

一种高空间分辨率遥感影像的快速自适应插值算法

徐帅婧¹ 张立保^{1,2} 李泽华³ 李傲雪¹

(¹ 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875; ² 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

³ 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 针对高空间分辨率遥感影像图幅较大、地物特征丰富以及边缘信息复杂等特点, 提出了一种新的快速自适应插值方法, 在较低计算复杂度下, 有效改善了高空间分辨率遥感影像的插值效果。新算法按照坐标的奇偶性将待插值点分组, 并利用 Canny 算子获得原始图像边缘; 将相邻 4 个像素所组成的矩形区域按照边缘特点划分为 5 种类型, 并针对各类插值点完成快速插值; 利用已插值点和原像素点间的关系对剩余未插值点二次赋值。实验结果表明, 新算法不仅具有较低计算复杂度, 而且有效改善了传统插值方法产生的锯齿和模糊现象, 获得了较高的峰值信噪比, 对遥感影像插值算法的研究具有重要实际价值。

关键词 图像处理; 遥感影像; 图像插值; 边缘检测

中图分类号 TN919.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.s110005

A Fast Adaptive Interpolation Algorithm of High Spatial Resolution Remote Sensing Image

Xu Shuaijing¹ Zhang Libao^{1,2} Li Zehua³ Li Aoxue¹

¹ College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

³ College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract For the high spatial resolution remote sensing image, the size is vast, the object features are abundant and the edge information is complex. According to its characteristics, a fast adaptive interpolation algorithm applied to the high spatial resolution remote sensing image is proposed. The new algorithm classifies the interpolative dots according to the parity of the coordinate, and gets edges of the original image by applying the Canny operator. Every rectangular area comprised of four neighboring pixel is classified into five types in accordance with the edge characteristics, and the fast interpolation is finished for different types of the interpolative dots. The relationship among pixel of the original image and the assigned interpolation points are used to assign values to the rest dots. Experimental results show that the new algorithm can not only have a low computational complexity, but also accurately preserve edges and prevent blur. In addition, it can effectively enhance the low peak signal to noise ratio. The new algorithm has high practical value to researches on interpolation algorithm of the remote sensing image.

Key words image processing; remote sensing; image interpolation; edge detection

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 120.0280

1 引 言

随着对地观测技术的迅速发展, 遥感影像已经广泛应用于环境监控、考古调查、军事勘测、资源调查等各个领域。高分辨率遥感图像不但可以清晰地

分辨出地物目标的内部细节, 而且可以准确展示目标之间的空间关联^[1]。尽管如此, 高分辨率遥感图像在诸多实际应用中仍无法满足实际需要, 如小目标的有效提取以及变化检测等方面。为了进一步改

收稿日期: 2014-02-25; 收到修改稿日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61071103)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012LYB50)

作者简介: 徐帅婧(1993—), 女, 本科生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: 1971534608@qq.com

导师简介: 张立保(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感图像分析方面的研究。E-mail: libaozhang@163.com

(通信联系人)

善影像的视觉效果,为后续信息提取或识别提供必要保障,有必要对高空间分辨率遥感影像进行插值处理^[2]。

文献[3-5]给出了目前应用较为广泛的传统影像插值方法,包括最近邻插值法(NNI)、双线性插值法(BLI)以及立方卷积插值法(BCI)。在最近邻插值法中,待插点的像素值取自原图像中离其最近点的灰度值,会产生明显锯齿效应;双线性插值法和立方卷积插值法分别利用原图像中周围 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 或 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 个相邻点的灰度值计算待插点像素值,插值后的图像因高频分量受损而边缘模糊。文献[6]针对立方卷积插值方法做了改进,对遥感图像进行轮廓波分解,再用立方卷积插值做高频外推相似变换,在视觉效果上有了明显改善,但增加了计算复杂度。

文献[7]摒弃了传统插值思想,提出了局部自适应插值算法(LAI),利用梯度阈值判断图像边缘区域,沿边缘方向插值后,将未定义像素用局部相邻像素直方图加权填充。文献[8]基于LAI算法提出了一种改进的自适应插值算法(ILSI)。该算法对边缘区域进行了更为详尽的划分,并且充分考虑了待插值点之间的相互影响。然而,ILSI算法依然存在一些缺陷。1)该算法复杂的插值方法和对阈值的确定过程导致了极大的运算量,对于尺寸较大、信息量丰富的高分辨率遥感图像而言效率尤为低下;2)边缘判断的不连贯性和不准确性使得插值后遥感图像的效果不佳,直接影响采集的地物目标信息的准确度。

针对上述问题,本文提出了一种基于边缘检测的快速自适应插值算法(ED-FAI),针对高分辨率遥感图像容量丰富、精度要求高等特点,通过图像扩展、边缘检测、分组插值以及二次插值等步骤,有效提高了峰值信噪比和运算效率,保持了遥感图像中需要关注的细节和边缘,得到了更为清晰的视觉效果,可以应用在对遥感影像进行图像放大、图像超分辨率重建等方面的研究。

2 基于边缘检测的快速自适应插值算法

2.1 图像扩展

对原图像每个 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 局部进行如图1所示的扩展。图像扩展的核心方法是在原图像每行像素之间增加一行、每列像素之间增加一列。扩展图像中所有像素点分组标准为 1) P 组点:横纵坐标均为偶数的点,记为 $P: \{p(x,y) \mid x = 2i, y = 2j, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$,在 F 中, P 类点的灰度值

为 $p(x,y) = I(i,j)$,其中 $x = 2i, y = 2j$;

2) A 组点:横纵坐标分别为偶数和奇数的点,记为 $A: \{a(x,y) \mid x = 2i, y = 2j+1, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n-1\}$;

3) B 组点:横纵坐标分别为奇数和偶数的点,记为 $B: \{b(x,y) \mid x = 2i+1, y = 2j, i = 1, 2, \dots, m-1, j = 1, 2, \dots, n\}$;

4) C 组点:横纵坐标均为奇数的点,记为 $C: \{c(x,y) \mid x = 2i+1, y = 2j+1, i = 1, 2, \dots, m-1, j = 1, 2, \dots, n-1\}$;

5) D 组点:横坐标为 1 或纵坐标为 1 的点,记为 $D: \{d_1(x,y) \mid x = 1, y = 1, 2, \dots, 2n\} \cup \{d_2(x,y) \mid x = 1, 2, \dots, 2m, y = 1\}$ 。

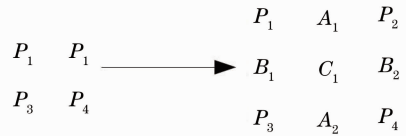


图1 对原图像 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 局部扩展
Fig. 1 Expansion of $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ local region of original image

根据坐标的奇偶性,将像素点进行分组,并把原图像像素点在扩展图像中的位置确定下来。有两个主要作用:1)便于在之后的步骤中利用原图像像素点进行插值;2)为分组插值提供前提,使插值具有针对性。

2.2 边缘检测

利用 Canny 算子^[9-10]对待插值图像进行边缘检测,可以得到边缘检测图,该图中边缘像素点灰度值为 1,非边缘像素点灰度值为 0,如图 2 所示。

对于待插值图像 I 的每一个 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 局部,边缘检测结果一共存在 16 种可能性,如图 3 所示,其中,黑点表示边缘像素点,白点表示非边缘像素点。

对原图像 I 的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 局部检测边缘,得到了 16 种边缘情况,其主要作用为:

1) Canny 算子的诸多优点保证了边缘检测的精准性;

2) 为分组插值提供了边缘与非边缘方面的区分,使插值具有针对性。

2.3 自适应插值

2.3.1 基于 P 组点插值

由第 2.1 小节可知,扩展图像中 P 组点就是待插值原图像的像素点。根据以上 16 种不同边沿检测结果,可以将这 16 种情况分为 5 类,对应采取的插值方法为:

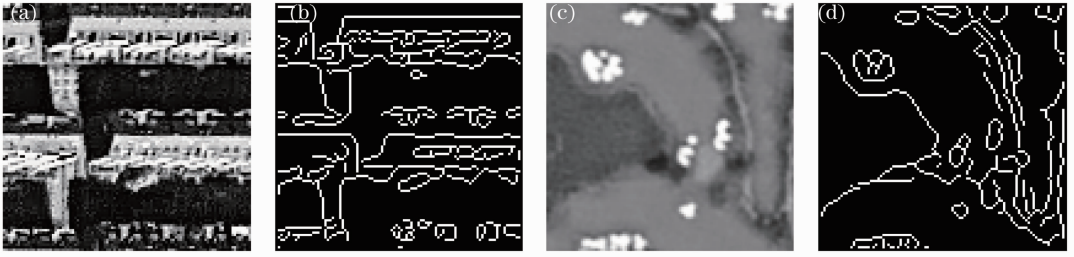


图2 对遥感图像 PA-1 和 PA-2 局部进行边缘检测。(a) PA-1 局部；(b)对(a)的边缘检测；(c) PA-2 局部；(d)对(c)的边缘检测

Fig. 2 Edge detection of local regions of the remote sensing image PA-1 and PA-2. (a) Part of PA-1; (b) edge detection of (a); (c) part of PA-2; (d) edge detection of (c)

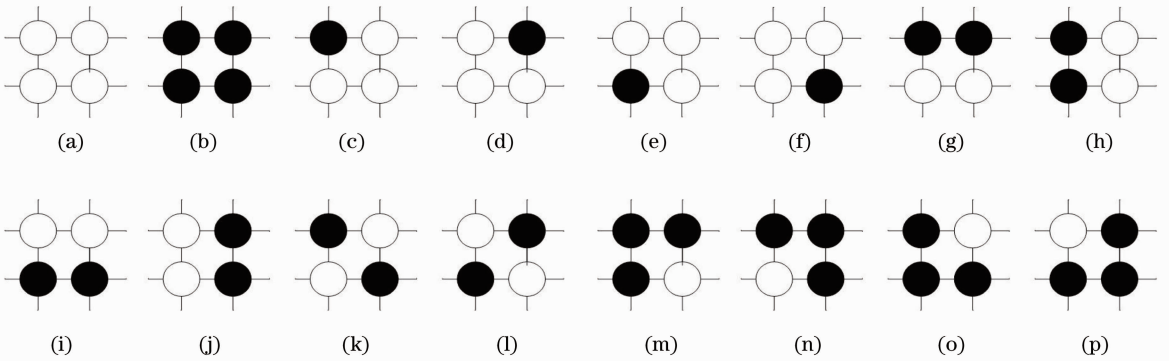


图3 边缘检测后可能结果

Fig. 3 Possible results after edge detection

1) 当4个点均为边缘点或者均为非边缘点时[如图3中(a)、(b)],直接双线性插值。以情况(a)为例,有

$$\begin{cases} A_1 = (P_1 + P_2)/2 \\ A_2 = (P_3 + P_4)/2 \\ B_1 = (P_1 + P_3)/2 \\ B_2 = (P_2 + P_4)/2 \\ C_1 = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)/4 \end{cases} \quad (1)$$

2) 当4个点中只有一个为边缘点时[如图3中(c)、(d)、(e)、(f)],介于边缘点和非边缘点之间的点先不予考虑,其余点插值规则以情况(c)为例,有

$$\begin{cases} A_2 = (P_3 + P_4)/2 \\ B_2 = (P_2 + P_4)/2 \\ C_1 = (P_2 + P_3 + P_4)/3 \end{cases} \quad (2)$$

3) 当4个点中只有两个为边缘点且不是对角线方向时[如图3中(g)、(h)、(i)、(j)],介于边缘点和非边缘点之间的点先不予考虑,其余点插值规则以情况(g)为例,有

$$\begin{cases} A_1 = (P_1 + P_2)/2 \\ A_2 = (P_3 + P_4)/2 \\ C_1 = (P_3 + P_4)/2 \end{cases} \quad (3)$$

4) 当4个点中只有两个为边缘点且是对角线方向时[如图3中(k)、(l)],介于边缘点和非边缘点之间的点先不予考虑,其余点插值规则以情况(k)为例,有

$$C_1 = (P_1 + P_4)/2. \quad (4)$$

5) 当4个点中三个为边缘点时[如图3中(m)、(n)、(o)、(p)],介于边缘点和非边缘点之间的点先不予考虑,其余点插值规则以情况(m)为例,有

$$\begin{cases} A_1 = (P_1 + P_2)/2 \\ B_1 = (P_1 + P_3)/2 \\ C_1 = (P_1 + P_2 + P_3)/3 \end{cases} \quad (5)$$

针对5类情况进行插值,具有以下三个优点:

1) 有针对性的插值提高了扩展图像的准确度;
2) 针对 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 的局部区域利用特定原图像像素点计算插值点,准确且简便;

3) 对于没有判定好边缘方向的点没有随意赋值,而是留到以后处理,进一步提高插值准确性。

2.3.2 基于部分P组点和C组点灰度值的二次插值

经过上述处理后,扩展图像中C组点全部被赋值,A组像素点和B组像素点部分被赋值。根据已赋值的C组点是否由边缘点估计,可进一步判断这

些 C 组点是否为边缘点,从而利用 P 组点和 C 组点对未被赋值的 A 组点和 B 组点进行插值。

对于 A 组点,共有 8 种未被赋值的情况,这 8 种情况可分为以下两类:1) 与之相邻 C 组点同是边缘点或非边缘点[如图 4 中(a)、(b)、(c)、(d)];2) 与之相邻 C 组点一个是边缘点一个是非边缘点[如图 4 中(e)、(f)、(g)、(h)]。图 4 中边缘点示意部分中的黑点是边缘点,白点是非边缘点,花点表示该点

为边缘点或非边缘点,“?”是未赋值的 A 组点;在图 4(d)、(h)中,类型点示意部分对应着边缘点示意部分标出像素点类型。

同理,对于 B 组点,未被赋值的 8 种情况也分为以下两类:1) 与之相邻 C 组点同是边缘点或非边缘点[如图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)];2) 与之相邻 C 组点一个是边缘点一个是非边缘点[如图 5 中(e)、(f)、(g)、(h)]。图 5 中各参量含义与图 4 对应。

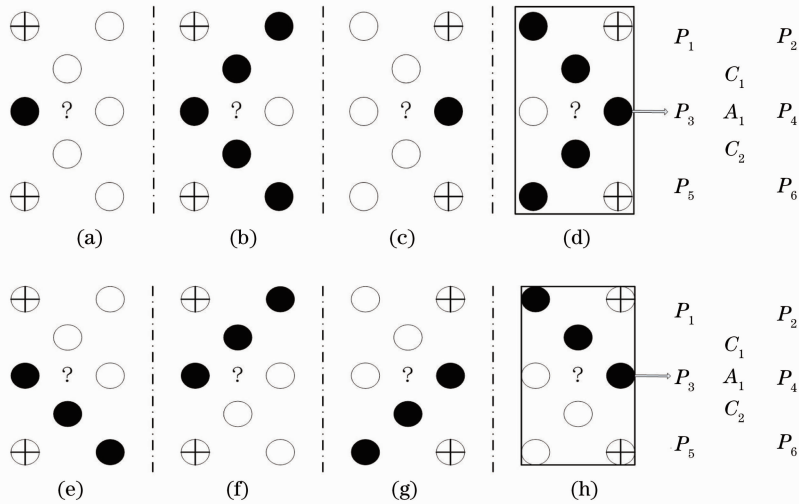


图 4 A 组点未被赋值的可能情况

Fig. 4 Possible situations where A-kind point is not assigned

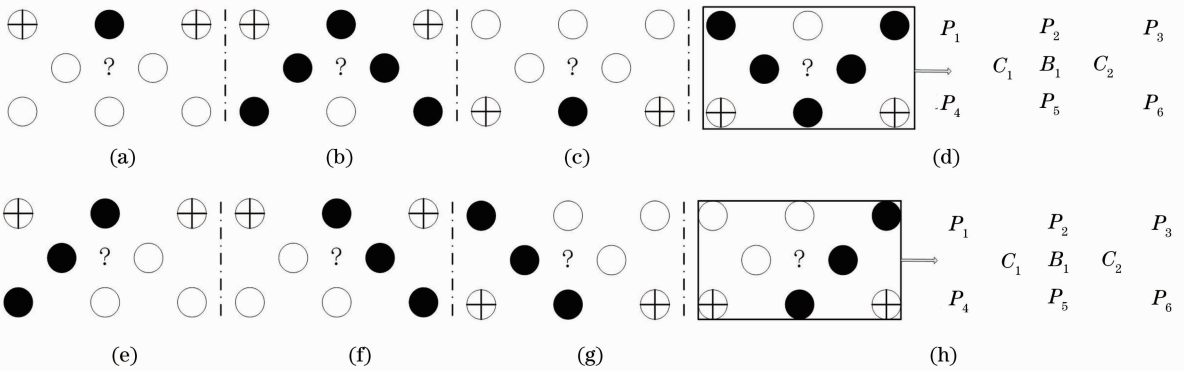


图 5 B 组点未被赋值的可能情况

Fig. 5 Possible situations where B-kind point is not assigned

针对未被赋值的 A 组点和 B 组点,对应采取的插值方法具体为:

1) 第一类未赋值 A 组点由相邻两个 C 组点确定。以图 4 情况(d)为例,有

$$A_1 = (C_1 + C_2)/2. \quad (6)$$

2) 第二类未赋值 A 组点由相邻 C 组点中的非边缘点与离之最近的 P 组非边缘点确定。以图 4 情况(h)为例,有

$$A_1 = (C_2 + P_3)/2, \quad (7)$$

3) 第一类未赋值 B 组点由相邻两个 C 组点确定。以图 5 情况(d)为例,有

$$B_1 = (C_1 + C_2)/2. \quad (8)$$

4) 第二类未赋值 B 组点由相邻 C 组点中的非边缘点与离之最近的 P 组非边缘点确定。以图 5 情况(h)为例,有

$$B_1 = (C_1 + P_2)/2, \quad (9)$$

这里针对 4 类情况进行插值,除了具有第 2.3.1 节中所述优点外,还充分利用了已插值点的信息,使对

插值点的估计更加准确。

3 实验结果与算法评价

实验对双线性插值算法、立方卷积插值算法、文献[7]中的算法和这里提出的算法进行比较。实验图片来源于 SPOT5 卫星,空间分辨率为 2.5 m,图片大小为 2048 pixel \times 2048 pixel,图片数据库包含 16 张遥感图片。在 Intel(R) Core(TM) i5-2450M CPU、内存 4 GB 的计算机上利用 Matlab(R) 2010b 进行实验。

3.1 定性评价

图 6 分别比较了双线性插值算法 BLI、立方卷积插值算法 BCI、文献[7]中的 ILSI 算法和所提的 ED-FAI 算法针对遥感影像 PA-1 和 PA-2 的结果。通过图 6 不难看出:双线性插值和立方卷积插值由

于插值时利用了周围点的信息,损失了高频分量,导致边缘模糊;ILSI 算法相比上述两种插值算法得到了更清晰的图像,但由于边缘判断的不准确性和不连贯性,产生了突兀的条状区域;而所提算法较之经典算法保持了边缘细节,并且视觉效果更加清晰,而较之 ILSI 算法边缘相对平滑,过度相对自然。综上所述,所提算法在视觉上明显优于其他算法。

3.2 定量评价

峰值信噪比(PSNR)用来衡量融合图像相对于标准参考图像灰度的偏离程度,其值越大,说明融合图像和标准参考图像的差异越小,融合效果越好。由图 7(a)可知,双线性插值、立方卷积插值和 ILSI 算法充分利用周围像素点信息插值,PSNR 值较大,而所提算法准确区分了边缘,针对不同情况分别利用恰当的插值方法,所以 PSNR 值最高。

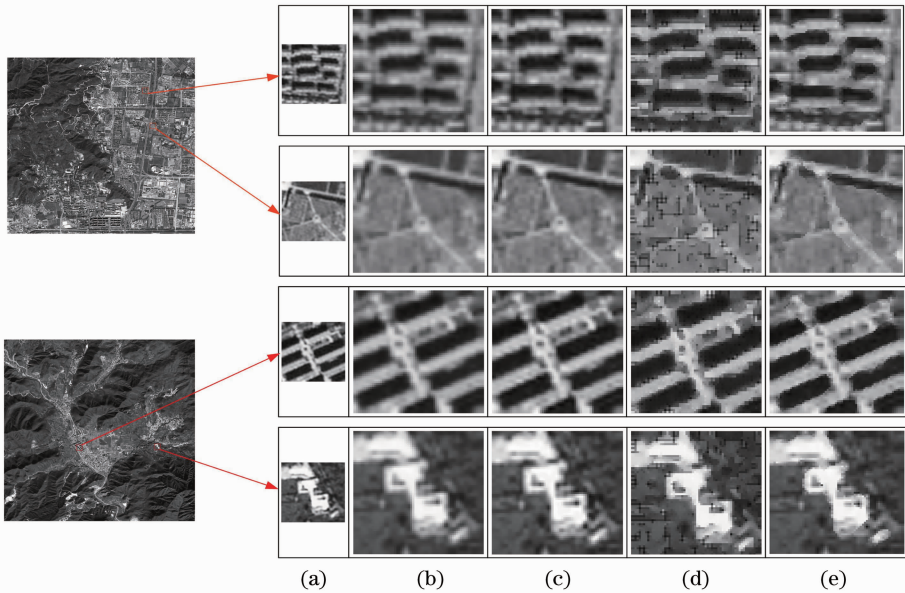


图 6 不同算法对遥感图像 PA-1 和 PA-2 局部插值效果比较。(a)原始图像;(b)BLI;(c)BCI;(d)ILSI;(e)ED-FAI
Fig. 6 Comparison of interpolation results on local regions of remote sensing picture PA-1 and PA-2. (a) Original image; (b) BLI; (c) BCI; (d) ILSI; (e) ED-FAI

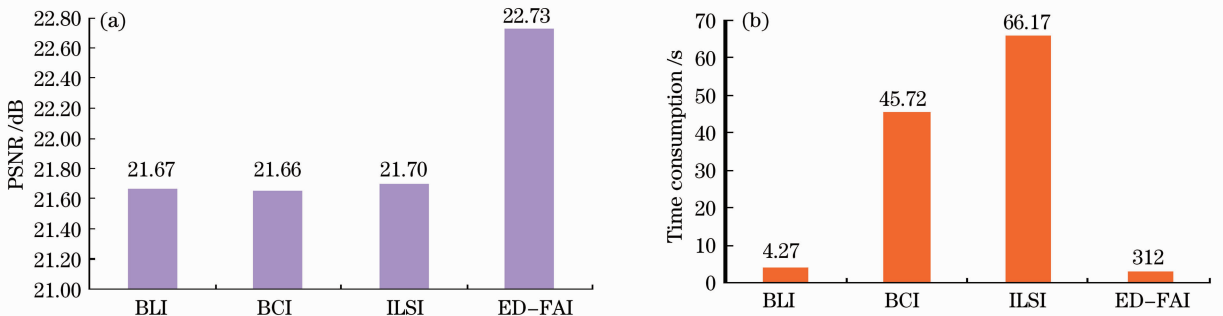


图 7 4 种不同算法的定量比较。(a)平均 PSNR;(b)平均耗时

Fig. 7 Quantitative comparison of four algorithms. (a) Average PSNR; (b) average time consumption

代码耗时是评价算法复杂度的一项有效指标。由图 7(b)可知,ILSI 算法中设定阈值及分组情况复杂,计算复杂度最高;立方卷积插值利用插值点周围 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 的像素信息计算像素,代码耗时较长;双线性插值只利用了周围 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 的像素信息,耗时相对较短;而提出的算法最多利用 4 个、最少利用 2 个像素点信息计算,计算复杂度最低,是一种快速的插值方法。

3.3 实验分析

在所提算法中,边缘检测的好坏对插值效果影

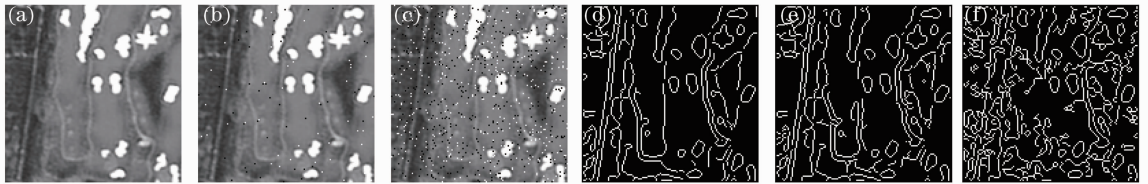


图 8 对遥感图像 PA-3 局部进行加椒盐噪声后的 Canny 边缘检测。(a) PA-3 局部;(b) 0.05 密度噪声污染后的(a);(c) 0.5 密度噪声污染后的(a);(d)对(a)的边缘检测;(e)对(b)的边缘检测;(f)对(c)的边缘检测

Fig. 8 Canny edge detection of a local region of the remote sensing image PA-3 polluted by pepper-salt noise. (a) Part of PA-3; (b) (a) polluted by 0.05-density noise; (c) (a) polluted by 0.5-density noise; (d) edge detection of (a); (e) edge detection of (b); (f) edge detection of (c)

4 结 论

传统插值方法应用于高分辨率遥感影像往往存在插值效果不理想、计算复杂度高等问题,提出了一种基于边缘检测的快速自适应插值算法 ED-FAI,把传统插值与自适应插值方法的优点结合,基于插入点像素值对其他插入点像素点的影响进行了二次插值,既可以清晰准确提高视觉效果,保持边缘,又在较低计算复杂度的情况下提高了峰值信噪比。针对高分辨率遥感图像数据量大、含有大量边缘及细节信息等特点,本算法无论是在效果还是在效率上都优先于其他算法,将来可采用更具稳健性的边缘检测方法进一步提升插值效果。

参 考 文 献

- Zhong Jiusheng. Research on Super-Resolution Reconstruction Algorithm of Optical Remote Sensing Image Based on Sparse Representation [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. 钟九生. 基于稀疏表示的光学遥感影像超分辨率重建算法研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- Fan Chong, Gong Jianya, Zhu Jianjun, *et al.*. Super-resolution reconstruction algorithm of ALOS-PRISM remote sensing image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 75–82. 范冲, 龚健雅, 朱建军, 等. ALOS-PRISM 遥感影像超分辨率重建 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 75–82.
- Y Bai, H Zhuang. On the comparison of bilinear, cubic spline, and fuzzy interpolation techniques for robotic position

响很大,因此有必要对 Canny 边缘检测结果进行分析。Canny 算子容易把噪声误判为边缘,由图 8 可知,在噪声污染严重的情况下,假边缘现象严重,但由于高分辨率影像噪声很小,该影响对所提算法而言可忽略不计。利用 Canny 算子检测边缘还有可能出现阈值判定不准的情况。如果阈值过高会相对影响细节效果,相应效果略差一点;如果阈值过低会造成虚假边缘,在所提算法中会把非边缘区域当作边缘区域进行插值,带来的影响仅是稍微增加计算量,并不影响所提算法的整体优势。

- measurements [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2005, 54(6): 2281–2288.
- G Ramponi. Warped distance for space-variant linear image interpolation [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 1999, 8(5): 629–639.
- H S Hou, H Andrews. Cubic splines for image interpolation and digital filtering [J]. *IEEE Trans Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1978, 26(6): 508–517.
- Xu Tongyang. Remote sensing image bi-cubic interpolation algorithm based on second generation contourlet transform domain [J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(2): 40–43. 徐彤阳. 基于二代 Contourlet 域遥感图像双三次插值方法 [J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(2): 40–43.
- S Battiato, G Gallo, F Stanco. A locally adaptive zooming algorithm for digital images [J]. *Image and Vision Computing*, 2002, 20(11): 805–812.
- Chen Xiaoshan, Jiang Wen, Yang Fan, *et al.*. An improved local adaptive algorithm for digital image interpolation [J]. *Computer Applications and Software*, 2010, 27(5): 246–249. 陈小珊, 江雯, 杨帆, 等. 一种改进的局部自适应数字图像插值法 [J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(5): 246–249.
- Tang Lulu, Zhang Qican, Hu Song. An improved algorithm for Canny edge detection with adaptive threshold [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(5): 127–132. 唐路路, 张启灿, 胡松. 一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法 [J]. *光电工程*, 2011, 38(5): 127–132.
- Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou, *et al.*. Improved Canny edge detection algorithm of image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(s1): 50–54. 李俊山, 马颖, 赵方舟, 等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法 [J]. *光子学报*, 2011, 40(s1): 50–54.