

引入影像重构的边缘检测算子性能评估方法

杨朝辉^{1,2} 陈 鹰²

(1 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州市科锐路 1 号, 215009)

(2 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 200092)

摘 要:首先,利用待评估边缘检测算子进行边缘检测;然后,根据检测边缘支撑区融合边缘位置信息与灰度信息,并利用改进的灰度反距离分区加权均值法实现影像重构;最后,设计反映原始影像与重构影像之间特征相似度的性能评估综合指标,完成边缘检测算子的性能评估。实验结果表明,该评估方法的结论与人工判读的结果相吻合,并且不需要先验参考信息,有一定的工程应用性。

关键词:影像重构;边缘检测算子;性能评估;相似性测度

中图分类号:P237.4

边缘检测结果易受到测试图像类型、检测算子种类、判断阈值以及图像目标特征等多种因素的影响,不同的边缘检测算子有着各自对应的应用环境,任何一种算子都不可能适用于所有的应用环境。因此,有必要建立一个客观定量的评估方法,来评估同一算子适应不同应用环境的能力以及不同算子在同一应用环境中的性能优劣^[1],使用户在实际应用中可以根据具体环境准确有效地选择最佳边缘检测算子。

针对大多数边缘检测实际应用中很难获取边缘基准图的现状,本文提出了一种引入影像重构的边缘检测算子性能评估方法,该方法不需要边缘参考图等先验知识,可直接对真实影像进行评估测试,满足影像匹配等实际工程的需求。评估结果可以帮助用户在不同的应用环境下选择待评估算子的最优阈值,实现该算子的最佳检测性能,也可在同一应用环境下对多个算子的性能进行比较,从中选取最佳算子。

1 评估方法

1.1 主要流程

由于边缘可以表征原始影像的重要信息,因此,提取出来的边缘越准确,包含的影像信息也就越多,根据边缘表征信息恢复的重构影像与原始

影像的相似程度也越大。根据这一原理,对原始影像使用边缘检测算子得到对应的边缘检测二值影像。为了充分利用边缘信息,以检测边缘点为中心,扩展一定半径生成边缘支撑区二值影像,并在其中填入对应像素位置的原始影像灰度,得到边缘支撑区灰度影像。使用改进的灰度反距离分区加权均值内插法,根据边缘支撑区灰度影像生成重构影像,最后设计出全新的性能评估综合指标 f ,实现原始影像与重构影像之间的特征相似测度,据此完成边缘检测算子的性能评估。

1.2 基于边缘支撑区的影像重构

根据 Carlsson^[2]的影像重构理论,重构影像 R 应满足下列方程最小化的条件:

$$\iint \left(\frac{\partial R}{\partial i} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial j} \right)^2 di dj \quad (1)$$

式中, $R(i, j) = T(i, j); E_D(i, j) = 1$ 。

根据上述原理,一些学者设计出了相关重构算法,常见的有反距离均值法和反距离中值法^[3]。

设坐标为 (i, j) 的 A 点为边缘支撑区灰度影像的背景点,则以该点为中心进行重构,在如图 1(a)所示的水平、垂直与对角线共 8 个方向进行搜索,在每个方向中都找到一个与 A 点相距最近的属于边缘支撑区灰度影像的边缘点,将该点的灰度记为 t_k ,该点与 A 点的距离记为 $d_k (k=1, 2, \dots, 8)$,则 A 点的灰度反距离加权均值法公式为:

收稿日期:2013-03-28。

项目来源:航天基金资助项目(0747-0540SITC2099-4);江苏省高校自然科学基金资助项目(10KJB42000)。

$$R(i, j) = \sum_{k=1}^8 \frac{t_k}{d_k} / \sum_{k=1}^8 \frac{1}{d_k} \quad (2)$$

A 点的灰度反距离加权中值法公式^[4]为:

$$R(i, j) = \text{median}(\{t_1 \diamond w_1, t_2 \diamond w_2, \dots, t_8 \diamond w_8\}) \quad (3)$$

式中, $t \diamond w = \{x, x, \dots, x\}$ (w 个 x), $w_k = \text{round}(\frac{\max(d)}{d_k})$ 。

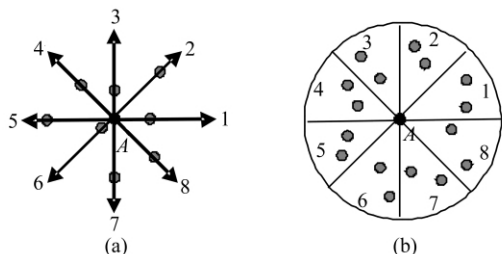


图1 影像重构内插方式

Fig. 1 Interpolation of Image Reconstruction

上述方法中,边缘点与当前重构点 A 距离越近,则相关性越大,灰度相似程度也应越大;反之,距离越远,则相关性越小。但是,上述方法也存在明显的缺点,即只考虑了 8 个标准方向上与当前重构点最邻近的 8 个边缘点。本文作出改进,以当前点为中心,将邻域分为如图 1(b)所示的 8 个扇区,在每个扇区中均找出与当前点距离最近的 n 个边缘点(在实际应用中考虑到计算效率,通常令 $n=2$)。将这些点的灰度记为 $t_{k,j}$,该点与 A 点的距离记为 $d_{k,j}$ ($k=1,2,\dots,8; j=1,2,\dots,n$),则 A 点的灰度反距离分区加权均值法公式为:

$$R(i, j) = \sum_{k=1}^8 \sum_{j=1}^n \frac{t_{k,j}}{d_{k,j}} / \sum_{k=1}^8 \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{k,j}} \quad (4)$$

改进方法使用 8 个扇区代替传统方法的 8 个标准方向,避免了只在 8 个标准方向上寻找最邻近边缘点而可能导致的距离过远造成失真的现象。该方法搜索到的邻近点分布更合理,重构信息更准确,重构点灰度层次更加丰富,同时减弱了邻近点搜索结果差异对边缘评估正确性造成的不必要影响。

图 2(a)为原始影像,利用 Canny 边缘检测算子对原始影像进行边缘检测(高阈值为 0.80,低阈值为 0.5,平滑阈值为 1.5),得到图 2(b)所示的边缘二值影像,建立半径为 1 个像素的边缘支撑区并填入原始影像对应位置的灰度信息,得到图 2(c)所示的边缘支撑区灰度影像。在此基础上,分别使用反距离加权均值法、反距离加权中值法与本文的改进方法内插得到重构影像,如图

2(d)、图 2(e)与图 2(f)所示。

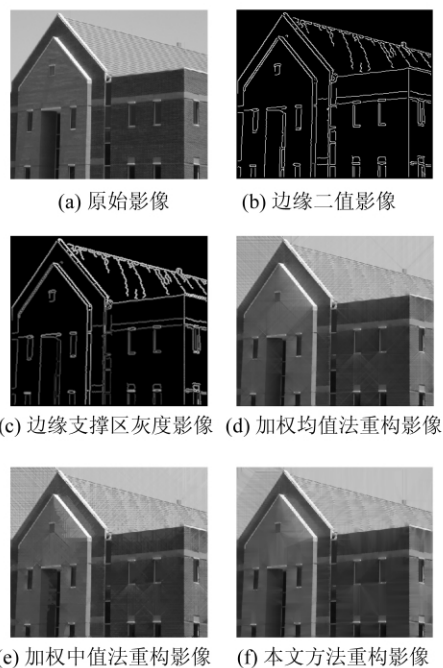


图2 影像重构实验

Fig. 2 Experiment of Image Reconstruction

从图 2 可直观看出,本文的改进内插法克服了数据点方向固定的缺陷,重构影像的局部细节相对清晰,块效应较弱,其质量优于另外两种方法。

1.3 性能评估指标

1.3.1 相似性测度参数

为了比较重构影像与原始影像的相似性,从而间接反映出边缘检测算子的性能,必须选择合适的相似性测度参数。作为使用最广泛的均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)这两个测度参数,虽然计算简单并具有明确的物理意义,但很难有效地反映人对图像的视觉感知。本文采用基于平均结构相似度法(MSSIM)的测度参数^[5],该测度与主观评价结果有着较好的相关性,能准确地反映人对图像质量的主观感受。令当前点(x, y)的结构相似度为:

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mu_x &= \sum_{i=1}^N w_i x_i \\ \sigma_x &= (\sum_{i=1}^N w_i (x_i - \mu_x)^2)^{1/2} \\ \sigma_{xy} &= \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \end{aligned}$$

式中, μ_x 和 μ_y 分别为原始图像与重构图像的滤波窗口加权灰度均值; σ_x 和 σ_y 分别为原始图像与重构图像的滤波窗口加权灰度方差; σ_{xy} 为原始图像

与重构图像的相关系数; c_1 与 c_2 均为很小的正数,以避免分母为零或接近零时造成的奇异性; N 为滤波窗口内的总点数; $w=\{w_i|i=1,2,\dots,N\}$ 为归一化高斯权函数。

将整个图像的结构相似度作为相似性测度参数,公式为:

$$f_s = \text{MSSIM} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{SSIM}(x_i, y_i) \quad (6)$$

由式(6)可以看出,范围为 $0\sim 1$ 的相似性测度参数 f_s 为单调函数,检测出的边缘点越多,重构影像内插时所用到的边缘信息也越多,相似性测度参数也必然越大。显然,单一使用该参数不能有效评估边缘检测算子的性能。

1.3.2 边缘密度测度参数

为了抑制相似性测度参数的单调性,本文设计了边缘密度测度参数 f_D :

$$f_D = \frac{mn - N_0}{mn} \quad (7)$$

式中, m 与 n 分别为原始影像的宽度与高度; N_0 为边缘二值影像中检测边缘点的总个数。

显然,检测出的边缘点越多,边缘密度测度参数越小,这从一定程度上平衡了相似性测度参数的单一性。但是,边缘密度测度参数为单调线性函数,也就是说随着检测边缘点的增加,函数性能直线下降,这明显不符合基本常识。在实际的边缘检测过程中,边缘点特别多或特别少都应属于性能较差的情况,而边缘点密度处于中间阶段时,性能应该保持相对平缓的变化。

1.3.3 边缘形态测度参数

当检测边缘质量较好时,该边缘的连通性与宽度在理论上应该适中。因此,可使用线段连通性与宽度一致性来表示边缘形态测度参数,并作为边缘密度测度参数的修正。其中,线段连通性用来描述边缘点之间的连续程度,宽度一致性用来表示边缘线段的宽度统一性^[6]。

假设在边缘检测二值影像 $E(x, y)$ 中, $E_p(x, y)$ 表示位置 $[x, y]$ 处的边缘像素点, $w_d(E[x, y])$ 表示以 $E_p(x, y)$ 为中心、大小为 $d \times d$ 的边缘评估窗口。 $P_d(n)$ 表示在 $w_d(E[x, y])$ 中存在 n 个边缘像素的窗口集合, $P_d^i(n)$ 则为 $P_d(n)$ 集合中的某一种特定窗口。

令 $|P_d(n)|$ 为 $P_d(n)$ 集合的总个数,相当于除了当前评估窗口的中心点外,在其余 $n^2 - 1$ 的邻域位置上存在 $n - 1$ 个边缘像素的所有可能取法,用公式表示为:

$$|P_d(n)| = C(d^2 - 1, n - 1) \quad (8)$$

评估窗口集合 $P_d(n)$ 的强度可表示为 $S(P_d(n))$,公式为:

$$S(P_d(n)) = \frac{1}{|P_d(n)|} \sum_{i=1}^{|P_d(n)|} S(P_d^i(n)) \quad (9)$$

以最常用的 3×3 窗口为例, $P_3(n)$ 与归一化 $S(P_3(n))$ 的值见表1(具体推导过程参见参考文献[7])。

表1 集合总数与强度值分布

Tab. 1 Intensity Values of Different Patterns

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| $ P_3(n) $ | 1 | 8 | 28 | 56 | 70 | 56 | 28 | 8 | 1 |
| $S(P_3(n))$ | 0.0 | 0.56 | 0.97 | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 0.08 | 0.0 | 0.0 |

根据常识,当 3×3 评估窗口中存在 $3 \sim 5$ 个边缘检测点时,边缘连续性与宽度一致性均较好,可认为其就是真正的边缘点;当只存在 $1 \sim 2$ 个边缘检测点时,一般可认为是噪声点;当边缘检测点超过6个时,可认为是模糊退化的边缘点。

设二值边缘图像 $E(x, y)$ 中 $P_d(n)$ 集合总共出现的次数为 $\#P_d(n)$,边缘像素的总个数为 N 。定义 $\sigma_s(E(x, y))$ 为边缘形态测度参数:

$$f_P = \sigma_s(E(x, y)) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{d^2} \#P_d(n) \cdot |S(P_d(n)) - \mu_s(E(x, y))| \quad (10)$$

式中, $\mu_s(E(x, y)) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{d^2} \#P_d(n) \cdot S(P_d(n))$,表示边缘图像的形态强度均值,范围为 $0 \sim 1$ 。

f_P 代表边缘图像的形态强度标准差,范围为 $0 \sim 1$,值越小表示该边缘形态偏差越小,也就意味着该边缘形态越合理,边缘检测的质量相对越好。

1.3.4 性能评估综合指标

结合上述三个测度参数的各自特点及权衡关系,本文设计了全新的能客观反映边缘检测算子性能的评估综合指标 f :

$$f = f_s \times f_D \times f_P \quad (11)$$

相似性测度参数、边缘密度测度参数、边缘形态测度参数这三个参数值均处于 $0 \sim 1$ 之间,因此,性能评估综合指标的值也处于 $0 \sim 1$ 之间。随着边缘检测算子阈值的改变,检测出的边缘点越多,相似性测度参数单调递增,边缘密度测度参数则单调线性递减,而边缘形态测度参数则以近似正态函数的形式对边缘密度测度参数进行修正,保证在边缘密度适中的情况下能取得较佳的性能。

评估指标。

当边缘检测效果较差时,比如说检测出的边缘点过多或过少时,单调增减的相似性测度参数与边缘密度测度参数会出现相反的极端情况而抵消,此时,近似正态函数的边缘形态测度参数会起主要影响,使评估综合指标值较小,保证了评估的有效性。

2 实验结果与分析

实验共选取 20 幅影像,并分为两类:一类是对某个边缘检测算子在不同阈值下得到的边缘结果进行性能评估,从而实现该算子的性能优化;另一类是利用多个边缘检测算子对同一影像进行边缘检测,从而完成不同算子间的性能差异评估,实现同一环境下最优算子的选择。

2.1 单一算子性能优化评估

以图 3(a)的原始影像与 Sobel 边缘检测算子为例进行实验,阈值分别设置为 100、180、260、340、420、500、580、660,对图 3(a)的原始影像进行边缘检测,得到图 4(a)所示的 8 个边缘二值图,使用本文的改进内插方法得到如图 4(b)所示的重构影像。在此基础上,分别使用文献[3]中的评估指标与本文的评估指标进行计算,得到如图 5 所示的结果。

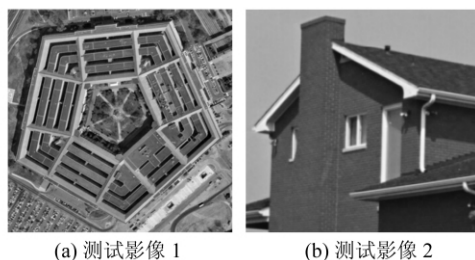


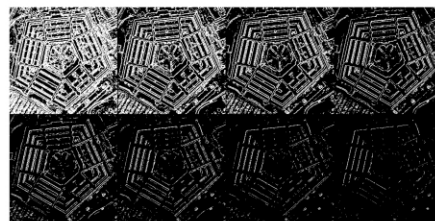
图 3 实验原始影像

Fig. 3 Original Images in Experiment

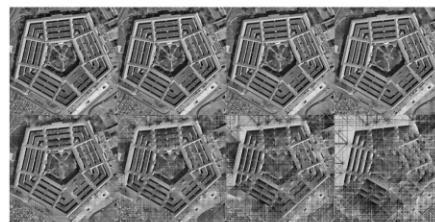
从图 6 可以看出,文献[3]的评估指标显示第 4 号边缘二值影像性能最佳,第 5 号边缘二值影像性能次之,而本文的评估指标结果则显示第 3 号边缘二值影像性能最佳。通过目视判断,发现第 3 号边缘二值影像中边缘连接性最好,而且噪声点较少,与第 4 号相比质量明显要好。因此,当 Sobel 边缘检测算子的阈值取 260 时,能取得较好的边缘检测性能。

2.2 不同算子性能差异评估

选用常见的 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Laplacian 算子、LOG 算子与 Canny 算子[8]共 6 种边缘检测算子进行不同算子间性能差



(a) 不同阈值下的边缘检测二值影像



(b) 不同阈值下的重构影像

图 4 Sobel 边缘检测算子实验

Fig. 4 Experiment Using Sobel Edge Detector

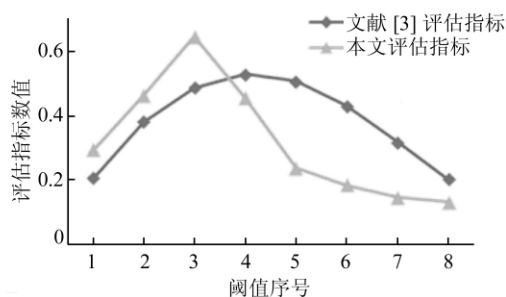


图 5 不同评估指标对比

Fig. 5 Comparison of Different Evaluation Index

异评估。首先仍使用实验 1 所用的方法优化每个算子的性能,取得最佳阈值,然后每个算子采用最佳阈值对图 3(b)的实验影像进行边缘检测,实现影像重构,并最终计算出各自的性能评估指标,结果如图 6 所示。

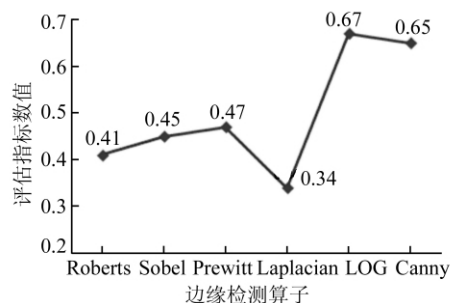


图 6 不同边缘检测算子性能差异评估

Fig. 6 Performance Evaluation of Different Edge Detectors

由图 6 分析,6 种待评估的边缘检测算子中,LOG 算子由于其抗噪能力强,总体性能最佳,Canny 算子居其次,Prewitt 算子、Sobel 算子与 Roberts 算子再次之,而 Laplacian 算子由于对噪

声太敏感,其性能最差。

3 结 语

本文方法对检测边缘的评估结果与人工判读的结果基本一致,能够准确地反映人对检测边缘质量的主观感受。同时,该评估方法客观合理、自动化程度高,在影像匹配、边缘提取等领域有广泛的应用价值。当然,用于实验的边缘检测算子种类与影像数据的变化可能会导致实验结果的差异,这需要在具体应用环境中进一步地实验与分析,使本文的评估方法能更好地应用于实际工程。

参 考 文 献

- [1] Fernandez-Garcia N L, Carmona-Poyato A, Medina-Carnicer R, et al. Automatic Generation of Consensus Ground Truth for the Comparison of Edge Detection Techniques [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(4): 496-511
- [2] Carlsson S. Sketch Based Coding of Gray Level Images [J]. IEEE Transactions Image Processing, 1988, 15(1): 57-83
- [3] Nercessian S, Panetta K, Agaian S. A Non-reference Measure for Objective Edge Map Evaluation [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, USA, 2009
- [4] Yin L, Yang R, Gabbouj M, et al. Weighted Median Filters: a Tutorial [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-11: Analog and Digital Signal Processing, 1996, 43(3): 157-192
- [5] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H, et al. Image Quality Assessment: from Error Measurement to Structural Similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 (4): 600-612
- [6] 杨朝辉. SAR 影像边缘检测质量评估方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 10-13
- [7] Zhu Q. Efficient Evaluations of Edge Connectivity and Width Uniformity [J]. Image and Vision Computing, 1996, 14(1): 21-34
- [8] 张帆,黄先锋,李德仁,等. 基于直线感知增强的边缘提取算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 36-39

第一作者简介:杨朝辉,副教授,博士,主要研究方向为边缘检测与图像匹配。

E-mail: yzhac@163.com

Performance Evaluation of Edge Detectors Using Image Reconstruction

YANG Zhaohui^{1,2} CHEN Ying²

(1 School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
1 Kerui Road, Suzhou 215009, China)

(2 Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

Abstract: An objective method for performance evaluation of edge detectors was proposed based on image reconstruction. Firstly, binary edge maps were extracted by testing edge detectors. Then, combining the location information and brightness information in edge support region, image was reconstructed using enhance inverse of the distance for the weighted average of image pixel values in divisional regions. Finally, performance of edge detectors was evaluated using integrated index which represents feature similarity between reconstructed image and original image. The experimental results show that the proposed method is consonant with subjective judgment and has practical implementation.

Key words: image reconstruction; edge detector; performance evaluation; similarity measurement

About the first author: YANG Zhaohui, associate professor, Ph.D., majors in image edge detection and image matching.
E-mail: yzhac@163.com