1}^g)s_{x1}^g}{1 - (s_{y2}^g - s_{y1}^g)(s_{x2}^g - s_{x1}^g)}$$

这样,就完成了对文献[10]中方法的改进,使基于梯度特征的空间距离修正能够反映图像在各个方向上的边缘特征。

3.1.3 斜边缘插值分析

以图 3 中(c)所示 45° 斜边缘为例,若按照文献[10]中方法计算梯度权值,结果如式(3)所示。以水平方向为例,梯度权值如下:

$$H_l = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i,j} - f_{i-1,j}| + |f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|)}}$$

$$H_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha(|f_{i+1,j} - f_{i+2,j}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|)}} \quad (7)$$

图 3(c)所示 45° 斜边具有如下特点:

$$|f_{i,j} - f_{i-1,j}| \approx |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}| \quad (8)$$

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

即

$$(|f_{i,j} - f_{i-1,j}| + |f_{i,j+1} - f_{i-1,j+1}|) \approx (|f_{i+1,j} - f_{i+2,j}| + |f_{i+1,j+1} - f_{i+2,j+1}|) \quad (9)$$

则将导致式(7)中左、右水平梯度权值近似相等,

$$H_l \approx H_r \quad (10)$$

式(10)中梯度权值在插值中将失效,导致斜边缘的锯齿现象。

本文方法在处理上述问题时,由于其 1 维水平梯度权值不相等,

$$H_{l1} \neq H_{l2}; H_{r1} \neq H_{r2} \quad (11)$$

则通过式(11)修正的空间距离仍能反映边缘特征。本文方法在处理图 3 中(a)、(b)所示的水平和垂直边缘时,由于 $H_{l1} \approx H_{l2}, H_{r1} \approx H_{r2}$,则处理结果与文献

[10]近似。

3.2 算法步骤

为了进一步改善插值图像的效果,将 Warp Distance 插值算法中基于空间不对称性的空间距离修正与式(4)~(6)中改进的基于梯度特征的距离修正相结合,充分利用图像的空间不对称性和局部梯度特征,得到较好的插值结果。算法的步骤如下:

(1)按照式(1)分别对插值点空间距离 s_x, s_y 进行水平、垂直方向上 1 维的空间不对称性修正,得到 $s'_{x1}, s'_{x2}, s'_{y1}, s'_{y2}$ 。

(2)按照式(5)对 $s'_{x1}, s'_{x2}, s'_{y1}, s'_{y2}$ 进行 1 维的梯度特征修正,得到 $s_{x1}^g, s_{x2}^g, s_{y1}^g, s_{y2}^g$ 。

(3)按照式(6)将 1 维的空间修正距离 $s_{x1}^g, s_{x2}^g, s_{y1}^g, s_{y2}^g$ 转化为 2 维的空间距离 s_X^g, s_Y^g 。

(4)将 s_X^g, s_Y^g 分别取代到传统的双线性插值(Bilinear)和双立方插值(Bicubic)中的空间距离 s_x 和 s_y ,得到本文的插值算法(G-Bilinear、G-Bicubic): G-Bilinear 插值算法:

$$G_{bil}^g(s_X^g, s_Y^g) = (1 - s_Y^g) \times ((1 - s_X^g) \times f_{i,j} + s_X^g \times f_{i+1,j}) + s_Y^g \times ((1 - s_X^g) \times f_{i,j+1} + s_X^g \times f_{i+1,j+1}) \quad (12)$$

G-Bicubic 插值算法:

$$G_{bic}^g(s_X^g, s_Y^g) = \sum_{n=-1}^2 \sum_{m=-1}^2 f_{i+m,j+n} P_{m+1}(s_X^g) P_{n+1}(s_Y^g) \quad (13)$$

其中,

$$P_0(u) = (-u^3 + 2u^2 - u)/2$$

$$P_1(u) = (3u^3 - 5u^2 + 2)/2 \quad (14)$$

$$P_2(u) = (-3u^3 + 4u^2 + u)/2$$

$$P_3(u) = (u^3 - u^2)/2$$

4 实验结果

实验中,使用原始图像与重建图像间的峰值信噪比来作为度量重建图像质量的标准之一。为了充分体现本文算法的优越性,进行了以下实验:

实验 1 对灰度图 Lena (512 × 512)、pepper (512 × 512)、SONIC (512 × 512) 和 cameraman 进行隔行隔列采样缩小 2 倍,然后再用各种插值算法放大 2 倍。将算法按照所基于的传统插值的类型(Bilinear 和 Bicubic)分成两大类进行对比分析,结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 基于 Bilinear 的插值方法峰值信噪比比较

Tab.1 Comparing the PSNR values in dB of interpolation images base on Bilinear

图像	单位: dB				
	Bilinear	WaDi-Bilinear	A-Bilinear	Prop. WaDi	G-Bilinear
Lena	31.851	32.145	31.964	32.145	32.303
pepper	30.895	31.186	31.473	31.573	31.616
SONIC	30.161	30.494	30.706	30.998	31.077
cameraman	25.515	25.512	25.692	25.811	25.846

表 2 基于 Bicubic 的插值方法峰值信噪比比较

Tab.2 Comparing the PSNR values in dB of interpolation images base on Bicubic

图像	单位: dB					
	Bicubic	Bi-Cubic	WaDi-Bicubic	A-Bicubic	Edge-dir.	G-Bicubic
Lena	32.289	32.307	32.411	32.486	32.339	32.558
pepper	31.041	31.078	31.213	31.284	31.505	31.542
SONIC	30.534	30.533	30.734	31.058	30.827	31.407
cameraman	25.493	25.507	25.303	25.621	25.707	25.850

由表 1 中数据可知,G-Bilinear 算法明显优于传统的 Bilinear 插值,同时其峰值信噪比相对于 WaDi-Bilinear 和 A-Bilinear 算法而言提高了 0.2~0.5 dB,有了明显改进。同时其插值结果也优于 Prop. WaDi 算法。由表 2 中数据可知,G-Bicubic 算法明显优于传统的 Bicubic 插值,相对于同类算法 Bi-Cubic、WaDi-Bicubic 和 A-Bicubic 而言其峰值信噪

比提高了 0.3 dB 左右,较 Edge-dir. 插值也有了提高。特别是对于边缘特征比较丰富的 SONIC 的图像,本文算法的优越性更明显。

实验 2 为验证本文算法在斜边缘处理中的优越性,对 Lena(256×256)的帽檐区域进行局部插值放大,并与已有改进算法进行对比分析。考虑到 Edge-dir. 插值只能进行 2 的幂次方倍插值,对局部图像进行 8 倍插值,插值结果如图 5 所示。



图 5 Lena 图像插值结果对比

Fig. 5 Comparing the interpolation results of "Lena"

由图 5 可知, Edge-dir. 插值存在边缘模糊, 且在局部特征明显的区域存在扭曲变形(如 Lena 的睫毛), WaDi-BiLinear 插值、WaDi-BiCubic 插值和 Bi-Cubic 插值存在边缘模糊和边缘锯齿, Prop. WaDi 插值、A-Bilinear 插值和 A-Bicubic 插值改善了边缘模糊, 但存在明显的斜边缘锯齿, G-Bilinear 插值和 G-Bicubic 插值则较好地解决了边缘模糊和边缘锯齿问题。

5 结 论

提出了一种新的图像插值方法, 充分利用了图像的局部不对称性和局部梯度特征, 并与传统的双线性插值和双立方插值相结合, 取得了较好的效果。实验结果表明, G-Bilinear 算法和 G-Bicubic 算法不仅在插值图像的峰值信噪比(PSNR)上优于同类其他算法, 而且有效保护了图像的水平、垂直和斜边缘, 解决了斜边缘的锯齿问题。此外, 本文提出的基于图像局部不对称性和梯度信息的空间距离修正方法具有普适性, 可将其推广到其他插值算法中。

参考文献 (References)

- 1 Thévenaz P, Elu T B, Unser M. Interpolation revisited[J]. IEEE Transactions on Medical Image, 2000, 7(19):739-758.
- 2 Natale F De, Desoli G S, Giusto D D. Adaptive least-squares bilinear interpolation[J]. IEEE Electronics Letters, 1993, 9(29):1638-1640.
- 3 Keys Robert G. Cubic convolution interpolation for digital image

- processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1981, 6(ASSP-29):1153-1160.
- 4 Li Xin, Orchard Michael T. New edge-directed interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10):1521-1527.
- 5 Chen Xiao-qiang, Zhang Jun, Wu Le-nan. An improved edge-directed image interpolation algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(6):684-688. [陈小蔷, 张俊, 吴乐南. 一种改进的边缘方向插值算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(6):684-688.]
- 6 Tian Yan, Liu Bin, Li Tao. A local image interpolation method based on gradient analysis [A]. In: Proceedings of International Conference on Neural Networks and Brain [C], New York, USA: IEEE Press, 2005, 1202-1205.
- 7 Ramponi Giovanni. Warped distance for space-variant linear image interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(9):1293-1297.
- 8 Xie Mei-hua, Wang Zheng-ming. Image interpolation based on gradient [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 7(10):856-861. [谢美华, 王正明. 基于图像梯度信息的插值方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 7(10):856-861.]
- 9 Xia Tao, Chen Hai-qing, Huang Shi-ke. Inverse-gradient adaptive interpolation algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 8(33):103-107. [夏涛, 陈海清, 黄士科. 一种反梯度自适应插值算法[J]. 光电工程, 2006, 8(33):103-107.]
- 10 Hwang Jung-Woo, Lee Hwang-Soo. Adaptive image interpolation based on local gradient features [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 3(11):359-362.
- 11 Shuai Yuan, Masahide Abe Akira Taguchi, Masayuki Kawamata. High accuracy wadi image interpolation with local gradient features [A]. In: Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems [C], Hong Kong, China, 2005:85-88.