

一种分区域多方向数据融合图像插值方法

齐敏 程恭 杜乾敏 朱柏飞 魏效昱

(西北工业大学电子信息学院, 西安, 710129)

摘要: 为满足高端工业检测中对检测精度和检测时间的严格要求, 针对现有图像插值方法在插值速度与精度方面的矛盾, 本文提出了一种分区域多方向数据融合图像插值方法。在灰度平坦区域, 采用双线性插值算法进行插值。在边缘纹理区域, 则选取待插值点在源图像中对应点的 4×4 邻域内 4 个插值方向上距离最近的 12 个像素点, 基于距离平方反比计算估计值; 然后结合方向灰度梯度和插值距离两个权重因子, 进行数据融合, 获得最终插值。实验表明, 新提出的插值方法运行速度快, 并且在图像任意级别变换时都具有较高的插值精度, 能够很好地保持图像的边缘纹理细节。

关键词: 图像插值; 分区域; 数据融合; 方向梯度; 插值距离

中图分类号: TP391.14 **文献标志码:** A

New Image Interpolation Method Based on Sub-regional and Multi-directional Data Fusion

Qi Min, Cheng Gong, Du Qianmin, Zhu Bofei, Wei Xiaoyu

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710129, China)

Abstract: To solve the contradictory of speed and accuracy of the existing interpolation method, an interpolation method based on sub-regional and multi-directional data fusion is presented. The new method divides images into flat areas and edge-regions. The bilinear algorithm is used in flat areas, and the improved algorithm is used in edge-regions. Based on the inverse ratio of the distance square, the improved algorithm fully considers four-direction estimated results of the nearest horizontal, vertical and two diagonal directions using 12 pixels selected from 4×4 neighborhood. A final interpolation result is obtained by calculating weights of vertical distance and direction gradient. The experimental result shows that the proposed interpolation method costs less time and can make edges of image more natural and clear. Moreover, it can be applied to any multiples of interpolation amplification.

Key words: image interpolation; sub-regional; data fusion; direction gradient; interpolation distance

引 言

图像插值作为数字图像处理中的一项重要技术, 在图像处理领域发挥着重要作用。它被广泛应用于网络视频传输、图像修复、图像识别以及医疗辅助诊断等多种领域中。现有图像插值方法大致分为传

统线性插值方法和边缘自适应非线性插值方法两类^[1-3]。传统线性插值方法中较为经典的有最近邻插值、双线性插值和双三次插值等^[4-5]。其中,最近邻插值只考虑源图像中一个像素的灰度信息,操作最为简单方便,运行速度快,但插值效果差,应用范围有限。双线性插值考虑待插值点在源图像中的对应点 2×2 邻域内4个像素点的灰度信息,运行速度较快,插值效果较好,但在边缘纹理区域会造成图像模糊现象。双三次插值利用待插值点在源图像中的对应点 4×4 邻域内的16个像素点的灰度信息来估计待插值点的灰度值,不仅考虑了4个直接相邻像素点灰度值的影响,还考虑了各相邻像素点灰度值变化率的影响,插值效果良好,但运算量急剧增大,限制了该算法的使用范围。边缘自适应非线性插值方法主要是为了解决图像插值后边缘纹理模糊等问题,部分学者对其进行了研究。如 Zhang X J^[6]提出软判决的插值方法,通过增加局部窗口内像素点之间的约束条件得到更为精确的插值效果,但算法需要大量复杂的运算做支撑,实时性不好。Chang S G^[7]则提出一种在小波域中对图像高频分量进行估计的插值方法,插值精度有所提高,但运算速度较慢。李跃^[8]在图像灰度平坦区域直接进行线性插值,在边缘纹理区域先找出边缘主导方向,然后在该方向进行线性插值,虽然进行了分区域处理,但插值效果提升不明显。李春龙^[9]等在灰度平坦区域使用双三次插值算法,在边缘纹理区域则根据待插值点所处的位置不同,进行两轮插值,插值精度有所提高,但算法复杂,运算量大,实时性较差。

数据融合技术通过选取合适的融合模式和处理算法,将多维数据进行关联和综合分析,能够达到提高数据质量的效果。近年来,部分学者在图像插值中引入了数据融合技术,在一定程度上提高了算法性能。孙毓敏^[10]将每个待插值点均融合两个方向上的估计值,插值效果优于双线性插值,但只能进行 2^n 倍的插值变换,且整幅图像不区分区域类型,全部使用同一种插值算法,算法效率较低。邓彩^[11]在孙毓敏的基础上进行改进研究,在图像灰度平坦区域使用双线性插值,在边缘区域使用改进的插值算法,每个待插值点均融合6个方向上的估计值,插值精度和速度都有所提高。但该方法在邻域中各个方向上的估计值公式考虑欠佳,还有一定的提升空间。目前一些基于融合思想的插值方法虽然在插值速度和精度上有所突破,但在融合方法的设计上考虑的并不充分,导致插值的最终效果还有待改善^[12-13]。

在高端工业检测中,通常对检测精度和检测时间有很高要求,为了解决现有图像插值方法插值速度与精度的矛盾,本文根据待插值点在源图像中的对应点所处的区域类型,结合数据融合技术,提出了分区域多方向数据融合图像插值方法。首先,求出待插值点在源图像中对应四邻域像素的灰度方差,与设定的阈值进行对比,判定区域类型为灰度平坦区域或边缘纹理区域。在灰度平坦区域,采用简单快速的双线性插值算法进行插值。在边缘纹理区域,则基于距离平方反比,计算待插值点在源图像中对应点的 4×4 邻域内距离最近的水平、垂直和对角4个方向上的12个像素点沿这4个方向的估计值,然后结合方向灰度梯度和垂直插值距离两个权重因子进行数据融合,获得最终插值。大量实验表明新提出的方法插值速度快、效果好。

1 区域类型判定

本方法针对灰度图像进行插值,定义图像坐标系为: X 轴正方向水平向右, Y 轴正方向垂直向下,原点位于图像左上角。源图像 f 为 N 行 M 列的灰度图像,灰度取值范围为 $[0, 255]$ 。设待插值图像上任意一点坐标为 (x', y') ,其灰度值为 $g(x', y')$,该点在源图像上的对应点坐标为 (u, v) ,其灰度值为 $f(u, v)$, 2×2 邻域内4个相邻像素点分别为 A, B, C, D 。如图1所示。在图1中, A, B, C, D 四个像素点的灰度值分别为 $f([u], [v]), f([u]+1, [v]), f([u], [v]+1)$ 和 $f([u]+1, [v]+1)$, $[\cdot]$ 表示取整运算。计算待插值点在源图像中对应点的 2×2 邻域内像素点灰度均值

$$E = \frac{f([u], [v]) + f([u]+1, [v]) + f([u], [v]+1) + f([u]+1, [v]+1)}{4} \quad (1)$$

灰度方差为

$$Var = \frac{(E - f([u],[v]))^2 + (E - f([u]+1,[v]))^2 + (E - f([u],[v]+1))^2 + (E - f([u]+1,[v]+1))^2}{4} \quad (2)$$

根据图像特点,设定阈值 T ,若 $Var < T$,判定为灰度平坦区域,否则判定为边缘纹理区域。

2 灰度平坦区域插值

双线性插值算法运算量适中,执行速度较快,在灰度平坦区域插值能取得良好的整体视觉效果^[14]。若判定待插值点位于灰度平坦区域,直接采用简单快速的双线性插值算法进行插值。这一操作能降低算法的整体运算量,提高执行速度。

双线性插值法是利用待插值点 2×2 邻域内 4 个相邻像素点的灰度值进行线性内插,并假设源图像中各像素灰度值在两个像素之间线性变化^[15]。如图 1 所示, $a = u - [u], b = v - [v]$,要求取 E 点的灰度值,首先要求得 E_1 和 E_2 两点的灰度值,然后根据 3 点共线,由 E_1 和 E_2 两点的灰度值线性表示得到。

待插值图像中,坐标位置为 (x', y') 处像素的灰度值为

$$g(x', y') = bt_1 + (1 - b)t_2 \quad (3)$$

式中: $t_1 = af([u],[v]+1) + (1-a)f([u]+1,[v]+1); t_2 = af([u]+1,[v]) + (1-a)f([u],[v])$ 。

3 边缘纹理区域插值

若待插值点位于边缘纹理区域,则按照如下思路进行插值。

3.1 待插值点在 4 个方向估计值的求解

目前基于数据融合技术的插值算法大多着重考虑图像像素点 2×2 邻域内 4 个像素的相关性,数据融合时,多在两个方向上进行,考虑信息量较少,会造成图像部分信息损失,插值效果欠佳。本文提出的方法将参与计算的像素个数拓展至 4×4 邻域内最近的水平、垂直、 45° 对角线和 135° 对角线上的 12 个像素点,并在这 4 个方向进行数据融合。此外,根据数字灰度图像中,每个像素点与点光源的物理性质相似,其灰度衰减与距离该像素的距离平方成反比^[16-17]的特性,该方法将每个像素点对待插值点的灰度影响设置为两点距离平方的反比,更加符合实际的物理规律。

如图 2 所示,待插值点在源图像中的对应点为 S ,其坐标为 $(u, v), u, v$ 均为浮点数。 i 为不大于 u 的最大整数, j 为不大于 v 的最大整数,即 $i = [u], j = [v]$ 。 $f(x, y)$ 为源图像中坐标为 (x, y) 处的像素灰度值, $S_{x,y}$ 为点 S 距离源图像中坐标为 (x, y) 的像素点的欧式距离,单位为像素。其中, $x = i, i-1, i+1$ 和 $i+2; y = j, j-1, j+1$ 和 $j+2$ 。

待插值点在 45° 对角线方向的估计值为

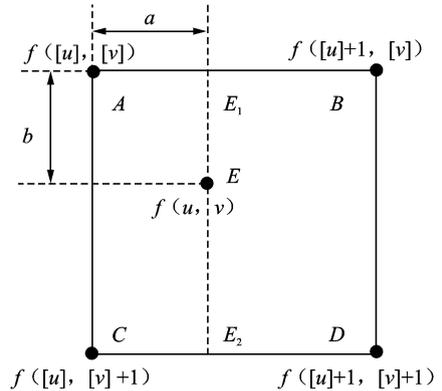


图 1 2×2 邻域示意图

Fig. 1 Illustration of 2×2 neighborhood

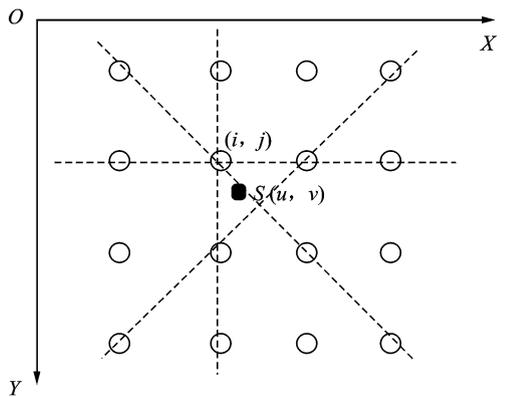


图 2 边缘纹理区域图像插值方法示意图

Fig. 2 Illustration of method used in edge-regions

$$y_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{f(i+2, j-1)S_{i, j+1}^2 + f(i, j+1)S_{i+2, j-1}^2}{S_{i, j+1}^2 + S_{i+2, j-1}^2} + \frac{f(i+1, j)S_{i-1, j+2}^2 + f(i-1, j+2)S_{i+1, j}^2}{S_{i-1, j+2}^2 + S_{i+1, j}^2} \right) \quad (4)$$

同理待插值点在 135° 对角线方向的估计值为

$$y_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{f(i-1, j-1)S_{i+1, j+1}^2 + f(i+1, j+1)S_{i-1, j-1}^2}{S_{i+1, j+1}^2 + S_{i-1, j-1}^2} + \frac{f(i, j)S_{i+2, j+2}^2 + f(i+2, j+2)S_{i, j}^2}{S_{i+2, j+2}^2 + S_{i, j}^2} \right) \quad (5)$$

待插值点在水平方向的估计值为

$$y_3 = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{f(i-1, j)S_{i+1, j}^2 + f(i+1, j)S_{i-1, j}^2}{S_{i+1, j}^2 + S_{i-1, j}^2} + \frac{f(i, j)S_{i+2, j}^2 + f(i+2, j)S_{i, j}^2}{S_{i+2, j}^2 + S_{i, j}^2} \right) & v-j \leq 0.5 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{f(i-1, j+1)S_{i+1, j+1}^2 + f(i+1, j+1)S_{i-1, j+1}^2}{S_{i+1, j+1}^2 + S_{i-1, j+1}^2} + \frac{f(i, j+1)S_{i+2, j+1}^2 + f(i+2, j+1)S_{i, j+1}^2}{S_{i+2, j+1}^2 + S_{i, j+1}^2} \right) & v-j > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

待插值点在垂直方向的估计值为

$$y_4 = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{f(i, j-1)S_{i, j+1}^2 + f(i, j+1)S_{i, j-1}^2}{S_{i, j+1}^2 + S_{i, j-1}^2} + \frac{f(i, j)S_{i, j+2}^2 + f(i, j+2)S_{i, j}^2}{S_{i, j+2}^2 + S_{i, j}^2} \right) & u-i \leq 0.5 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{f(i+1, j-1)S_{i+1, j+1}^2 + f(i+1, j+1)S_{i+1, j-1}^2}{S_{i+1, j+1}^2 + S_{i+1, j-1}^2} + \frac{f(i+1, j)S_{i+1, j+2}^2 + f(i+1, j+2)S_{i+1, j}^2}{S_{i+1, j+2}^2 + S_{i+1, j}^2} \right) & u-i > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 待插值点到 4 个插值方向的距离求解

待插值点在每一个方向上的估计值由源图像中 4 个像素点的信息构成,这 4 个像素点组成一条直线,分别称为 45° 对角线方向插值线、 135° 对角线方向插值线、水平方向插值线以及垂直方向插值线。待插值点在源图像中的对应点到这 4 条插值线的距离分别为 r_1, r_2, r_3 和 r_4 ,单位为像素。由点到直线距离公式可得

$$r_1 = \frac{u-i+v-j-1}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{u-i-v+j}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$$r_3 = \begin{cases} v-j & j-v \leq 0.5 \\ j-v+1 & j-v > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$r_4 = \begin{cases} u-i & u-i \leq 0.5 \\ i+1-u & u-i > 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

对 r_1, r_2, r_3, r_4 归一化得

$$d_k = \frac{r_k}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

3.3 4 个方向灰度梯度均值的求解

根据数字图像原理可知,沿着图像的边缘纹理方向,各像素灰度值变化缓慢,在该方向插值较为精确,可以获得较好的视觉效果。相反,跨越边缘纹理时,各像素的灰度值变化剧烈,在该方向插值精确度低,视觉效果差^[18]。数字图像在某一像素的邻域内只有 4 个边缘方向,即 45° 对角线、 135° 对角线以及水平和垂直^[19],本方法针对这 4 个方向的灰度梯度均值进行操作,并设 $f(x, y)$ 为源图像中坐标为 (x, y)

处像素的灰度值,其中 $x = i, i-1, i+1$ 和 $i+2$; $y = j, j-1, j+1$ 和 $j+2$ 。

45°对角线方向灰度梯度均值为

$$g_1 = \frac{|f(i+2, j-1) - f(i+1, j)| + |f(i+1, j) - f(i, j+1)| + |f(i, j+1) - f(i-1, j+2)|}{3} \quad (13)$$

135°对角线方向灰度梯度均值为

$$g_2 = \frac{|f(i-1, j-1) - f(i, j)| + |f(i, j) - f(i+1, j+1)| + |f(i+1, j+1) - f(i+2, j+2)|}{3} \quad (14)$$

水平方向灰度梯度均值为

$$g_3 = \begin{cases} \frac{|f(i-1, j) - f(i, j)| + |f(i, j) - f(i+1, j)| + |f(i+1, j) - f(i+2, j)|}{3} & v-j \leq 0.5 \\ \frac{|f(i-1, j+1) - f(i, j+1)| + |f(i, j+1) - f(i+1, j+1)| + |f(i+1, j+1) - f(i+2, j+1)|}{3} & v-j > 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

垂直方向灰度梯度均值为

$$g_4 = \begin{cases} \frac{|f(i, j-1) - f(i, j)| + |f(i, j) - f(i, j+1)| + |f(i, j+1) - f(i, j+2)|}{3} & u-i \leq 0.5 \\ \frac{|f(i+1, j-1) - f(i+1, j)| + |f(i+1, j) - f(i+1, j+1)| + |f(i+1, j+1) - f(i+1, j+2)|}{3} & u-i > 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

对 g_1, g_2, g_3, g_4 归一化得

$$t_k = \frac{g_k}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} \quad k=1,2,3,4 \quad (17)$$

3.4 融合系数

本方法融合系数的设定考虑了两个因素:待插值点到4个插值方向的距离远近以及4个插值方向的灰度梯度大小。一方面,待插值点到某一插值方向距离越近,受该方向估计值的影响越大,融合系数也要越大;反之,融合系数越小。另一方面,若某一插值方向灰度梯度越小,表明在该方向上图像灰度变化越缓慢,插值越准确,需要设定一个较大的融合系数;反之,设定一个较小的融合系数。综合以上原则,确定融合系数的方法为

$$\psi_k = e^{-\lambda d_k} \times e^{-(1-\lambda)t_k} \quad k=1,2,3,4 \quad (18)$$

式中: d_k ($k=1,2,3,4$) 为步骤2求得的待插值点到4个插值方向的距离归一化之后的值; t_k ($k=1,2,3,4$) 为步骤3求得的4个插值方向灰度梯度均值归一化之后的值; λ 为常数, $0 < \lambda < 1$, 用于调节插值距离和灰度梯度在融合系数中所占的权重值。在具体应用中,针对不同类型图像的特点选择不同的 λ 值,可以改变插值效果,使插值效果达到最佳。对 ψ_k 归一化得

$$\omega_k = \frac{\psi_k}{\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4} \quad k=1,2,3,4 \quad (19)$$

3.5 数据融合

经数据融合后,待插值点 S 的灰度值

$$y = \omega_1 y_1 + \omega_2 y_2 + \omega_3 y_3 + \omega_4 y_4 \quad (20)$$

其中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为步骤 4 求得的 4 个融合系数归一化之后的值; y_1, y_2, y_3, y_4 分别为步骤 1 求得的 4 个插值方向的估计值。至此,便完成了点 S 的插值。

4 实验结果及对比分析

4.1 实验方法

本文采用数字图像处理中经常使用的 Lena 图像、鼠图像、花图像、狗图像以及 PCB 图像进行实验,如图 3 所示。原始图像大小分别为 Lena 图像:256 像素 \times 256 像素,鼠图像:400 像素 \times 284 像素,花图像:256 像素 \times 256 像素,狗图像:400 像素 \times 292 像素,PCB 图像:1 292 像素 \times 964 像素,灰度取值范围均为 $[0, 255]$ 。5 种类型图片大小不同,灰度分布和边缘纹理各异,具有较为全面的代表性。

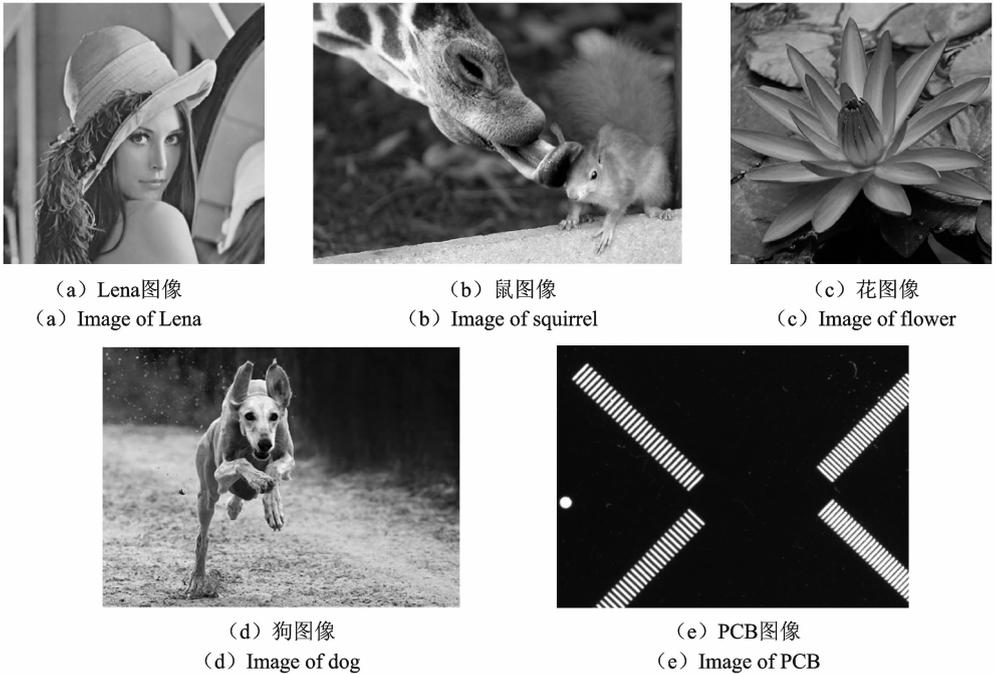


图 3 实验图像

Fig. 3 Images used in experiments

部分图像插值算法由于算法设计缺陷,将图像插值放大 2^n 倍时精度较高,效果良好,非 2^n 倍插值放大时精度较低,效果明显下降。为了验证本文提出算法不同放大倍数时的插值效果,采用以下实验方案。

首先,将以上 5 种类型原始图像进行 3 次采样,使其长和宽分别缩小为原来的 50%,70% 以及 30%。然后分别采用双线性插值、双三次插值、文献[10]中的方法、文献[11]中的方法以及本文提出的方法对采样后的图像进行插值,使其恢复到原始图像的大小。对各插值结果图像从主观评价和客观评价两个方面进行对比分析。主观评价对比各插值结果图像的清晰度、边缘锯齿和毛刺大小以及是否存在马赛克。客观评价对比各插值结果图像的峰值信噪比以及算法运行时间。

峰值信噪比^[20-21] (Peak signal to noise ratio, PSNR) 是处理图像与原始图像之间均方误差相对于灰度级的平方的对数值。其值越大,表示两幅图像越接近,对应的插值算法精度越高。用峰值信噪比衡量两幅图像的相似程度,结果较为准确。灰度级为 256 的灰度图像,其峰值信噪比为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(m,n) - \hat{f}(m,n))^2} \quad (21)$$

式中: M 和 N 分别为图像水平和垂直的采样点数; $f(m,n)$ 为原始图像; $\hat{f}(m,n)$ 为处理图像。

4.2 实验结果对比分析

本节对长宽缩小至 50%, 70% 以及 30% 的图像插值结果分别进行分析比较, 所有结果均是在 CPU 为 AMD Athlon(tm) II X2 245 Processor, 主频为 2.91 GHz, 内存为 2 GB 的计算机中进行, 同时相关方法编程的语言为 C++, 实现的软件平台均为 Microsoft Visual C++ 6.0。

4.2.1 长宽缩小至 50% 图像插值结果

(1) 主观评价

主观评价是通过人眼观察对图像插值结果做出评价, 重点关注插值结果图像的清晰度、边缘锯齿和毛刺的大小多少以及是否存在马赛克。图像越清晰、边缘锯齿和毛刺越少插值算法精度越高。由于篇幅限制, 本文只给出 PCB 图像使用各种插值算法进行插值的结果图像。为了便于观察对比, 只截取各图像左上角部分区域, 并用矩形框或线条(红色线条与图像边界包围的区域)将重点关注区域标注出来, 如图 4 所示。

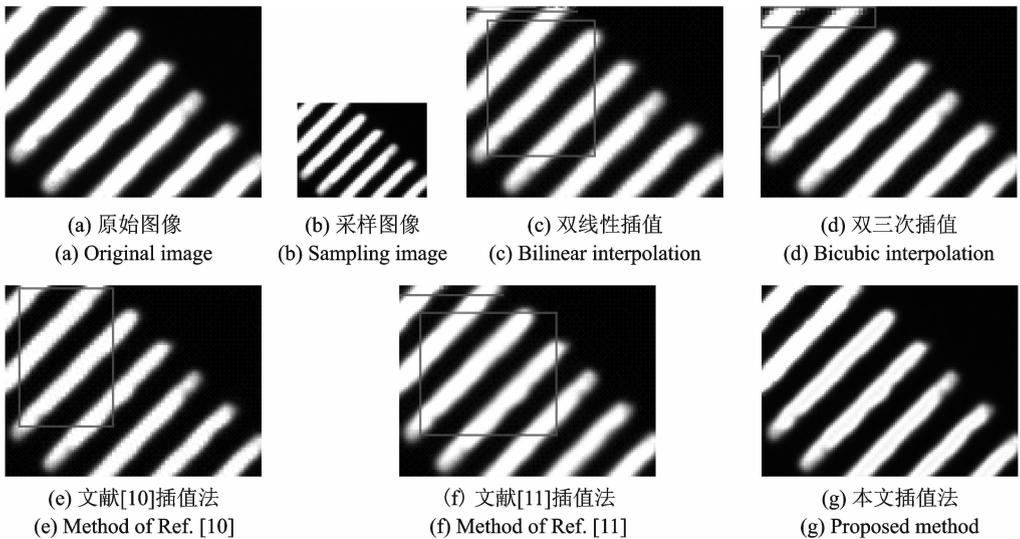


图 4 长宽缩小至 50% PCB 图像各算法插值结果

Fig. 4 Interpolation experiment results of PCB image reduced to 50%

将原始图像长和宽均缩小为原来的 50%, 再分别使用 5 种插值算法插值放大为原始图像大小, 属于 2^n 倍插值放大。从插值结果图像可以看出, 双线性插值法与文献[10]的插值方法没有明显的锯齿, 但存在较多的边缘毛刺, 且清晰度较低, 两种插值方法精度相当, 文献[10]的插值方法略胜一筹。双三次插值法与文献[11]的插值方法清晰度较高, 无锯齿和明显的边缘毛刺, 但在部分边缘区域存在马赛克现象, 两种插值方法精度相当。本文插值算法无锯齿、马赛克和明显的边缘毛刺, 清晰度最高, 视觉效果最好。

(2) 客观评价

客观评价是按照式(21)计算各插值结果图像相比原始图像的峰值信噪比, 并统计各算法运行时间。峰值信噪比越高, 插值结果图像与原始图像越接近, 相应的插值算法精度越高。具体数据如表 1 和表 2

所示。

表 1 长宽缩小至 50% 图像各算法插值结果峰值信噪比

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	29.111	29.677	29.091	25.365	39.211
双三次插值	30.920	31.045	30.490	24.588	41.124
文献[10]插值法	29.324	30.107	30.120	24.926	40.328
文献[11]插值法	30.560	30.833	30.203	25.354	41.104
本文插值法	30.997	31.507	30.785	25.765	41.474

表 2 长宽缩小至 50% 图像各算法插值消耗时间

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	0.015	0.015	0.016	0.016	0.187
双三次插值	0.110	0.157	0.094	0.156	1.781
文献[10]插值法	0.025	0.031	0.029	0.030	0.342
文献[11]插值法	0.023	0.029	0.030	0.030	0.312
本文插值法	0.015	0.016	0.016	0.016	0.188

从表 1,2 可以看出,把图像的长和宽均放大 2 倍,属于 2^n 倍插值放大,本文提出的算法比双线性插值算法峰值信噪高 0.4~2.26 dB,比双三次插值算法高 0.08~0.46 dB,比文献[10]中的算法高 0.67~1.63 dB,比文献[11]中的算法高 0.370~0.674 dB。在运行速度上,本文提出的算法与双线性插值算法速度相当,大约是双三次插值算法速度的 9.16 倍,是文献[10]中算法速度的 1.94 倍,是文献[11]中算法速度的 1.69 倍。

4.2.2 长宽缩小至 70% 图像插值结果

(1) 主观评价

用类似于长宽缩小至 50% 图像的方法进行对比,将原始图像长和宽均缩小为原来的 70%,再分别使用 5 种插值算法插值放大为原始图像大小,这里属于非 2^n 倍插值放大,结果如图 5 所示。从插值结果图像可以看出,双线性插值法和文献[10]的插值方法没有明显的锯齿,但存在部分边缘毛刺,清晰度一般,两种插值方法精度相当,双线性插值方法略胜一筹。双三次插值法和文献[11]的插值方法清晰度较高,无锯齿,但有少许边缘毛刺,且部分边缘区域存在马赛克现象。本文插值算法无锯齿、马赛克和明显的边缘毛刺,清晰度最高,视觉效果最好。

(2) 客观评价

同样按照式(21)计算各插值结果图像相比原始图像的峰值信噪比,并统计各算法运行时间。具体数据如表 3 和表 4 所示。从以上两表可以看出,把图像的长和宽均放大 10/7 倍,属于非 2^n 倍插值放大,本文提出的算法比双线性插值算法峰值信噪高 0.38~3.02dB,比双三次插值算法高 0.23~0.84 dB,比文献[10]中的算法高 1.02~3.97 dB,比文献[11]中的算法高 0.231~1.270 dB。在运行速度上,本文提出的算法与双线性插值算法速度相当,大约是双三次插值算法速度的 11.49 倍,是文献[10]中算法速度的 1.85 倍,是文献[11]中算法速度的 1.68 倍。

4.2.3 长宽缩小至 30% 图像插值结果

(1) 主观评价

用类似于长宽缩小至 50% 图像的方法进行对比,将原始图像长和宽均缩小为原来的 30%,再分别

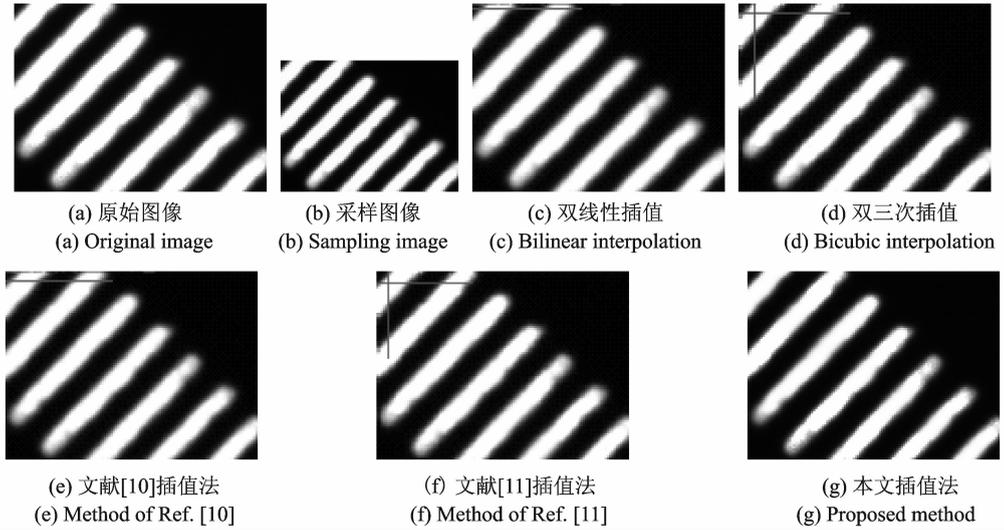


图 5 长宽缩小至 70%PCB 图像各算法插值结果

Fig. 5 Interpolation experiment results of PCB image reduced to 70%

表 3 长宽缩小至 70%图像各算法插值结果峰值信噪比

Tab. 3 PSNR of different algorithms for images reduced to 70% dB

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	31.275	31.792	30.996	27.579	40.118
双三次插值	33.971	33.431	33.228	27.731	40.804
文献[10]插值法	30.324	31.137	30.632	26.946	40.003
文献[11]插值法	33.543	32.996	33.102	27.734	40.608
本文插值法	34.296	34.266	33.688	27.965	41.568

表 4 长宽缩小至 70%图像各算法插值消耗时间

Tab. 4 Computation time of different algorithms for images reduced to 70% s

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	0.016	0.016	0.016	0.016	0.187
双三次插值	0.109	0.203	0.125	0.219	2.250
文献[10]插值法	0.023	0.034	0.031	0.030	0.352
文献[11]插值法	0.021	0.033	0.030	0.028	0.313
本文插值法	0.016	0.016	0.017	0.016	0.188

使用 5 种插值算法插值放大为原始图像大小,这里属于非 2ⁿ 倍插值放大,结果如图 6 所示。

从插值结果图像可以看出,双线性插值法和文献[10]的插值方法没有明显的锯齿,但存在较多的边缘毛刺,清晰度一般,总体插值效果较差。双三次插值法和文献[11]的插值方法清晰度较高,无锯齿,但有少许边缘毛刺,且部分边缘区域存在马赛克现象。本文插值算法无锯齿、马赛克和明显的边缘毛刺,清晰度最高,视觉效果最好。

(2) 客观评价

同样按照式(21)计算各插值结果图像相比原始图像的峰值信噪比,并统计各算法运行时间。具体数据如表 5,6 所示。

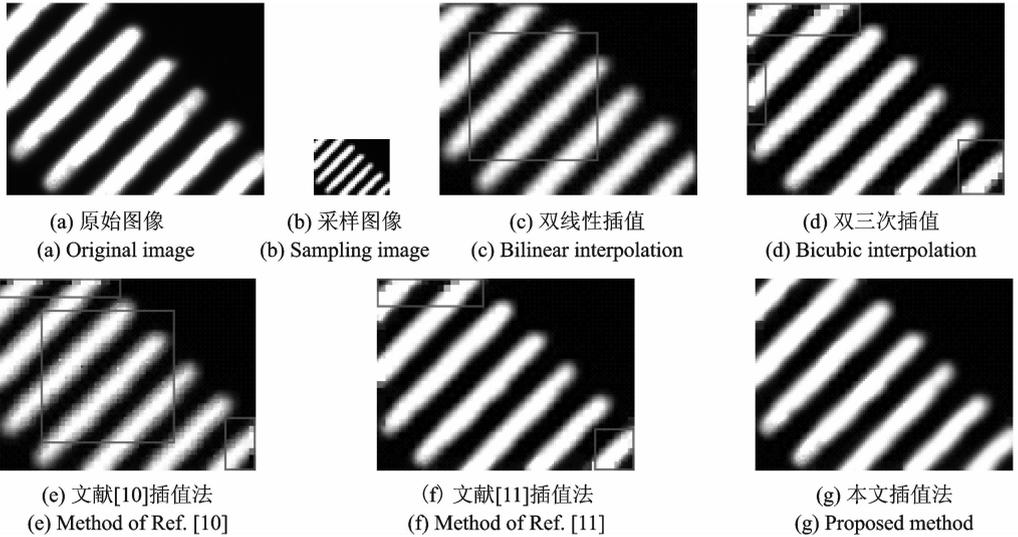


图 6 长宽缩小至 30% PCB 图像各算法插值结果

Fig. 6 Interpolation experiment results of PCB image reduced to 30%

表 5 长宽缩小至 30% 图像各算法插值结果峰值信噪比

Tab. 5 PSNR of different algorithms for images reduced to 30% dB

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	24.046	26.524	24.662	22.264	33.798
双三次插值	26.621	27.973	26.733	22.313	36.131
文献[10]插值法	24.012	26.513	24.528	22.171	33.046
文献[11]插值法	26.032	27.615	26.365	22.325	36.788
本文插值法	27.328	28.324	26.998	23.103	37.323

表 6 长宽缩小至 30% 图像各算法插值消耗时间

Tab. 6 Computation time of different algorithms for images reduced to 30% s

插值算法	Lena 图像	鼠图像	花图像	狗图像	PCB 图像
双线性插值	0.015	0.015	0.016	0.016	0.187
双三次插值	0.110	0.188	0.109	0.203	2.234
文献[10]插值法	0.023	0.033	0.030	0.030	0.350
文献[11]插值法	0.022	0.033	0.029	0.027	0.311
本文插值法	0.016	0.016	0.016	0.016	0.188

从表 5,6 可以看出,把图像的长和宽均放大 $10/3$ 倍,属于非 2^n 倍插值放大,本文提出的算法比双线性插值算法峰值信噪高 $0.839 \sim 3.525$ dB,比双三次插值算法高 $0.265 \sim 1.192$ dB,比文献[10]中的算法高 $0.932 \sim 4.277$ dB,比文献[11]中的算法高 $0.535 \sim 1.296$ dB。在运行速度上,本文提出的算法与双线性插值算法速度相当,大约是双三次插值算法速度的 11.29 倍,是文献[10]中算法速度的 1.85 倍,是文献[11]中算法速度的 1.57 倍。

综上所述,无论对图像进行 2^n 倍插值放大还是非 2^n 倍插值放大,本文提出的算法均具有较高的插值精度,避免了文献[10]类似方法在对图像非 2^n 倍插值放大时效果明显变差的问题,适用于任意级别插值变换。此外,算法具有较低的时间复杂度,性能良好。

5 结束语

本文提出了一种分区域多方向数据融合图像插值方法。该方法将待插值图像分为灰度平坦区域和边缘纹理区域。在灰度平坦区域使用简单快速的双线性插值方法,在获得良好插值效果的同时减少了计算量,提高了运行速度。在边缘纹理区域则基于距离平方的反比,计算待插值点在源图像中的对应点 4×4 邻域内最近的水平、垂直和对角4个方向上的12个像素点沿这4个方向的估计值;然后结合方向灰度梯度和插值距离两个权重因子构造融合系数,进行数据融合,获得最终插值。有效解决了现有插值方法在边缘纹理区域插值经常出现的锯齿、毛刺和模糊等问题。实验表明,该方法很好地解决了现有图像插值算法在插值速度与精度上的矛盾,并且适用于任意级别插值变换,应用范围广泛。

参考文献:

- [1] Soltan E A, Elkhamy S E. Wavelet-based image interpolation with a least squares algorithm[J]. Computer Engineering Conference, 2010, 10(21): 103-106.
- [2] Hung K W, Siu W C. Robust soft-decision interpolation using weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(3): 1061-1069.
- [3] Zhang Y F, Bao F X, Zhang C M. A weighted bivariate blending rational interpolation function and visualization control[J]. Journal of Computational Analysis and Applications, 2012, 14(7): 1303-1320.
- [4] 康牧, 陈向奎, 林晓. 一种基于组合的图像插值方法[J]. 河南师范大学学报, 2015, 43(2): 164-168.
Kang Mu, Chen Xiangkui, Lin Xiao. The combination methods of image interpolation[J]. Journal of Henan Normal University, 2015, 43(2): 164-168.
- [5] 宁阳, 张云峰, 何军, 等. 基于有理函数的遥感水体污染图像的自适应插值[J]. 济南大学学报, 2015, 30(2): 111-117.
Ning Yang, Zhang Yunfeng, He Jun, et al. Adaptive interpolation of remote sensing imagery based on rational function model [J]. Journal of University of Jinan, 2015, 30(2): 111-117.
- [6] Zhang X J, Wu X L. Image interpolation by adaptive 2-d autoregressive modeling and soft-decision estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(6): 887-896.
- [7] Chang S G, Cvetkovic Z, Vetterli M. Locally adaptive wavelet-based image interpolation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1471-1485.
- [8] 李跃. 基于边缘定向的图像插值算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
Li Yue. Edge-oriented image interpolation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [9] 李春龙, 潘海侠, 王华峰. 自适应立方卷积图像插值算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(10): 1463-1468.
Li Chunlong, Pan Haixia, Wang Huafeng. Adaptive cubic convolution based image interpolation approach[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(10): 1463-1468.
- [10] 孙毓敏. 一种基于融合的方向自适应插值算法及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
Sun Yumin. A locally orientation-adaptive and fusion-based algorithm for image interpolation[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [11] 邓彩. 图像插值算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
Deng Cai. Research of image interpolation algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] Matsuo K, Aoki Y. Depth interpolation using tangent planes on super pixels of a color image[J]. Electronics and Communications in Japan, 2015, 98(12): 17-29.
- [13] He H, Siu W C. Single image super-resolution using Gaussian process regression[J]. IEEE Transactions on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011, 42(7): 449-456.
- [14] 孙冬, 高清维, 卢一相, 等. 基于超分辨率分形解码和误差补偿的图像插值算法[J]. 安徽大学学报, 2015, 39(4): 50-56.
Sun Dong, Gao Qingwei, Lu Yixiang, et al. Image interpolation algorithm based on fractal super-resolution decoding and error compensation[J]. Journal of Anhui University, 2015, 39(4): 50-56.
- [15] Dong W S, Zhang L, Lukac R, et al. Sparse representation based image interpolation with non-local autoregressive modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(4): 1382-1394.
- [16] Jia X F, Zhao B. Demosaicing algorithm for color filter arrays based on SVMs[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2013, 10(1): 212-217.

- [17] 贾茜, 易本顺, 肖进胜. 基于结构成分双扩展的图像插值算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2541-2548.
Jia Qian, Yi Benshun, Xiao Jinsheng. Image interpolation algorithm based on structure component bidirectional diffusion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2541-2548.
- [18] 刘一方, 张云峰, 郭强, 等. 人眼视觉感知模型指导的有理函数图像插值[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 43(1): 170-175.
Liu Yifang, Zhang Yunfeng, Guo Qiang, et al. Rational function for image interpolation based on human contrast sensitivity [J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 43(1): 170-175.
- [19] Zhang L, Li X M. Image interpolation through surface reconstruction[J]. *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing*, 2013, 23(4): 25-29.
- [20] 曹洪建, 赵耀, 倪蓉蓉. 基于冗余性的图像重采样检测[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(1): 116-120.
Cao Hongjian, Zhao Yao, Ni Rongrong. Detection of resampling in digital image based on redundancy[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(1): 116-120.
- [21] 张翼鹏, 陈亮, 郝欢, 等. 一种改进的基于FFT的信号插值算法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 173-177.
Zhang Yipeng, Chen Liang, Hao Huan, et al. Improved algorithm for interpolation based on FFT[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(2): 173-177.

作者简介:



齐敏(1968-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 三维图形与视景仿真、图像处理与模式识别, E-mail: drqimin@nwpu.edu.cn。



程恭(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 图形图像处理、机器视觉和模式识别。



杜乾敏(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 图形图像处理、虚拟现实和模式识别。



朱柏飞(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 图形图像处理、虚拟现实和模式识别。



魏效昱(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 图形图像处理、机器视觉和模式识别。

