

文章编号: 1007-4619(2007)01-0027-06

一种基于线特征的道路网变化检测算法

钟家强, 王润生

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院 ATR 国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 提出一种基于线特征的道路网变化检测算法。首先根据边缘的梯度信息从多时相遥感图像中提取变化的线特征;然后根据变化线特征的局部特性,检测出与道路模型相符合的变化道路段;最后通过道路网的全局约束条件,进行变化道路段的连接,实现变化道路的检测。提出的道路网变化检测算法将边缘的相位和幅度信息作为变化检测的判定依据,从而避免了道路的匹配与比较工作,降低了变化检测算法的复杂度,具有很强的实用性。将本文提出的方法用于多时相遥感图像的道路网变化检测,从实验结果可以看出该方法的有效性。

关键词: 多时相遥感; 变化检测; 直线特征; 道路网

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

A Road Network Change Detection Algorithm Based on Linear Feature

ZHONG Jia-qiang WANG Run-sheng

(ATR National Laboratory, National University of Defense Technology, Hunan Changsha 410073, China)

Abstract A road network change detection algorithm based on linear feature is proposed in this paper. Firstly, changed linear features are detected based on edge gradient information from multi-temporal remote sensing images. Secondly, the changed roads that fit well with the constraints of the model of road are extracted according to the local property of changed linear features. Finally, the changed roads are connected to changed road network based on the global connection constraints. This road network change detection approach uses the gradient information of edges as the change detection element instead of matching the line information, so it decreases the complexity of the change detection. The experimental results in multi-temporal remote sensing show the effectiveness of the proposed approach.

Key words multi-temporal remote sensing; change detection; linear feature; road network

1 引 言

变化检测是通过分析同一地区不同时相的遥感图像,检测该地区中地物随时间发生变化的信息^[1,2]。随着遥感和信息技术的发展,变化检测已经成为当前遥感图像应用研究的一个重要方向,广泛地用于许多领域。如资源保护中森林覆盖的动态监测;土地覆盖变化信息获取;军事侦察中道路、桥梁、机场等战略目标的动态监视;以及自然灾害评

估等^[3]。

目前常用的变化检测方法,基本上是根据地物在不同时相遥感图像中灰度的差异,实现地物变化信息的获取,如图像差分、图像比值、PCA 变换以及分类后比较等,属于像元级的分析方法,容易受到噪声、辐射条件和图像配准的影响^[4],具有很大的不确定性,并且像元级变化检测方法主要针对像元进行分析,从而缺乏表征目标变化的特征描述,这样使得基于特征分析的变化检测方法成为目标变化分析的主要途径。

收稿日期: 2005-08-28; 修订日期: 2006-05-10

作者简介: 钟家强 (1975—), 男, 2005 年毕业于国防科学技术大学信号与信息处理专业, 博士学位, 主要研究领域为图像分析、理解与信息融合。已发表和录用论文 10 余篇。

道路作为一类重要的地物,掌握其变化信息是地理数据更新和军事目标动态监视的一项重要内容。目前为实现道路的变化信息获取,也出现了一些变化检测方法^[5],但是基本上是针对不同的图像进行特征匹配和对比,如 Neil提出的基于线特征的变化检测方法^[6],先提取线特征,然后对线特征进行匹配,最后将那些在不同时相图像中没有彼此对应的线特征作为变化检测的结果。然而,对于不同时相的遥感图像,由于其获取条件的不同,使得图像间存在比较大的辐射和几何变化,即使通过辐射校正和几何配准的方法进行校正,也不能完全消除这些差异。这样,即便采用相同的道路提取方法,在不同时相图像中所提取的结果也可能不一致,从而会影响到特征匹配的稳健性;并且道路的匹配是一个非常复杂的处理过程,特别当出现断裂和交叉道路时,匹配的性能会明显的降低。

针对现有方法的不足,本文提出一种新的基于线特征的道路网变化检测方法。首先对不同时相的遥感图像进行边缘检测;然后根据不同时相图像中边缘的梯度方向和大小信息得到变化边缘;接着对变化边缘进行编组和拟合,提取出变化的线特征;最后再对变化线特征进行基于道路模型的连接和后处理,实现道路网的变化检测。由于本文提出的基于线特征的道路网变化检测方法,直接针对边缘的梯度信息进行比较,避免了不同时相遥感图像的道路网匹配,不仅降低了算法的复杂度,而且提高了变化检测的稳健性。

2 多时相遥感图像的变化线特征提取

2.1 遥感图像的线特征提取

直线在图像中表现为一系列空间连续的边缘点的集合,从图像中的像素点到形成几何意义上的直线,是一个图形学实现的逆过程,因此这种组合存在相当的难度。在遥感图像中,直线可以看作是被编组到一起的边缘点像素组成的直线支持区域的参数化表示^[7],判断边缘点能否和如何组合成直线就是直线提取任务的目标。

在直线的提取方法中,相位编组是一种有效的实现方法,它是针对大多数边缘和直线提取算法的两个主要弱点提出的:

(1)大多数算法是以某种方式利用灰度变化的幅度,以此作为局部边缘重要性的主要度量,这样往往检测不出有弱对比度的灰度变化;

(2)在对边缘特征作局部决策之前,缺乏对图像结构的全局理解。

Bums等人提出的相位编组方法^[7],不像大多数算法那样把灰度的幅度作为第一要素,而是把灰度变化的梯度信息作为优先考虑的因素;并且在对边缘作局部决策之前,先作支持边缘上下文关系的全局组织,使之能够从复杂的图像中抽取出低对比度的直线。具体实现过程是先把边缘的梯度相位量化为有限个整数范围,然后将梯度标记相同、位置相邻的边缘编组为直线支持区域,最后由直线支持区域拟合得到直线。

2.2 多时相遥感图像的变化线特征描述

为了检测出变化的线特征,需要根据不同时相遥感图像中所对应边缘点的编组信息进行分析比较,下面以两个时相的图像说明线特征变化检测中的边缘点编组信息分析情况:

(1)前一时相图像 I_1 中无线特征,后一时相图像 I_2 也无线特征。这时两幅图像中均无边缘信息。

(2)前一时相图像 I_1 中无线特征,后一时相图像 I_2 有线特征。这时边缘的梯度和幅度信息都存在大的变化,表现为线特征的新增。

(3)前一时相图像 I_1 中有线特征,后一时相图像 I_2 无线特征。这时边缘的梯度和幅度信息都存在大的变化,表现为线特征的消失。

(4)前一时相图像 I_1 中有线特征,后一时相图像 I_2 有线特征。这时两个时相图像中都存在线特征,边缘的幅度信息已经不能作为判断的依据了,因此主要根据边缘的梯度信息对线特征的变化情况进行分析,主要存在两种情况:① 边缘特征没有发生变化:这时边缘的梯度信息相似或者反向相似。② 边缘特征发生变化:这时两个时相图像中的边缘梯度信息不相似。

2.3 多时相遥感图像的变化线特征提取

2.3.1 变化边缘点检测

在基于线特征的变化检测中,首先需要针对不同时相的遥感图像进行边缘检测,这里采用 Canny方法检测出图像的边缘。然后根据上一部分的变化线特征的表现形式,通过边缘的幅度和梯度信息,检测出变化的边缘,具体的实现过程如下:

第一步:首先根据前一时相遥感图像 I_1 与后一时相遥感图像 I_2 的边缘强度信息 M_1 和 M_2 ,如果

$$|M_1(i, j) - M_2(i, j)| > Th_1 \quad (1)$$

则将点 (i, j) 作为变化边缘点, 加入到变化线段支持区域; 否则进入下一步, 其中 $Th1$ 用以界定不同时相遥感图像中的边缘强度差异。

第二步: 根据边缘的相位信息判断该点是否属于变化线段。判断两个时相遥感图像在点 (i, j) 处的边缘梯度信息 $\phi_1(i, j)$ 与 $\phi_2(i, j)$, 如果

$$|\phi_1(i, j) - \phi_2(i, j)| > Th2 \tag{2}$$

则将边缘点 (i, j) 作为变化边缘点, 加入到变化线段支持区域; 否则作为非变化边缘点, 其中 $Th2$ 用以界定不同时相遥感图像中边缘梯度方向的差异。

2.3.2 相位压缩与编组

直线段作为被编组到一起的边缘点像素组成的直线支持区域的参数化表示, 除了边缘的幅度信息以外, 梯度信息同样可以作为编组的基本信息, 并且边缘的梯度信息体现了边缘在小尺度范围内的边界走向。因此, 直线可以看成具有相同边界走向的相邻边缘点组成的区域的参数化表示。

在形成变化线特征的支持区域过程中, 首先需要对变化线特征进行编组。编组实际上是根据边缘的梯度信息检测出梯度方向相同的边缘线。通过提取的变化边缘, 得到边缘点的相位信息:

$$\phi(i, j) = [\phi_1(i, j), \phi_2(i, j)] \tag{3}$$

式中, $\phi_1(i, j)$ 和 $\phi_2(i, j)$ 分别为前一时相图像 I_1 和后一时相图像 I_2 在位置 (i, j) 处的边缘梯度值。为了简化计算, 需要对梯度信息进行等间隔量化, 得到离散的梯度值:

$$\phi(i, j) = \{v_i\} \tag{4}$$

式中, v_i 是梯度量化后的第 i 个量化值, 对于梯度量化, Bums 给出了具体的实现方法, 通过重叠量化以克服量化断裂问题, 其基本思想是将每一边缘点得到的方向在两种划分下量化, 而两种划分相差量化单位的一半。如一个梯度量化的划分是 $[(0^\circ,$

$45^\circ), (45^\circ, 90^\circ), (90^\circ, 135^\circ), \dots, (315^\circ, 0^\circ)]$; 另一个划分是 $[(22.5^\circ, 67.5^\circ), (67.5^\circ, 112.5^\circ), (112.5^\circ, 157.5^\circ), \dots, (337.5^\circ, 22.5^\circ)]$, 每个划分赋予边缘点一个方向值, 并将其包含在一个直线支持区中, 一个边缘点在每种划分下都对应一个直线支持区, 最大的那个支持区对应的边缘方向量化值被赋给该边缘点。

在变化边缘的编组时, 先将量化后变化边缘中方向值相同且相互连通的像素点连接成各自的集合, 形成变化直线支持集。通过编组, 将图像中相邻且具有等价属性的变化边缘点像素标记为相同的编号, 不相通的集合编号不同。

2.3.3 线段拟合

在得到变化线段的支持区域后, 可以通过直线拟合得到变化的线段。对于线段的参数表示等式为 $y=kx+b$ 则最小二乘拟合的参数求解等式为:

$$\begin{cases} k = \frac{\sum x_i y_i - m \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - m \bar{x}^2} \\ b = \bar{y} - k \bar{x} \end{cases} \tag{5}$$

式中, x_i, y_i 和 \bar{x}, \bar{y} 分别为变化线段支持区域边缘的坐标值和均值; m 为变化线段支持区域边缘点数。通过最小二乘方法能够得到每条变化线段的特征属性, 包括长度、方向和位置等。

3 基于线特征的道路网变化检测算法

3.1 道路网变化检测算法流程图

根据得到的变化线特征, 然后对其进行特征分析、选择和组合, 形成变化直线, 最后运用知识和规则, 得到变化的道路, 从而实现道路网的变化检测, 整个道路网变化检测的算法流程如图 1 所示。



图 1 道路网变化检测流程
Fig 1 Road network change detection

3.2 变化道路提取

在遥感图像中, 道路一般表现为曲率变化不大的线条, 在道路两边存在灰度跳变, 通过变化线特征提取算法, 可以提取不同时相图像中平行或者近似平行的变化直线段。因此, 可以采用直线段和平行

线段来表示变化道路的判决规则, 而对于曲率变化大的部分, 可以采用分段表示的方法^[8]。

3.2.1 平行线的判定

道路在图像中的线特征表现为一组平行线, 因此判断平行线是进行路段检测的一条重要规则。而在变化线的提取过程中, 由于存在噪声等影

响,使得检测出的变化道路的线特征并不完全是理想的平行路段,所以在判断平行线的规则时,应考虑一定的误差,提取在一定范围内近似平行的变化线段。

这里提出一个平行线段的判定准则。其判定原理如图 2 所示。其中的线段端点为 (A B C D)。(A' B' C' D')分别是 (A B C D)在另一个直线的投影。d₁ - d₄ 分别是每个线段端点到另一个直线的距离。t为两个直线夹角。具体准则为:

$$\begin{cases} \forall_{i \neq j, i,j=1, \dots, 4} |d_i - d_j| < Th3 \\ |t| < Th4 \end{cases} \quad (6)$$

式中, Th3用以界定一直线的不同端点到另一直线的距离差异, Th4用以界定两直线的夹角限制。另外,两个线段的端点在对方的投影点中,应该有两个是所在线段的内点,例如,在图 2中两个线段的端点 (A B C D)在对方的投影点为 (A' B' C' D'),其中 B'和 C'分别为所在线段 CD和 AB的内点。而如果两个内点在同一线段上,则这两个内点距离必须大于一个门限 Th5;否则如果不在同一线段上,则一个内点和另一个内点所对应的线段端点的距离大于一个门限 Th6,即:

$$|CB' - C'B| > Th6 \quad (7)$$

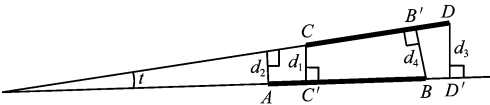


图 2 平行线判定规则
Fig 2 Rules for detecting parallel lines

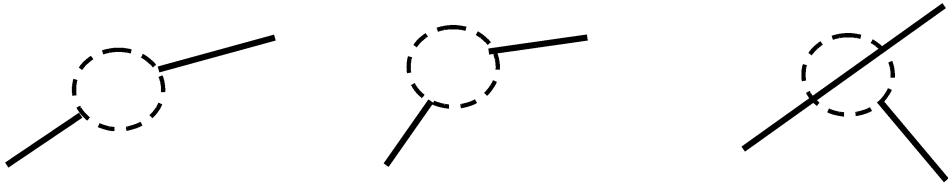


图 3 路段连接关系
Fig 3 Relations for road connecting

3.2.3 道路网变化检测的后处理

在前面的变化道路的检测过程中,基本上都是利用描述道路的线特征的结构信息进行判定,由于多时相遥感图像中存在地物随季节变化的因素,因此不同时相遥感图像中会出现非地物的变化线特征,而基于上面的算法可能将其作为变化的道路处理,因此利用其他辅助信息消除虚假变化是必要的。在道路网变化检测的后处理中,采用了附加判定道路的规则对一

3.2.2 变化道路中路段连接规则

在进行变化道路提取时采用层次化的方法,首先从所有多光谱图像中提取出的变化直线段中,检测出严格符合路段模型的路段,这些路段是突出变化路段的初步识别结果。突出变化路段模型约束的具体准则是:(1)该路段长度大;(2)该路段所对应的原始变化直线段的灰度梯度均值大;(3)该线段所对应的平行的直线段间夹角接近零度。

一般整个道路网由一些道路段相互连接而成,由于道路的连续性,必须对满足一定条件的线段进行连接,以形成更长的道路线段。这里,首先根据路段之间的连接关系准则,对突出路段进行连接,然后以提取出的突出路段为种子,对已经被其他的各个线段和平行线段按照迭代方式进行搜索,判断是否符合道路连接约束;对于符合者,判定为道路,并且作为新的“种子”,进一步进行搜索,直到考察了所有的线段。但如何正确地对提取的路段进行判断和连接成网络,是其中的关键问题。本文针对道路网的全局连接关系定义如下准则(如图 3所示):

- (1)表现为方向一致、端点距离相近的路段,可能为同一路段。
- (2)表现为方向相差较大,但一个路段和另一个路段的端点在一个距离范围内构成首尾相连关系,可能为路段的方向发生变化。
- (3)表现在路段之间近似构成相交关系,可能为路段的交叉。

最后,为了克服路段提取时出现的误判,删除提取的路段中不能和其他路段构成连接关系的孤立的路

些虚假变化道路进行排除,如变化道路的长度限制、宽度限制以及变化道路的局部灰度变化范围等等。

4 实验结果与分析

根据前面提出的基于线特征的变化检测方法,实验中采用了真实的多时相遥感图像进行仿真。先对不同时相的遥感图像进行图像配准和辐射校正,

图像配准采用选择控制点的多项式方法,而辐射校正则采用了基于统计回归的相对辐射校正方法^[8]。

实验 1 中选择了描述江苏省无锡市郊区城市发展的多时相遥感图像,如图 4 所示。图 4(a)为 1999

年的 SPOT 全色图像;图 4(b)为 2001 年的 SPOT 全色图像;图 4(c)为检测出的变化线特征;图 4(d)为检测出的变化道路。从检测出的变化道路中,可以看出城区的新建道路情况。

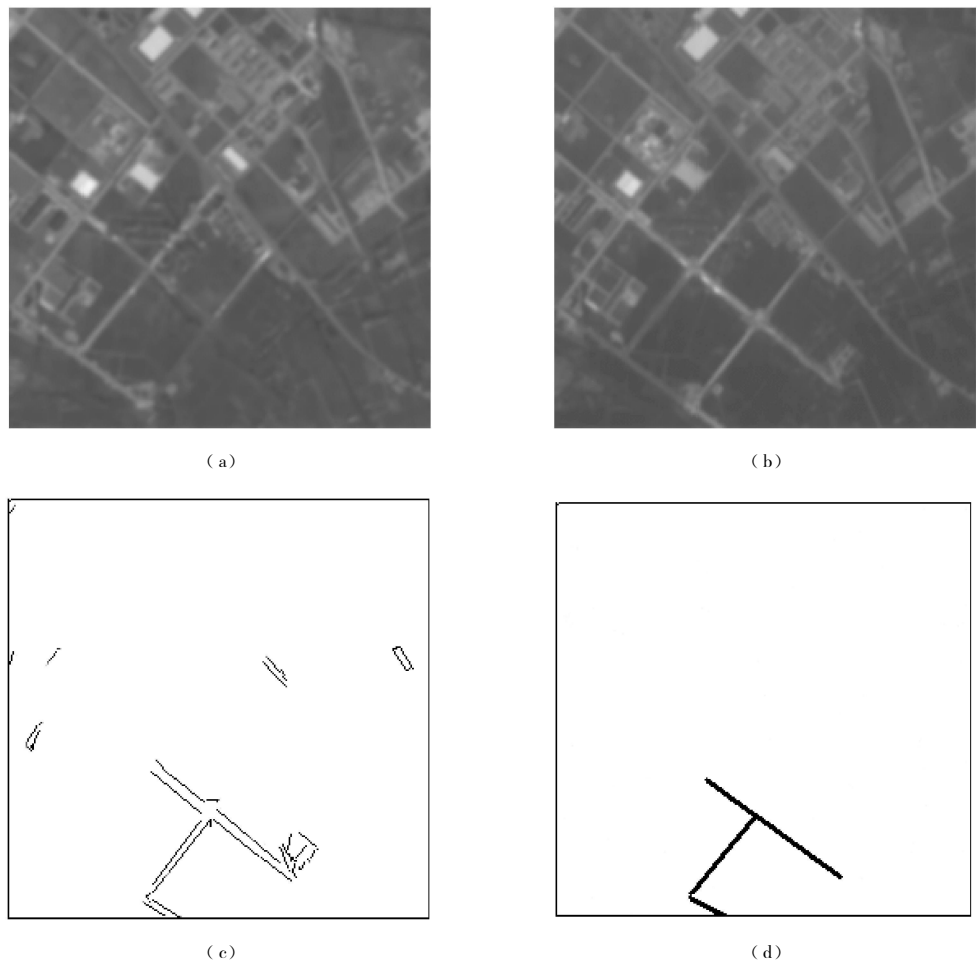


图 4 无锡市城市发展道路网变化检测
(a)1999 年的 SPOT 全色图像; (b)2001 年的 SPOT 全色图像; (c)检测出的变化线特征; (d)检测出的变化道路

Fig 4 Road network change detection for part of Wuxi

(a) SPOT image of research area in 1999; (b) SPOT image of research area in 2001;
(c) the detected line features of change; (d) the detected road which of changed

实验 2 中选择了黑龙江省同江市野外的多时相遥感图像,如图 5 所示。其中图 5(a)为 1999 年的 ETM 全色图像,图 5(b)为 2001 年的 ETM 全色图像,图 5(c)为检测出的变化线特征,图 5(d)为检测出的变化道路。从得出的变化道路中,位于中部的新建道路被很好地提取,并且左上角处的两条新建道路,虽然在两个时相图像中其辐射灰度差别不大,但是其边缘信息发生了变化,因此采用本文提出的基于线特征的变化判决准则,它们还是被有效地检测出来。

于主要道路能够有效地提取,由于在道路的变化检测时用到边缘的梯度信息,因此能够将灰度变化不明显的变化道路检测出来,同时也可以避免将由于灰度变化而道路本身没有变化的道路作为变化道路。

5 结 论

本文提出的基于线特征的道路网变化检测可以有效地检测出遥感图像中道路的变化信息,具有很强的实用性。所提的方法对于道路的断裂和交叉也能很好的处理,对于灰度变化信息不明显的路段,也

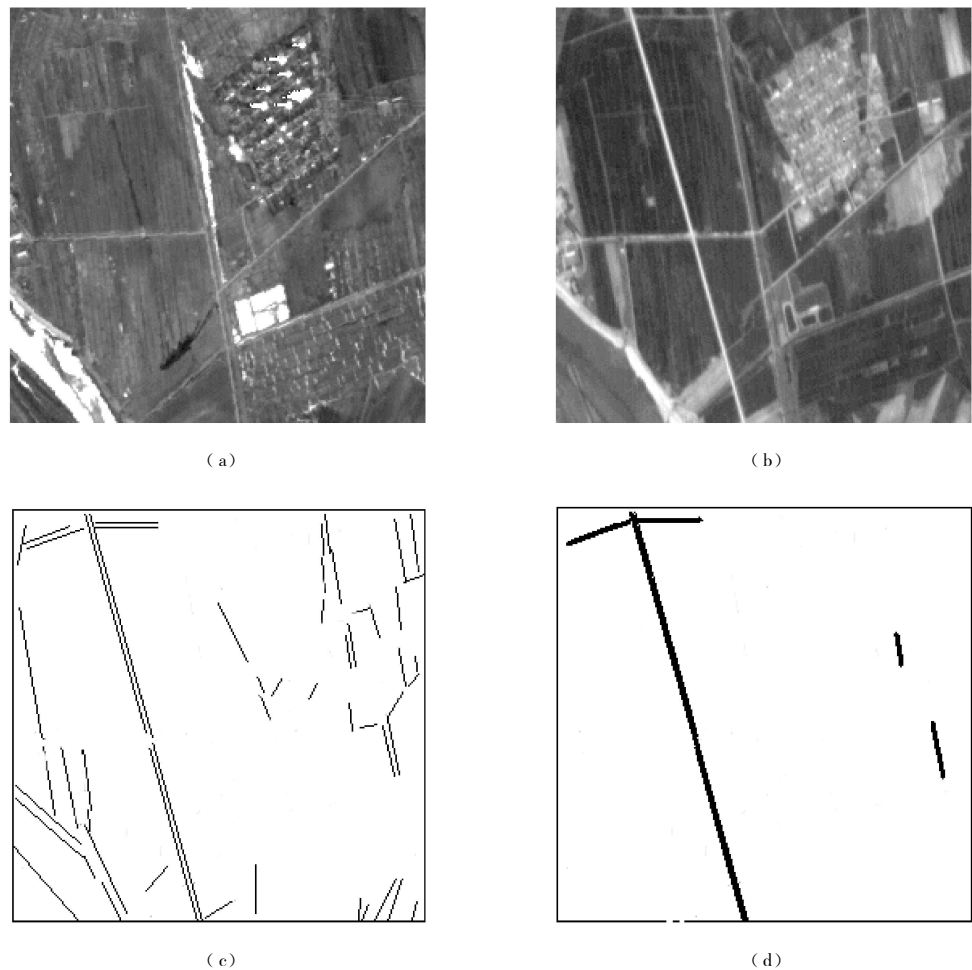


图 5 同江市野外道路网变化检测

(a) 1999 年的 ETM 全色图像; (b) 2001 年的 ETM 全色图像; (c) 检测出的变化线特征; (d) 检测出的变化道路

Fig 5 Road network change detection for the field of Tongjiang

(a) the ETM image in 1999; (b) the ETM image in 2001; (c) the detected line feature of changed; (d) the detected road of changed

可以有效的提取。本文提出的基于线特征的变化检测方法具有广泛的应用范围,虽然本文只给出了在道路网变化检测中的应用,但是对于其他线性对象,如机场跑道、桥梁和港口等目标的变化检测,采用本文的方法也能很好地实现。

参 考 文 献 (References)

[1] Lunetta R S, Elvidge C D. Remote Sensing Change Detection [M]. Princeton, USA: Taylor and Frances Press, 1999.
[2] Singh A. Digital Change Detection Techniques Using Remotely Sensed Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10: 989—1003.
[3] Lu D, Mausel P. Change Detection Techniques[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2365—2407.
[4] Dai X L. The Effects of Image Misregistration on the Accuracy of Remotely Sensed Change Detection[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1566—1577.

[5] Geoffrey G H. Object Level Change Detection in Spectral Imagery [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 553—561.
[6] Neil C R, Lynne L G. Change Detection for Linear Features in Aerial Photographs Using Edge-Finding[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(7): 1608—1612.
[7] Bums J B, Hanson A R, Riseman E M. Extracting Straight Line [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(4): 425—445.
[8] Cai T, Wang R S. An Algorithm for Extracting Road Network from Multi-Band Remote Sensing Images [J]. Journal of Software, 2001, 12(6): 943—948. [蔡涛, 王润生. 一个从多波段遥感图像提取道路网的算法[J]. 软件学报, 2001, 12(6): 943—948.]
[9] Yong D, Philippe M T, Josef C. Radiometric Normalization of Multitemporal High Resolution Satellite Images with Quality Control for Land Cover Change Detection[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82: 123—134.