

文章编号: 1007-4619(2007)03-0303-08

一种基于相位一致的高分辨率遥感图像 特征检测方法

肖鹏峰¹, 冯学智¹, 赵书河¹, 邓 敏², 余江峰¹

(1. 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中南大学 测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 精确检测图像边缘特征是进行高分辨率遥感图像分割和识别的关键。空域特征检测算子以解决阶跃形边缘为主,得到的边缘特征对图像的亮度和对比度敏感。本文引入了一种基于频域相位一致的图像特征检测方法,该方法对遥感图像亮度和对比度具有不变性,同时适用于多种边缘特征的检测。使用 Log Gabor 小波计算 IKONOS Pan 图像的相位一致多尺度梯度,对农田、道路和厂房等典型地物进行特征检测的结果表明,相位一致算法对图像局部亮度和对比度不敏感;并且对线形物体产生单线响应,不似空域检测算子产生双线响应。最后考察滤波器尺度和方向参数变化及添加高斯噪声对检测结果的影响,发现相位一致算法无需先使用低通滤波去除噪声,因而具有更稳定的特征定位精度;并且抗噪声干扰的能力强,检测结果不会因为噪声而出现波动。基于相位一致的遥感图像不变特征提取,为高分辨率遥感图像的分割和对象识别提供了基础。

关键词: 边缘特征; 特征检测; 相位一致; Log Gabor 小波; 高分辨率遥感图像

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

Feature Detection from High-resolution Remotely Sensed Imagery Based on Phase Congruency

XIAO Peng-feng¹, FENG Xue-zhi¹, ZHAO Shu-he¹, DENG Min², SHE Jiang-feng¹

(1. Department of Geographical Information Sciences, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China;

2. Department of Surveying and Geo-informatics, Central South University, Hunan Changsha 410083, China)

Abstract: Phase Congruency was introduced as a new method to detect features from high-resolution remotely sensed imagery. Three objects i. e. paddy, road, and factory, were selected from the IKONOS Pan imagery of Nanjing. The Phase Congruency feature images were obtained by applying Phase Congruency model to the images with two-octave Log Gabor wavelets filters over 5 scales and 6 orientations. For qualitative comparison, the outputs of the Sobel and Canny detector were also presented. The results show that Phase Congruency response value was invariant in image local illumination and contrast. The other obvious difference was that the Sobel and Canny detector produced responses on each side of linear features, whereas the Phase Congruency produced a response centered on the line. The effects of varying filter orientation or scale and the effect of adding noise in the feature detection between Phase Congruency and Canny method then were compared. It was found that Phase Congruency could obtain more accurate localization because it does not need low-pass filter to restrain noise first. It was also shown that noise had been successfully ignored in the smooth regions of the image, unlike the Canny detector results fluctuated all over the image. With this invariant image feature

收稿日期: 2006-04-03; 修订日期: 2006-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 40501047), 国家自然科学基金(编号: 40501053), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(编号: 20050284009)

作者简介: 肖鹏峰(1979—), 男, 南京大学地图学与地理信息系统专业博士研究生。主要研究方向为遥感数字图像处理。已发表论文 5 篇。E-mail: xiaopengfeng@nju.org.cn。

detector, better image segmentation and object-oriented image recognition are possible.

Key words: edge feature; feature detection; Phase Congruency; Log Gabor wavelets; high-resolution remotely sensed imagery

1 引 言

高分辨率遥感图像的边缘集中了图像的大部分信息,它的确与提取对于整个图像的识别与理解是非常重要的,同时也是图像分割所依赖的重要特征。大多数检测图像特征的工作都集中在空域用基于梯度的算子来标识阶跃的不连续性。早期研究基于梯度的边缘检测有 Roberts^[1], Prewitt^[2], Sobel^[3]等算法,这类算法的优点是运算简单快捷,缺点是受噪声影响大和特征定位容易出现偏移。为克服噪声对边缘检测的影响,出现了大量线性滤波边缘检测算法,其中比较知名的有 LoG 算子^[4]和 Canny 算子^[5]等。这两种方法的共同特点是先采用高斯函数进行平滑滤波;不同的是 LoG 算子采用二阶微分的 Laplace 算子,通过计算过零点确定边缘,而 Canny 算子采用一阶微分 Laplace 算子,通过寻找局部极值确定边缘。空域检测算子存在两方面的问题:一是它们只使用单一的边缘模型,即它们假定边缘是阶跃型不连续的;二是它们主要用亮度梯度值来表征边缘的强度,这样检测到的边缘就对图像亮度和对比度的变化非常敏感。

从频率域的角度考察,图像的相位谱比幅度谱包含有更重要的信息,并且具有亮度和平移不变性^[6,7]。在对马赫带现象进行观察时^[8], Morrone 发现信号的特征总是出现在其 Fourier 相位叠合最大的点处,并就此提出了相位一致 (Phase Congruency) 的概念和计算方法^[9]。Kovesi^[10-13]随后扩展了相位一致作为对图像特征的不变量,证明它能够可靠地检测到阶跃形、屋脊形和线形特征,并且可以对大多数图像使用较为固定的阈值。实验和理论已论

证了相位一致与人类视觉系统对图像特征的认知基本相符^[14]。近年来,国际上已有学者将相位一致方法应用在图像压缩与重构^[15]、三维图像探测^[16]、图像对称性检测^[17,18]、医学图像分割^[19-23]、特殊文字识别^[24,25]、运动图像估计^[26]和人脸识别^[27,28]等方面,然而在遥感图像处理方面的研究较为少见。

本文以 IKONOS Pan 高分辨遥感图像数据为基础,引入相位一致的计算方法,对水田、道路和厂房等典型地物进行特征检测,并与 Sobel 和 Canny 算子的检测结果进行了比较。实验结果表明,基于频域相位一致所提取的图像特征,较空域检测算子的响应更为显著,且定位准确,提取的不变特征有利于遥感图像分割与识别。

2 相位一致的基本原理

相位一致的基本原理是:人类视觉感知的图像特征出现在图像 Fourier 谐波分量叠合最大的相位处,而特征的类型由相位的值决定^[9]。考察图 1 中构成方波的正弦波分量(实线表示信号;虚线表示其 Fourier 谐波分量,这里只列出前 4 次谐波;实点指示特征点),其特征出现在谐波分量叠合最大的 0 和 π 相位,其他点处的相位一致都因为谐波的上下波动而较小。0 对应向下的阶跃边缘, π 对应向上的阶跃边缘。类似地,三角形波的特征出现在相位为 $\pi/2, 3\pi/2$ 和 $5\pi/2$ 的点处。因此,用相位一致标记特征不用对信号波形作任何假设,只需简单地寻找谐波分量叠合最大的相位。

将图 1 所示的情况进行推广,对于一维信号 $I(x)$,其 Fourier 分解可表示为

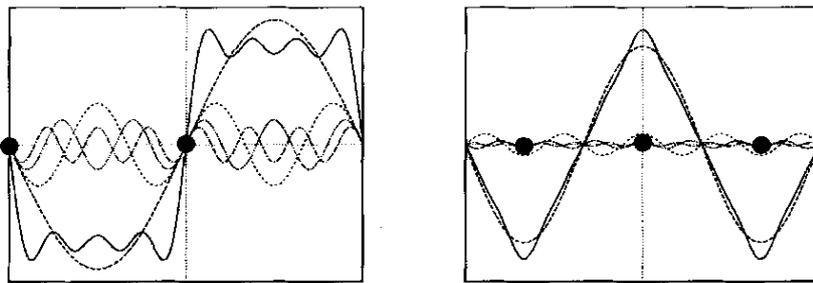


图 1 方波和三角形波的 Fourier 分解^[10]

Fig. 1 Construction of square and triangular waveforms from their Fourier series

$$I(x) = \sum_n A_n \cos(n\omega x + \phi_{n_0}) = \sum_n A_n \cos(\phi_n(x)) \quad (1)$$

式中, A_n 为 n 次谐波分量的幅度, ω 为常数, ϕ_{n_0} 为 n 次分量的相位偏移量, 函数 $\phi_n(x)$ 表示该分量在 x 处的局部相位。

定义信号 $I(x)$ 的局部能量函数为

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)} \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 为信号 $I(x)$ 去除直流分量后的函数, $H(x)$ 为 $F(x)$ 的 Hilbert 变换。 $H(x)$ 和 $F(x)$ 一般由信号分别与两个相位差为 90° 的滤波器进行卷积得到。

相位一致函数定义为局部能量函数与幅度和的比值

$$PC_1(x) = \frac{|E(x)|}{\sum_n A_n(x)} \quad (3)$$

因此, 求解最大相位一致就转化为求局部能量函数峰值的问题。相位一致、局部能量与幅度和的关系如图 2 所示, 局部 Fourier 分量以首尾相接的复矢量形式表达, 全部分量投影到实轴上即 $F(x)$, 投影到虚轴上为 $H(x)$, 从原点到终点的矢量即为局部能量函数 $E(x)$ 。若所有 Fourier 分量都有一致的相位, 则该比值为 1; 反之, 该比值最小可以为 0。可见, 相位一致是一个无量纲的量, 这个特性使得可以对大多数图像设定一个通用的特征阈值。

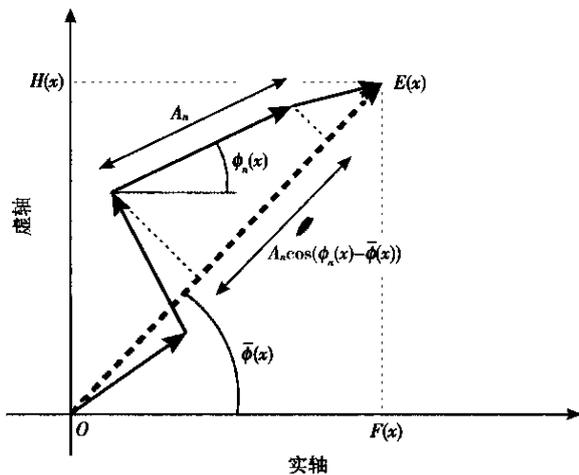


图 2 信号的局部能量与相位一致的关系^[11]

Fig. 2 Polar diagram showing the Fourier components at a location in the signal plotted head to tail

由图 2 的几何关系易知

$$E(x) = \sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)) \quad (4)$$

式中, $\bar{\phi}(x)$ 为所在点的所有 Fourier 分量的加权平均相位。因此, 相位一致可由各局部相位分量与平均相位的偏离的余弦函数进行计算

$$PC_1(x) = \frac{\sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n(x)} \quad (5)$$

3 改进的相位一致算法

式(5)所计算的相位一致, 其局部能量是相位偏离的余弦函数, 可能会带来由于余弦函数的峰值不够尖锐而造成定位不精确。为此, Kovesi^[10,11] 改进了相位一致的计算方法, 修正了相位偏离余弦函数的计算式, 同时考虑了频率扩展和噪声补偿:

$$PC_2(x) = \frac{\sum_n W(x) [A_n(x) (\Delta\Phi_n(x) - T)]}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (6)$$

式中, $W(x)$ 为频率扩展的权重函数, 通过扩展信号频率范围提高相位一致的显著性; T 为噪声估计, 只有当局部能量值大于 T 时才用来计算相位一致; 取值符号「 $[\]$ 」表示值为正时等于本身, 否则取 0; ε 是避免分母为零而引入的一个小的常量; 新的相位偏离函数 $\Delta\Phi_n(x)$ 比余弦函数有更显著的尖峰:

$$\Delta\Phi_n(x) = \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)) - |\sin(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))| \quad (7)$$

局部能量的计算最初是通过 Fourier 变换, 但对于二维信号, 在具体的计算中常采用 Gabor 滤波器, 该滤波器实质上就是一个加 Gaussian 窗的 Fourier 变换。为了利用多尺度分析的优点, 本文选用二维 Log Gabor 小波^[29], 它是一个实部和虚部正交的复小波, 可以在偶对称滤波器保持零直流分量的情况下构造任意带宽的滤波器。在线性频率尺度上, Log Gabor 小波的传递函数为

$$\zeta(\omega) = e^{\frac{-(\log(\omega/\omega_0))^2}{2(\log(k/\omega_0))^2}} \quad (8)$$

式中, ω_0 为滤波器的中心频率, k/ω_0 是为保持滤波器形状而设的常量。若 M_n^e 和 M_n^o 分别表示尺度 n 上 Log Gabor 的偶对称和奇对称小波, 则信号的响应可表示为

$$[e_n(x), o_n(x)] = [I(x) * M_n^e, I(x) * M_n^o] \quad (9)$$

在该尺度上的幅度和相位分别为

$$A_n(x) = \sqrt{e_n(x)^2 + o_n(x)^2} \quad (10)$$

$$\phi_n(x) = \arctan 2(e_n(x), o_n(x)) \quad (11)$$

因此, 二维信号的相位一致由下式给出:

$$PC_2(x) = \frac{\sum_{\sigma} \sum_n W_{\sigma}(x) [A_{no}(x) (\Delta\Phi_{no}(x) - T_{\sigma})]}{\sum_{\sigma} \sum_n A_{no}(x) + \varepsilon} \quad (12)$$

式中,下标 σ 表示滤波器的方向, n 表示滤波器的尺度。

4 图像特征检测与分析

4.1 边缘特征计算

按照上述的相位一致方法计算图像边缘特征的步骤和参数如下:

(1) 构造 2 倍频的 Log Gabor 小波滤波器对原图像进行滤波,得到一组复矢量数据。一共使用了 5 个尺度和 6 个方向 ($0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6$) 共 30 个滤波器,最小尺度滤波器的波长为 3 个像素,相邻尺度间的比例比为 2.5。

(2) 根据复矢量数据,按式(10)、(11)计算每一

点上各个尺度和方向的幅度与相角,考虑到遥感图像的噪声较自然图像更为显著,噪声估计 T 取 4.0。

(3) 根据式(12)计算每一点上各个尺度和方向的局部能量之和,最后除以幅度和,得到图像的相位一致值, ε 取 0.01。

此外,为了将相位一致方法与空域检测算子进行比较,还对每一个实验图像分别计算了 Sobel 梯度和 Canny 梯度,Sobel 算子是基于灰度梯度的边缘检测算子的典型代表,Canny 算子则是线性滤波器边缘检测的最优算子。

对合成图像的特征检测结果如图 3 所示,原始图像大小为 256×256 像素。对遥感图像的特征检测结果如图 4—图 6 所示。实验所用的遥感图像为南京幅 IKONOS Pan 图像,成像时间 2000 年 9 月 15 日,地面分辨率 1m,裁取的农田、道路和厂房原始图像大小均为 256×256 像素。所有的相位一致检测结果均使用相同的计算参数。限于篇幅,所有图像都经过了缩小处理。

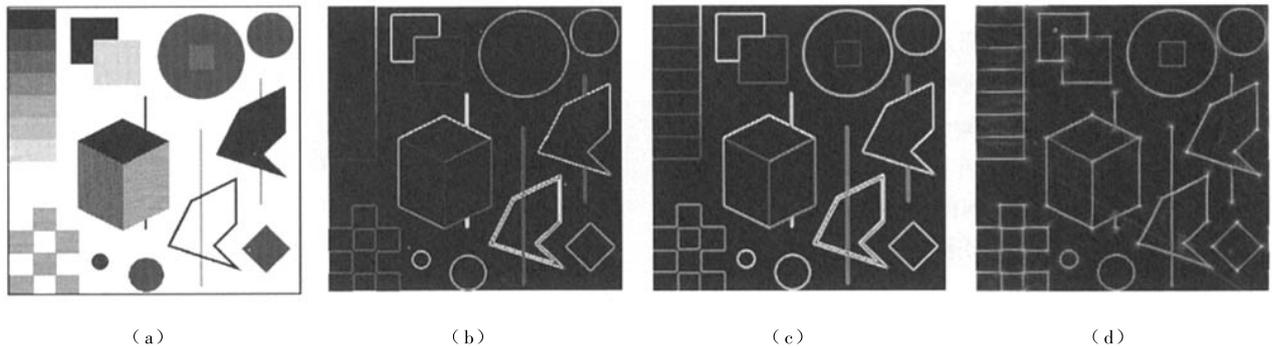


图 3 合成图像边缘特征检测结果

(a) 原始图像; (b) Sobel 梯度; (c) Canny 梯度, $\sigma = 0.5$; (d) 相位一致梯度

Fig. 3 Feature detection results of synthetic image

(a) Original image; (b) Sobel gradient; (c) Canny gradient, $\sigma = 0.5$; (d) Phase Congruency gradient

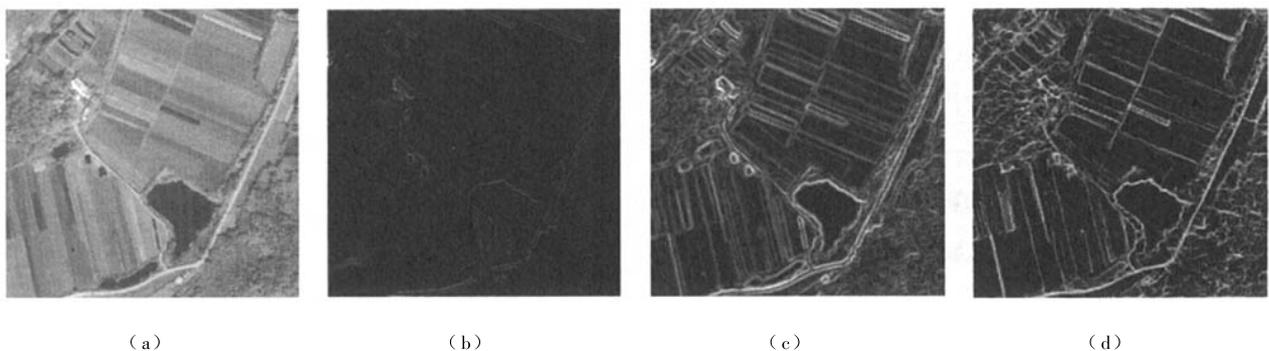


图 4 IKONOS Pan 农田图像边缘特征检测结果

(a) 原始图像; (b) Sobel 梯度; (c) Canny 梯度, $\sigma = 0.8$; (d) 相位一致梯度

Fig. 4 Feature detection results of paddy image from IKONOS Pan image

(a) Original image; (b) Sobel gradient; (c) Canny gradient, $\sigma = 0.8$; (d) Phase Congruency gradient

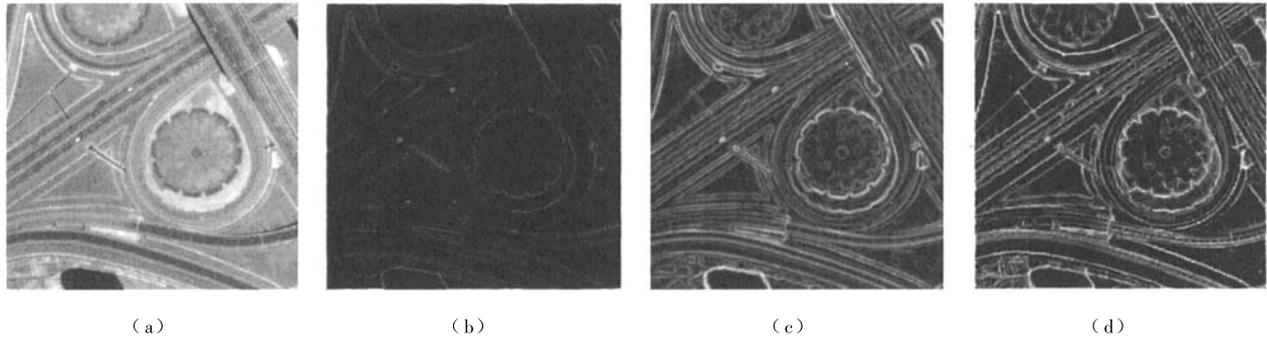


图5 IKONOS Pan 道路图像边缘特征检测结果

(a) 原始图像; (b) Sobel 梯度; (c) Canny 梯度, $\sigma=0.8$; (d) 相位一致梯度

Fig. 5 Feature detection results of road image from IKONOS Pan image

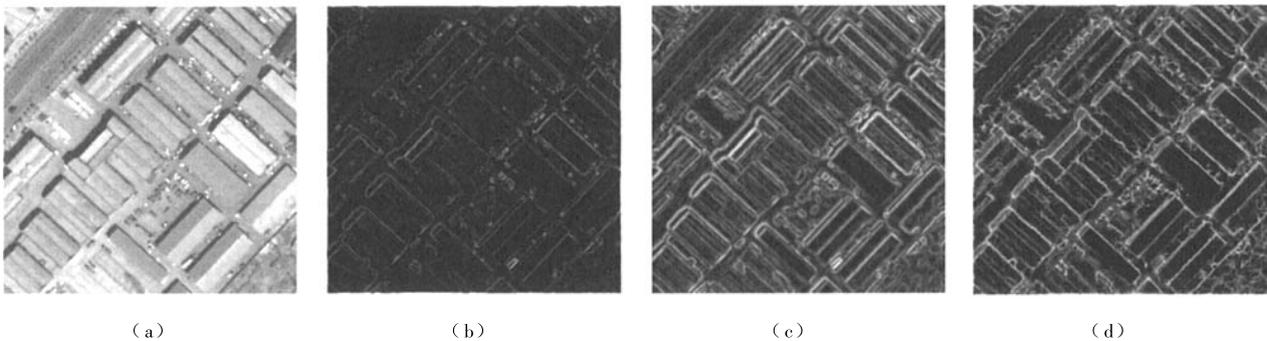
(a) Original image; (b) Sobel gradient; (c) Canny gradient, $\sigma=0.8$; (d) Phase Congruency gradient

图6 IKONOS Pan 厂房图像边缘特征检测结果

(a) 原始图像; (b) Sobel 梯度; (c) Canny 梯度, $\sigma=0.8$; (d) 相位一致梯度

Fig. 6 Feature detection results of factory image from IKONOS Pan image

(a) Original image; (b) Sobel gradient; (c) Canny gradient, $\sigma=0.8$; (d) Phase Congruency gradient

4.2 检测结果分析

比较图3中合成图像的边缘特征检测结果, Sobel算子的检测结果受图像局部对比度的影响最为明显,对比度大的边缘产生强的梯度响应,对比度小的边缘则产生弱的梯度响应。位于图像左上部分的灰度渐变的系列矩形、图像上部叠加的正方形、圆圈中间的正方形都只有非常微弱的梯度响应。Canny算子能将这些弱边缘检测出来,但是对弱边缘的响应依然较弱。相位一致算法则不论边缘对比度的大小,均能产生相同程度的均匀响应,较好地检测出了实验图像的所有边缘和细节。可见相位一致算法的性能不受图像局部亮度和对比度的影响,即相位一致对图像局部亮度和对比度是不变的。此外,考察图像下部的垂直线和多边形的边界线可以发现, Sobel算子和Canny算子对线形物体产生双响应,在线的两边都标记梯度;

而相位一致只产生单响应,标记的是线形物体的中心线。相位一致的这一特性有利于准确地定位线形物体。

考察图4从IKONOS Pan图像上裁取的农田图像的边缘特征检测结果,因为遥感图像的局部对比度比合成图像小,因此Sobel算子的检测结果比较微弱,只能辨认田边小道和池塘的轮廓。Canny算子检测结果的双边缘现象十分明显,田边小道和小的田块边缘都以双线的形式被检出。相位一致的检测结果则都是单线,图像上部接近 60° 方向的田埂线也被清晰地检测出来。

考察图5道路图像的边缘特征检测结果, Sobel算子的检测结果依然比较微弱。因为图像上曲线结构比较普遍,所以Canny算子检测结果的双边缘现象更为明显。而相位一致检测结果对曲线都只产生单线响应,整体的检测结果要简洁得多,右上部分高速公路中间的车道线都得到了很好的检出。

图 6 所示的厂房图像, 图像结构比较复杂, Sobel 算子只能检测出厂房的大致轮廓, Canny 算子对厂房的阴影边缘产生较强的边缘响应, 且对汽车对象产生过多的边缘响应, 但对厂房对象的检出却不如相位一致算法清晰。相位一致算法对主体对象的轮廓具有较强的识别能力, 如原图像右下部分的三个大厂房, 相位一致算法检测的结果每个厂房依然是一个独立的对象, 而 Canny 算子将其沿屋脊线分解, 形成了两个对象。

以上比较结果表明, 相位一致算法与空域检测算法相比的主要优点, 一是对图像局部亮度和对比度不敏感; 二是对线形物体产生单线响应, 而不是像大多数空域检测算子那样产生双线响应。

4.3 参数变化的影响

以下分别考察相位一致算法的参数变化对检测结果的影响, 可变的主要参数包括滤波器方向数、滤波器尺度数, 以及噪声影响。

4.3.1 滤波器方向数的变化对检测结果影响不大

图 7 所示为 Log Gabor 小波滤波器的方向数分别为 6、9、12 时计算的农田图像的相位一致的值, 其他参数保持不变。考察检测的结果发现, 随着滤波器方向数目的变化, 相位一致的输出值绝大部分并无变化。道路、池塘、农田的边缘依然保持清晰。但是随着滤波器方向数的增加, 角点处(如图中池塘的拐角)逐渐出现类似“发光”现象, 其原因需要进一步研究。

4.3.2 滤波器尺度数的变化影响检测的高低频成分

图 8 所示为 Log Gabor 小波滤波器的尺度数分别为 3、4、5 时计算的厂房图像的相位一致的值。观察检测的结果可以看出, 当滤波器尺度数为 3 时, 可以得到细节清晰的检测效果; 随着滤波器尺度数的增加, 厂房对象的主体轮廓仍能被准确地检出, 但是检测结果的高频成分越来越少, 低频成分越来越多; 当滤波器尺度数为 5 时, 厂房前停泊的汽车已几乎被忽略了, 但是厂房的轮廓位置保持不变。

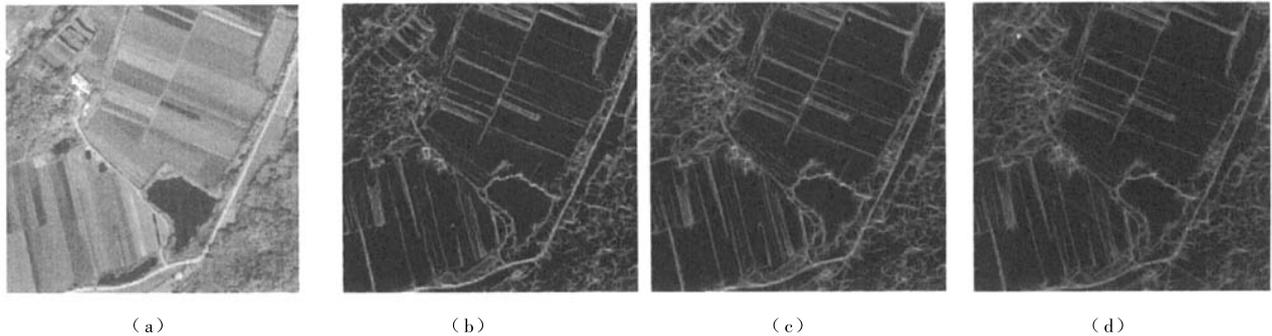


图 7 滤波器方向数的变化对相位一致检测结果的影响
(a) 原始图像; (b) 6 个方向的滤波器; (c) 9 个方向的滤波器; (d) 12 个方向的滤波器

Fig. 7 Effect of varying filter orientations in calculation of Phase Congruency
(a) Original image; (b) 6 orientations filtering; (c) 9 orientations filtering; (d) 12 orientations filtering

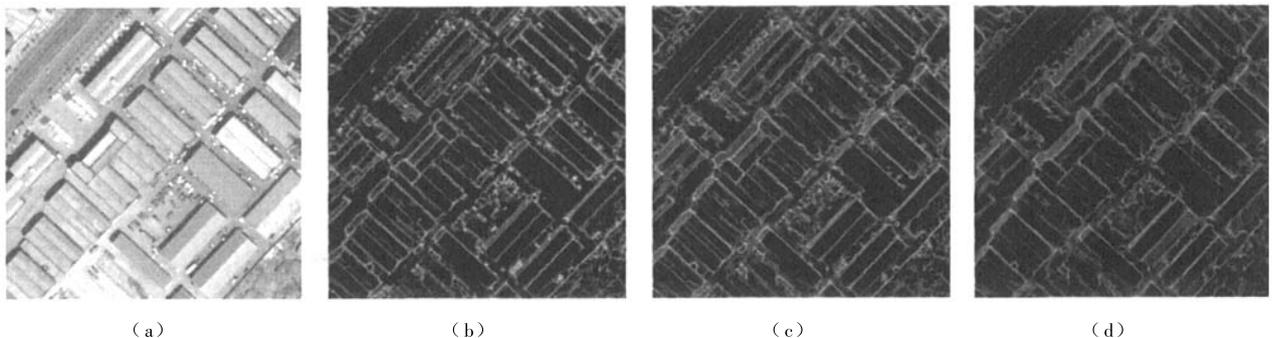


图 8 滤波器尺度数的变化对相位一致检测结果的影响
(a) 原始图像; (b) 3 个尺度滤波器; (c) 4 个尺度滤波器; (d) 5 个尺度滤波器

Fig. 8 Effect of varying filter scales in calculation of Phase Congruency
(a) Original image; (b) 3 scales filtering; (c) 4 scales filtering; (d) 5 scales filtering

Canny 算子也需要先使用低通滤波去除噪声,该高斯滤波器的阶数可以认为即相当于滤波器的尺度。但是高斯滤波器的阶数变化却将对检测结果产生决定性的影响。图9所示为高斯函数的阶数 σ 分别为 0.8, 1.2, 1.6 时得到的 Canny 边缘特征检测结果。随

着滤波器阶数的增加,检测结果出现明显的膨胀,从而影响了特征的定位精度。可见,相位一致算法因为不需要先使用低通滤波去除噪声,而是直接使用 Log Gabor 小波滤波器计算特征值,从而使得该算法与空域检测算法相比具有更稳定的特征定位精度。

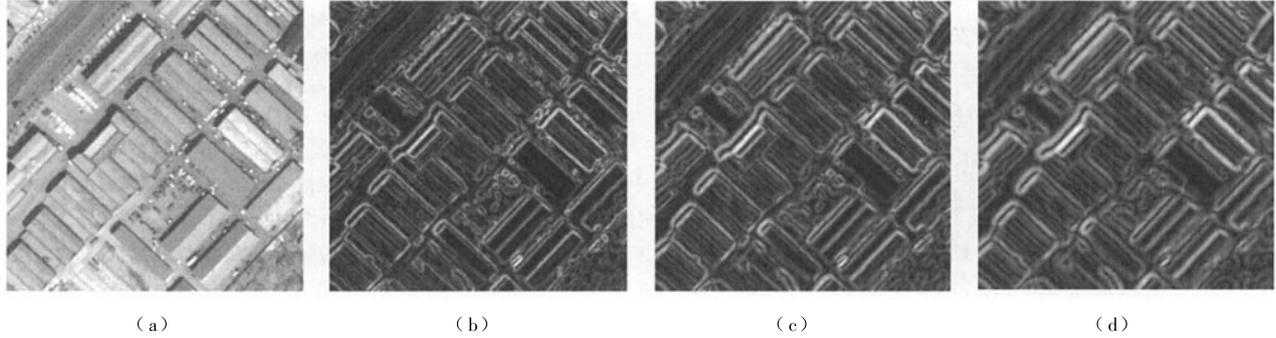


图9 滤波器阶数变化对 Canny 算子检测结果的影响

(a) 原始图像; (b) $\sigma=0.8$; (c) $\sigma=1.2$; (d) $\sigma=1.6$

Fig. 9 Effect of varying filter standard deviation in calculation of Canny

(a) Original image; (b) $\sigma=0.8$; (c) $\sigma=1.2$; (d) $\sigma=1.6$

4.3.3 添加高斯噪声对图像灰度平稳区没有影响

图10为加噪图像的相位一致和 Canny 检测结果的比较,仍然使用相同的计算参数。添加的高斯噪声均值为0,方差为0.01。从相位一致的检测结果可以看出,尽管特征点处的相位一致强度有所降低,但灰

度平稳区域的高斯噪声被很好的略过了,即随机噪声对相位一致特征检测结果的定位没有明显的影响。而 Canny 算子检测的结果,不论是灰度平稳区域还是边缘特征处都出现了明显的波动。可见相位一致的抗噪能力比较强,是一种有较高鲁棒性的特征检测子。

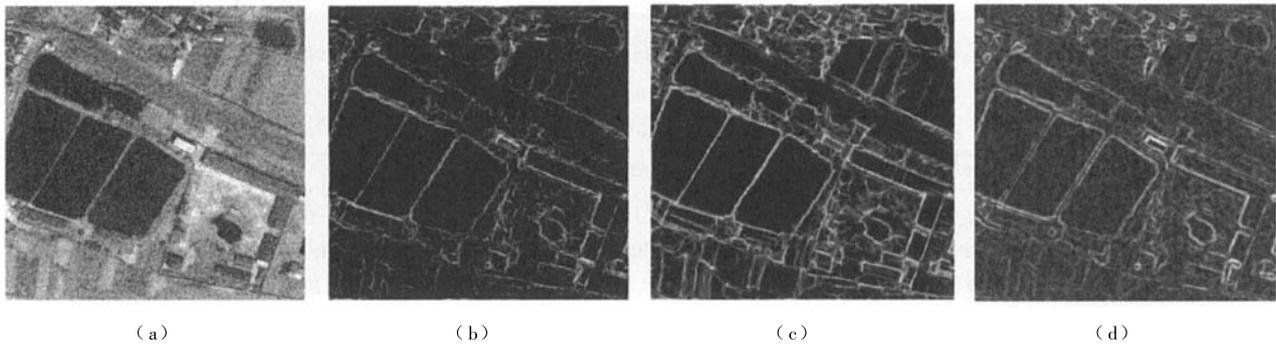


图10 添加了方差为0.01的高斯噪声的图像特征检测结果

(a) 添加了高斯噪声的图像; (b) 加噪图像的相位一致梯度; (c) 原始图像的相位一致梯度; (d) 加噪图像的 Canny 梯度, $\sigma=0.8$

Fig. 10 Feature detection results of image contaminated by Gaussian noise with 0.01 variance

(a) noise contaminated image; (b) Phase Congruency of noise image;

(c) Phase Congruency of original image; (d) Canny gradient of noise image, $\sigma=0.8$

以上参数变化的影响及比较研究表明,相位一致算法与 Canny 算子的差异在于:一是不需要先使用低通滤波去除噪声,因而具有更稳定的特征定位精度;二是抗噪声干扰的能力强,检测结果不会因为噪声而出现波动。

5 结论

本文引入相位一致作为图像特征的不变量,从频域相位的角度对高分辨率遥感图像的特征提取

进行了探索,并用相位一致方法进行了 IKONOS Pan 图像特征提取实验。结果表明,与 Sobel 和 Canny 等空域边缘特征检测算子相比,相位一致算法的主要优势有:(1)对图像局部亮度和对比度的变化不敏感,能捕捉图像的不变特征;(2)对线形物体产生单线响应,而不似空域检测算子产生双线响应;(3)不需要先使用低通滤波去除噪声,因而具有更稳定的特征定位精度;(4)抗噪能力强,检测的特征不会因为噪声而出现波动。

基于相位一致的遥感图像不变特征提取,为高分辨率遥感图像的分割和面向对象遥感图像分类提供了基础。下一步的工作,将在频域提取的图像特征基础上寻找合适的图像分割方法得到图像对象,从而使基于逐像元的遥感图像分类过渡到基于地物对象的图像识别。

参考文献(References)

- [1] Roberts L G. Machine Perception of Three-dimensional Solids[A]. Optical and Electro-optical Information Processing[C]. 1965.
- [2] Prewitt J M S. Object Enhancement and Extraction[A]. Picture Processing and Psychopictorics[C]. 1970.
- [3] Sobel I. Neighbourhood Coding of Binary Images for Fast Contour Following and General Array Binary Processing[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1978, **8**: 127—135.
- [4] Marr D, Hildreth E C. Theory of Edge Detection [A]. Proceedings of the Royal Society, London B[C]. 1980, **207**: 187—217.
- [5] Canny J F. A Computational Approach to Edge Detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679—698.
- [6] Oppenheim A V, Lim J S, Kopec G, *et al.* Phase in Speech and Pictures [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. 1979.
- [7] Oppenheim A V, Lim J S. The Importance of Phase in Signals [A]. Proceeding of the IEEE[C]. 1981, **69**: 529—541.
- [8] Morrone M C, Burr D C, Ross J, *et al.* Mach Bands Are Phase Dependent[J]. *Nature*, 1986, **324**: 250—253.
- [9] Morrone M C, Owens R A. Feature Detection from Local Energy [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, **6**(5): 303—313.
- [10] Kovesi P. Invariant Measures of Image Features from Phase Information [D]. PhD thesis, The University of Western Australia, Department of Psychology, 1996.
- [11] Kovesi P. Image Features from Phase Congruency[J]. *Videre: A Journal of Computer Vision Research*, 1999, **1**(3): 1—26.
- [12] Kovesi P. Edges Are Not Just Steps [A]. Proceedings of ACCV2002: The Fifth Asian Conference on Computer Vision [C]. 2002.
- [13] Kovesi P. Phase Congruency Detects Corners and Edges [A]. Proceedings of DICTA'03: The Australian Pattern Recognition Society Conference[C]. 2003.
- [14] Morrone M C, Burr D C. Feature Detection in Human Vision: A Phase-Dependent Energy Model [A]. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences [C]. 1988, **235**(1280): 221—245.
- [15] Aw Y K, Owens R, Ross J. Image Compression and Reconstruction by a Feature Catalogue [A]. European Conference on Computer Vision [C]. 1992.
- [16] Pudney C, Robins M, Robbins B, *et al.* Surface Detection in 3D Confocal Microscope Images via Local Energy and Ridge Tracing [J]. *Journal of Computer-Assisted Microscopy*, 1996, **8**(1): 5—20.
- [17] Kovesi P. Symmetry and Asymmetry from Local Phase [A]. AI'97: Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Poster Papers [C]. 1997.
- [18] Xiao Z, Hou Z, Miao C, *et al.* Using Phase Information for Symmetry Detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, **26**: 1985—1994.
- [19] Mulet-Parada M, Noble J A. 2D + T Acoustic Boundary Detection in Echocardiography [A]. Proceedings of the First International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention [C]. 1998.
- [20] Zheng Y, Nixon M S, Allen R. Automatic Lumbar Vertebrae Segmentation in Fluoroscopic Images via Optimised Concurrent Hough Transform [A]. Proceedings of 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society [C]. 2001.
- [21] Boukerroui D, Noble J A, Robini M C, *et al.* Enhancement of Contrast Regions in Suboptimal Ultrasound Images with Application to Echocardiography [J]. *Ultrasound Medicine Biology*, 2001, **27**(12): 1583—1594.
- [22] Kyan M J, Guan L, Arnison M R, *et al.* Feature Extraction of Chromosomes from 3D Confocal Microscope Images [J]. *IEEE Transactions in Biomedical Engineering*, 2001, **48**(11): 1306—1318.
- [23] Linguraru M G, Ballester M Á G, Ayache N. A Multiscale Feature Detector for Morphological Analysis of the Brain [A]. Medical Image Computing and Computer -Assisted Intervention- MICCAI2003 [C]. 2003.
- [24] Molton N, Pan X, Brady M, *et al.* Visual Enhancement of Incised Text [J]. *Pattern Recognition*, 2003, **36**: 1031—1043.
- [25] Pan X, Brady M, Bowman A K, *et al.* Enhancement and Feature Extraction for Images of Incised and Ink Texts [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, **22**: 443—451.
- [26] Myerscough P J, Nixon M S. Measuring Temporal Phase Congruency [A]. Proceedings of BMVA Workshop Spatiotemporal Image Processing [C]. 2004.
- [27] Huang Y, Lin S, Li S Z, *et al.* Face Alignment under Variable Illumination [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]. 2004.
- [28] Bezalel E, Efron U. Efficient Face Recognition Method Using a Combined Phase Congruency/Gabor Wavelet Technique [A]. Proceedings of the SPIE [C]. 2005, **5908**: 437—444.
- [29] Field D J. Relations between the Statistics of Natural Images and the Response Properties of Cortical Cells [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, **4**(12): 2379—2394.