

基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别

王文锋¹ 朱书华² 冯以浩² 丁伟利^{2*}

(¹ 燕山大学车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)
(² 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 针对高分辨率遥感图像中道路、建筑物和水域等的特征识别难题,提出了一种基于边缘局部方向信息的平行边缘自动识别算法。该算法首先定义平行边缘由一系列相互平行的短直线组成;然后提出了交叉点共线约束的 8-邻域边界追踪和 9-像素滑动窗口内直线检测算法,实现了边缘连续线条局部方向信息编码;最后通过分析连续线条结构及方向编码规律,提出了主元分析及方向一致性判别准则进行平行特征识别。实验结果表明,该算法能够有效提取高分辨率遥感图像中具有最近邻关系的平行直线和曲线特征,平均识别准确率在 95% 以上,但算法执行速度有待提高。

关键词 机器视觉;平行边缘识别;局部方向编码;特征识别

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0315001

Parallel Edges Detection from Remote Sensing Image Using Local Orientation Coding

Wang Wenfeng¹ Zhu Shuhua² Feng Yihao² Ding Weili²

(¹ Institute of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(² Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract In order to solve the difficulty for extraction of roads, buildings and rivers from high-resolution remote sensing images, a new parallel feature detection algorithm based on edge directional information is proposed in this paper. Firstly, parallel edges model is defined as boundaries made up of parallel short lines. Then, the methods of 8-neighborhood boundary-tracking based on collinear restriction in junction points and line detection algorithm in 9-pixels sliding window are proposed to obtain the local directional codes of edge chains. Finally, two efficient criterions are presented to extract the parallel features based on the principal component analysis and the consistency of edge coding. Experimental results show that the proposed algorithm is effective for extracting the nearest parallel lines and curves from high-resolution remote sensing images, and the average accuracy is more than 95%, but the running speed needs further improvement.

Key words machine vision; parallel edges detection; local orientation coding; feature recognition

OCIS codes 150.0155; 330.5000; 040.1880; 200.4960

1 引言

平行线是图像中重要的几何特征,广泛应用于智能交通^[1]、摄像机标定^[2]、目标跟踪^[3]和遥感图像处理^[4]等领域。尤其是在高分辨率遥感图像中,道路、建筑物、桥梁、机场和水域等关键地物近似为正

射投影,平行结构众多,因此平行特征对上述关键地物特征的自动识别至关重要。几十年来,各国的研究者提出了许多算法^[5,6],其中大部分都是基于线特征完成识别任务^[7],只有少数算法是基于平行边缘进行的目标识别^[8],且平行边缘检测的过程中多

收稿日期: 2011-09-13; 收到修改稿日期: 2011-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61005034, 60905046)资助课题。

作者简介: 王文锋(1979—),男,硕士,实验师,主要从事智能交通和汽车虚拟试验等方面的研究。

E-mail: wangwenfeng@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: weiye51@ysu.edu.cn

采用 Hough 变换、相位编组、模型匹配或蛇模型,识别准确性和稳定性不高。如经典 Hough 变换只能提取较长的平行直线特征^[9],难以识别平行曲线,其改进算法虽然可以提取平行曲线状道路和较短平行道路特征^[10],但计算量大,需要较高的内存开销,且提取效果受阈值及图像复杂度的影响较大,稳定性较差;模型匹配算法^[11]需要改变参数,难以检测出与设定模板不符的平行边缘;相位编组算法在最初的直线提取过程中会产生大量的短直线,难以保证后续平行线识别的准确性^[12];蛇模型将平行双边缘特征纳入能量项,可以准确提取内部颜色比较均匀的道路,但需要人工选取初始轮廓^[13]。

从目前的研究现状来看,现有平行边缘识别算法在通用性、准确性及稳定性方面均不理想。针对这一问题,本文基于平行边缘的局部方向一致性,提出了边缘局部方向编码策略,并根据编码结果,提出了主元分析和方向一致性判别准则,实现了具有最近邻关系的平行直线及曲线的识别。

2 基于线特征的高分辨率遥感图像边缘编码

2.1 平行边缘模型基本假设

在高分辨率遥感影像中,属于同一地物的两条平行边界往往相距较近,边界之间方向变化趋于一致,单条边界通常由曲率变化较小的直线或平滑曲线组成。根据这些特点,本文假设平行边缘模型由整体曲率变化较小、局部为直线的两条平滑曲线组成,典型情况如图 1 所示,其中(a)~(c)为平行直线,(d)~(g)为平行曲线。

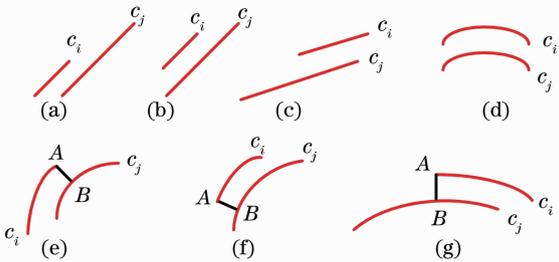


图 1 典型的平行直线或平行曲线

Fig.1 Typical parallel lines and curves

假设属于同一地物且距离最近的两条边界分别为 c_i ($10 \leq i \leq m_i$) 和 c_j ($10 \leq j \leq m_j$),其中 m_i 和 m_j 为组成边界的边缘像素数(本文不考虑长度小于 10 pixel 的边界), c_i, c_j 为 C^2 类平面曲线。定义 $c_{iH} = [x_{i-H} \cdots x_i \cdots x_{i+H}; y_{i-H} \cdots y_i \cdots y_{i+H}]$ 为 c_i 上任一点 $p_i(x_i, y_i)$ 左右各 H 个像素组成的点集,过 p_i 作 c_{iH} 的

垂线交曲线 c_j 于点 $p_j(x_j, y_j)$,同时定义 p_j 左右各 H 个像素组成的点集为 $c_{jH} = [x_{j-H} \cdots x_j \cdots x_{j+H}; y_{j-H} \cdots y_j \cdots y_{j+H}]$ 。如果 c_{iH} 和 c_{jH} 满足以下直线方程

$$\begin{cases} c_{iH}: y_i = k_i x_i + b_i, & c_{iH} \in c_i \\ c_{jH}: y_j = k_j x_j + b_j, & c_{jH} \in c_j \end{cases} \quad (1)$$

则认为 c_{iH} 和 c_{jH} 为一个局部对应直线对。如果 $c_i \parallel c_j$,则须满足下述条件:

- 1) 依次遍历 c_i 的所有边缘点,构成的局部对应直线对数目 n_b 应满足一定长度;
- 2) 对任意一直线对,其角度 θ_i 和 θ_j 需满足 $|\theta_j - \theta_i| \leq \epsilon$ (ϵ 为接近 0 的阈值);
- 3) c_i 上构成的所有直线对中满足条件 2) 的直线对数目需超过 85%。

2.2 边缘方向编码

根据平行边缘模型的基本假设,如果某段边缘属于平行线的一部分,则以该段边缘上任意点为中心的局部范围内的边缘像素必满足直线条件。根据这一特点,本文提出了图 2 所示的算法 1:边缘方向编码算法。

算法 1 的输入是 Canny 算子提取的单像素宽边缘图像 bw,输出为边缘方向编码列表 dirlist 和连续边缘列表 edgelist。在编码过程中,首先利用交叉点检测算法提取边缘图像中的交叉点,然后以首次遍历到的边缘像素点坐标为起始位置,利用边界追踪算法跟踪与其具有 8-邻域连接关系的边缘点构成集合 edgepoints, $\{p_i(x_i, y_i) | i=1 \cdots m_i\}$,最后采用 9-像素滑动窗^[14]依次提取每个像素的邻近结构,组成连续线条 bb,并利用局部直线识别算法判断 bb 上的点是否满足直线条件,如满足,将其编码为对应的直线方向角;否则将其编码为 0。

在上述算法中,交叉点识别(Findjunctions)、边界追踪(Trackedge)和局部直线方向编码(isLine)三个子函数是边缘方向编码过程中涉及到的重要算法,具体算法如下。

1) 交叉点识别

考察 $E(x, y)$ 中某边缘像素 8-邻域,像素点序号如图 3(a) 所示。设 $x(i), i = 1, \dots, 9$, 表示像素值(0 或 1),定义 $a = [x(1), x(2), x(3), x(6), x(9), x(8), x(7), x(4)]$, $b = [x(2), x(3), x(6), x(9), x(8), x(7), x(4), x(1)]$ 。如果^[15]

$$\sum_{j=1}^8 (|a_j - b_j|) \geq 6, \quad (2)$$

则该边缘像素为交叉点,如图 3(b) 所示。

2) 边界跟踪

```

algorithm 1: edge labeling
input: edge image bw
output: label list dirlist and edgelist
1    $Jp \leftarrow \text{findjunctions}(bs)$ 
2   for each pixel whose value is 1 in bw do
3        $(x,y) \rightarrow$  the coordinate of the pixel
4       edgepoints  $\leftarrow \text{trackedge}(bw,x,y,Jp)$ 
5       for  $i$ th point in edgepoints when the length of edgepoints>9
6            $bb=\text{edgepoints}(i-4,\dots,i+4)$ 
7            $\theta=\text{isline}(bb)$ 
8           if  $\theta>0$     $\text{dir}(i)=\theta$ 
9           else       $\text{dir}(i)=0$ 
10          end
11         end
12         add dir to dirlist
13         add edgepoints to edgelist
13    end
    
```

图2 算法1:边缘方向编码

Fig. 2 Algorithm 1: edge labeling

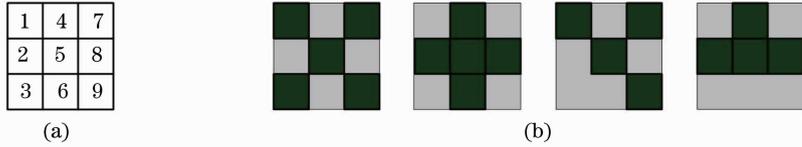

 图3 3×3 邻域内的交叉点结构。(a) 3×3 区域；(b) 典型结构

 Fig. 3 Junction points structure in a 3×3 region. (a) Index of 3×3 region; (b) typical structure

对任意像素点进行边界跟踪,需要首先确定其8-邻域像素分布以及追踪方向。图4是任意边缘点在 9×9 窗口内的典型结构分布情况,其中中心像素为当前追踪像素,白点代表已被跟踪过的像素,黑点代表与中心像素具有连接关系的边缘像素,黑框代表中心像素的8-邻域。图4(a)中当前像素为不间断点,其跟踪方向具有唯一性;图4(b)中当前像素为端点,它是边界跟踪终点;图4(c)~(h)的当前像素为交叉点,在边界跟踪过程中,该类点的跟踪方向不唯一。对于平行线识别这一任务,跟踪过程中保留与已跟踪像素位于同一直线上的像素至关重要,它将避免多交叉点产生较多短线对平行边缘识别造成的不利影响。因此,本文改进了文献[15]中的边界跟踪算法,定义交叉点的跟踪方向为与其具有连接关系且共线的边缘像素所在方向,如果这一条件不满足,则定义此交叉点为边界跟踪终点。

3) 局部直线识别

对任意9-像素宽滑动窗内的连续线条bb,根据两点之间直线最短原则判断bb中的点是否在同一直线上。设bb的两个端点分别为 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$,根据下式分别计算两个端点之间的直线长度 d 和边缘像素长度 L :

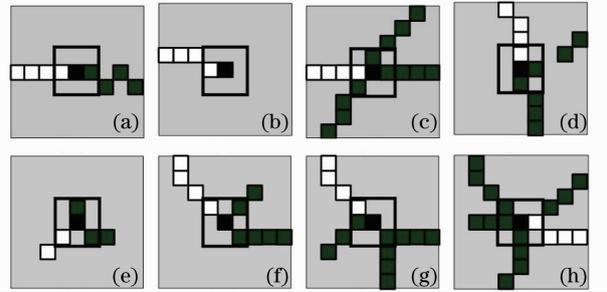

 图4 任意边缘点在 9×9 窗口典型结构

 Fig. 4 Typical structure in 9×9 window of any edge pixel

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ L = \sqrt{2}m_1 + m_2, (m_1 + m_2 = m) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 m_1 为具有 m -邻接关系的像素个数, m_2 为具有4-邻接关系的像素个数。

定义直线度因子

$$s = \frac{d}{L}. \quad (4)$$

如果 $s \geq T$,则判定bb为直线,其方向角 θ 表示为

$$\theta = \begin{cases} 0, & s < T \\ 57.3 \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) + C, & s \geq T \text{ and } x_2 \neq x_1, \\ 90 + C, & s \geq T \text{ and } x_2 = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 T 为衡量直线度的阈值, C 是为了显示编码结果而设置的常值, 可以提高边缘编码像素的亮度, 本文中取 75。

如图 5(a) 所示, 对高分辨率遥感影像利用算法 1 进行边缘方向编码后, 曲率变化较大的点将被滤除, 编码后直线、平滑曲线和平行边界被完整地保留下来, 并且边界像素的灰度变化很好地表征了边界形状的变化: 灰度变化一致的线条为直线, 而灰度变化平缓的连续线条为平滑曲线。此外, 由于改进了文献[15]中的边界追踪算法, 交叉点处局部为直线的线条被认为属于同一追踪线条, 因此图 5(a) 所示多交叉点合成图像经过编码后保证了直线的连续性, 避免了由于交叉点而引起的过多短线的问题, 如图 5(b) 的合成图像。由于道路、桥梁、水域、机场和建筑物等特征均由直线或平滑曲线组成, 并且包含众多平行结构, 因此边缘方向编码十分有利于平行线识别以及其他几何特征识别。

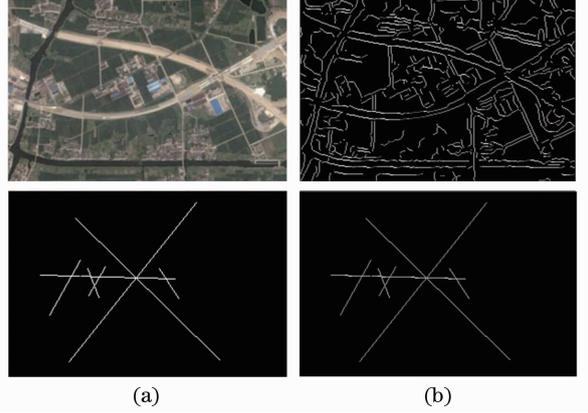


图 5 典型道路图像边缘方向编码结果。(a)源图像;
(b)编码图像

Fig. 5 Edge direction label results. (a) Source image;
(b) image coding

3 基于方向编码的平行边缘识别

编码后的图像中含有边缘所在直线的局部方向信息, 因此相互平行的直线或曲线其局部编码必然

algorithm 2: parallel edges detection

input: sorted edge chains $C=\{c_i\}$ and its code $W=\{w_i\}$, road maximum with L

output: parallel edges list: plist

```

1   $M_L \rightarrow L \times L$  matrix in vertical direction from  $1^\circ$  to  $180^\circ$ 
2  for each  $c_i$  do
3       $M_L\{\theta_{ii}\} \rightarrow$  matrix in vertical direction of endpoint 1
4       $C_L \rightarrow L \times L$  coding sub-matrix at endpoint 1
5      clist  $\leftarrow$  GetCross( $M_L, C_L$ )
6      if the number of clist > 0 then
7          cnearlist  $\rightarrow$  the nearest edge chain of  $c_i$ 
8          wnearlist  $\rightarrow$  the orientation coding of  $c_i$ 
9          flag  $\leftarrow$  direct_consistent(cnearlist, wnearlist)
10         if flag > 1
11             add cnearlist to plist
12         end
13     end
14     if flag < 1 then
15          $p2, \theta_2 \rightarrow$  endpoint 2 and its coding
16         repeat step 3-13
17     end
18 end

```

图 6 算法 2: 平行边缘识别

Fig. 6 Algorithm 2: parallel edges detection

一致。但对于高分辨率遥感图像而言,只有相邻的平行直线或曲线才最有可能属于同一地物,对后续的特征识别有意义,因此识别出的平行直线或曲线之间需要满足距离最近原则。根据这一特点,本文将经过编码的具有一定长度的连续线条按长度进行升序排列,排序结果记为 $C = \{c_i\}_{i=1}^n$,且 $c_i = \{x_{ij}, y_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$, c_i 对应的方向编码记为 $w_i = \{\theta_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$,同时定义平行边缘的判定准则为:如果 c_i 的垂直方向上和 c_i 距离最小的线条与 c_i 在方向编码上具有一致性,则二者平行。

平行边缘识别过程如图 6 所示。该过程包含两个主要步骤:最近邻线条及编码提取(1~9 行)和方向一致性判别(见第 9 行 `direct_consistent` 函数)。其中第一步主要通过垂直方向矩阵 M_L 和编码图像子矩阵 C_L 实现,具体计算方法见 3.1;第二步的算法思想见 3.2。

3.1 最近邻线条提取

定义与某直线垂直且大小为 $L \times L$ 的直线矩阵为垂直方向矩阵 M_L , L 的取值近似等于允许的平行线之间的最大距离, M_L 中的像素按下述规律赋值:设过矩阵中心与角度为 θ 的直线垂直的直线为 l_{θ} ,如果矩阵中的像素点在直线 l_{θ} 上,则定义其值为 1,否则其值为 0。

如图 7 所示,对于方向编码图像中灰度值为 θ 的点 $p(x, y)$,该点所在的局部直线方向为 θ ,以 c_i 的一个端点 $p(x, y)$ 为中心,在 $L \times L$ 窗口内取出编码图像子矩阵 C_L ,则可以获得 c_i 附近的局部线条分布情况 `clist`, $M_L\{\theta\}$ 将生成与 c_i 垂直的方向矩阵(图 7 中红色线条),它与 C_L 中编码线条的交点为 $p1, p2, p3, p4$ (图 7 中交叉点)。其中 $p1, p2$ 在 c_i 的一侧, $p3, p4$ 在 c_i 的另一侧,根据距离最近原则, $p2, p3$ 为 c_i 两侧与之距离最近的点,因此它们所在

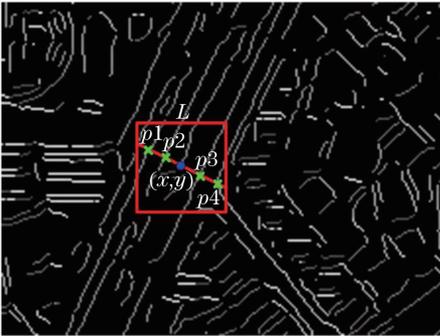


图 7 垂直方向矩阵及其交点

Fig. 7 Matrix in vertical direction and the crosses in edge direction image

的线条是 c_i 的最近邻线条 `cnearlist`,如果进一步考虑最近邻线条的编码 `wnearlist`,则可以判断它们是否与 c_i 平行。

3.2 方向一致性判别函数

考虑任意边缘连续线条 $c_i = \{x_{ik}, y_{ik} | k = 1, \dots, m_i\}$ 和 $c_j = \{x_{jk}, y_{jk} | k = 1, \dots, m_j\}$,其方向编码分别为 w_i 和 w_j ,且 c_i 的长度小于 c_j 的长度。根据平行边缘模型的假设,如果 $c_i \parallel c_j$,则将 c_i 投影到 c_j 上,两者重合的部分必然在方向编码上具有一致性。在实际识别过程中,如果 c_i 和 c_j 均为直线,如图 1(a)~(c),则只要判断直线间的夹角即可;如果 c_i 和 c_j 为曲线,则需要逐一判断其中的平行直线对是否满足假设条件。根据以上分析,定义如下两个条件判断 c_i 和 c_j 是否平行。

条件 1:利用主元分析法对 c_i 和 c_j 构成的二维向量 $x_i = [x_{i1} \dots x_{im_i}; y_{i1} \dots y_{im_i}]$ 和 $x_j = [x_{j1} \dots x_{jm_j}; y_{j1} \dots y_{jm_j}]$ 进行降维,得到 x_i 和 x_j 的最小特征根分别为 r_i 和 r_j ,主方向为 v_i 和 v_j 。如果 $r_i < \epsilon$ 且 $r_j < \epsilon$,则 c_i 和 c_j 均为直线^[16];如果 $r_i \geq \epsilon$ 且 $r_j \geq \epsilon$,则 c_i 和 c_j 均为曲线。如果两直线的夹角满足 $|\theta_i - \theta_j| < T_1$ (T_1 为阈值),则判定 $c_i \parallel c_j$ 。

条件 2:过 c_i 的一个端点 A 利用垂直方向矩阵确定它与 c_j 的交点 B ,分别以点 A 和点 B 为起点,在 c_i 和 c_j 上截取像素个数相同且整体方向一致的子线段 c_{Ax} 和 c_{By} ,两者方向编码分别为 $w_{Ax} = \{\theta_A \dots \theta_x\}$ 和 $w_{By} = \{\theta_B \dots \theta_y\}$,如果两条线段中满足 $|w_{Ax} - w_{By}| < T_2$ (T_2 为方向夹角阈值)的像素个数大于 T_3 ,则判定 $c_i \parallel c_j$ 。

上述两个条件中,只要满足其中之一即可判定 c_i 和 c_j 平行。条件 1 可用于判定两条直线是否平行;条件 2 可用于判定两条曲线或一条直线和一条曲线在局部是否具有平行关系。两个条件中,阈值 T_1, T_2 和 T_3 决定了边缘之间平行关系的严格程度,其中 T_1 和 T_2 越大,说明允许的两条平行边缘的夹角越大; T_3 越大,说明两条平行边缘在局部具有平行关系的像素点越多。

4 实验结果与分析

为测试本文算法的准确率及效率,选定复杂度不同的高分辨率遥感图像对算法进行测试分析,所有测试图像均来自 Google Earth 截图,影像分辨率范围为 0.61~2.5 m。本文算法设定的测试参数为 $T_1 = 0.35, T_2 = T_3 = 10$ (所有测试图像均采用此参数),测试硬件为 Intel Core2 双核 2.8 GHz, 2 GB

内存的个人计算机,软件编程环境为 Matlab2008。

图 8 列出了一组典型的测试结果。通过图中编码结果可以看出本文提出的边缘方向编码很好地体现了边缘的结构信息,比如弯曲的乡村小路边缘灰度呈渐变分布;而公路上位于同一直线上的边缘点灰度一致,平滑曲线或圆形道路边缘点的灰度则不

同。从图 8(c)所示的平行边缘识别结果来看,本文提出的算法可以很好地识别道路、建筑物和桥梁中的平行边缘,尤其是平行的曲线结构(如乡村道路、圆形道路等),对于道路中平行边缘的误识别率近似为 0,这一结果十分有利于后续特征识别。

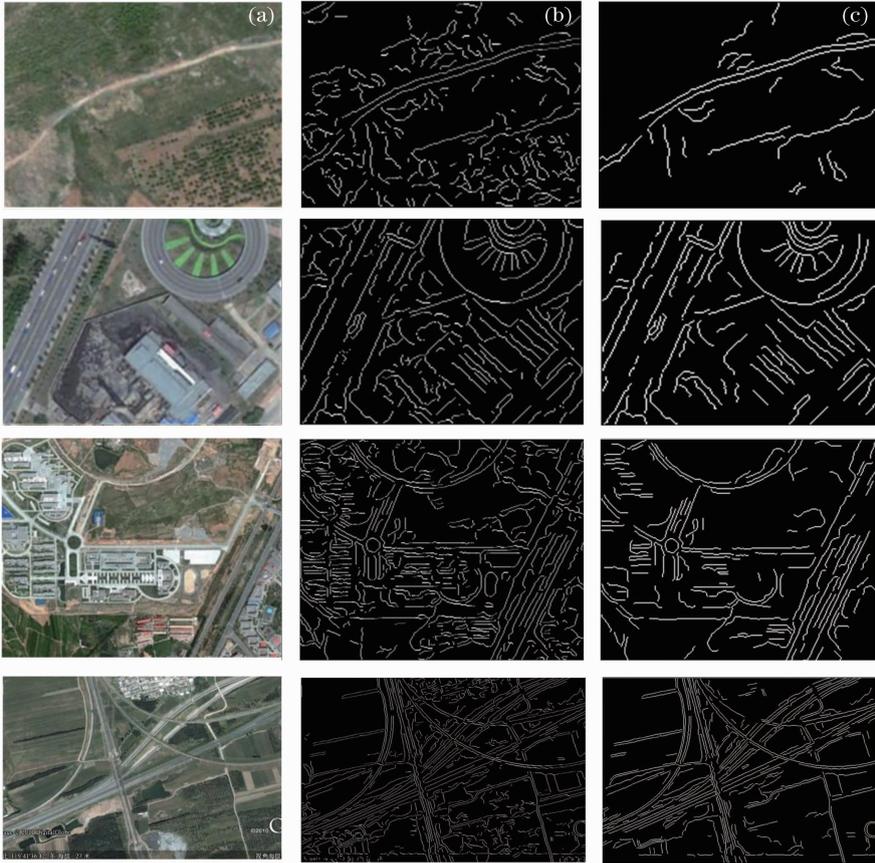


图 8 平行直线或曲线识别结果。(a)源图像;(b)编码图像;(c)平行边缘识别结果

Fig. 8 Results of parallel edge fragments. (a) Source image; (b) coding edges; (c) parallel edges

图 9(a)给出了本文算法的准确率。图 9(b)给出了相同大小(600 pixel×400 pixel)复杂度不同的 466 幅遥感影像平行线识别时间随图像连续边缘数

目的变化情况,从图中可以看出本文算法的计算时间介于 3.0~69.375 s 间,图像中分解后的连续边缘越多(比如含有草地、树木等特征),计算时间越

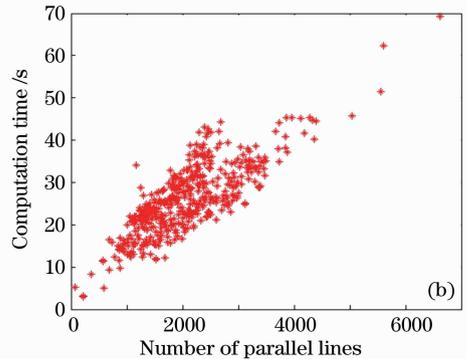
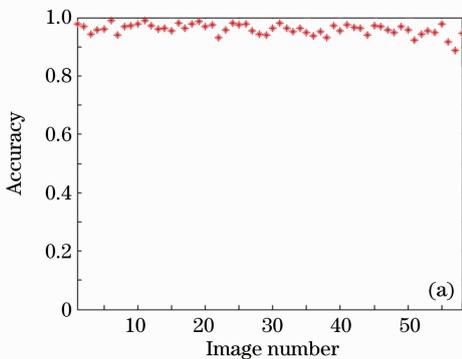


图 9 算法准确率及运行时间。(a)精确度;(b)运行时间

Fig. 9 Accuracy and computation time of the proposed algorithm. (a) Accuracy; (b) computation time

长。算法平均计算时间为 26.1029 s,因此本文提出的算法执行时间略长,计算速度有待进一步提高。

5 结 论

提出了一种同时适用于高分辨率遥感图像中平行直线与平行曲线识别的算法。该方法有效地利用了平行边缘在局部方向上的相似性,对边缘检测图像进行局部直线方向编码,巧妙地将复杂遥感图像拆分成若干个含有方向信息的边缘轮廓,并进一步利用局部方向一致性识别其中的平行边缘。实验结果表明,本文算法具有较高的准确率和稳定性,可以进一步应用于道路网、建筑物和河流等的信息提取。但本文算法耗时略长,今后需要进一步研究。

参 考 文 献

- Shen Huan, Li Shunming, Bo Fangchao *et al.*. On road vehicles real-time detection and tracking using vision based approach[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1076~1083
沈 珏, 李舜韶, 柏方超等. 路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1076~1083
- Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- Zhang Xuguang, Zhang Yun, Wang Yanning *et al.*. Covariance tracking based on forgetting factor and Kalman filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2317~2323
张旭光, 张 云, 王艳宁等. 基于遗忘因子与卡尔曼滤波的协方差跟踪[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2317~2323
- Zhang Libao, Wang Pengfei. Remote sensing image coding based on adaptive directional lifting integer wavelet and optimal threshold[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 225~228
张立保, 王鹏飞. 基于自适应方向提升整数小波与优化阈值的遥感图像编码[J]. *中国激光*, 2010, **37**(S1): 225~228
- Wu Liang, Hu Yunan. A survey of automatic road extraction from remote sensing images[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(7): 912~922
吴 亮, 胡云安. 遥感图像自动道路提取方法综述[J]. *自动化学报*, 2010, **36**(7): 912~922
- Wenyu Wu, Dong Yin, Rong Zhang *et al.*. Bridge recognition of median-resolution SAR images using pun histogram entropy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 572~575
- Wang Cheng, Wang Runsheng. Line extraction for SAR image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(6): 816~820
王 程, 王润生. SAR 图像直线提取[J]. *电子学报*, 2003, **31**(6): 816~820
- M. Ravanbakhsh, C. Heipke, K. Pakzad. Road junction extraction from high resolution aerial images[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, **36**(3): 131~138
- Jia Chengli, Ji Kefeng, Jiang Yongmei *et al.*. Road extraction from high-resolution SAR imagery using Hough transform[C]. *Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005, 25~29
- Q. P. Zhang, I. Couloigner. Comparing different localization approaches of the Radon transform for road centerline extraction from classified satellite imagery [C]. *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, 2006, 138~141
- Zhu Changsheng, Guan Jian, Zhou Wei *et al.*. Parallel feature extraction for SAR images based on edge detector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(9): 44~50
朱昌盛, 关 键, 周 伟等. 基于边缘检测的 SAR 图像平行线特征提取算法[J]. *光电工程*, 2010, **37**(9): 44~50
- Zhu Changqing, Yang Yun, Zou Fang *et al.*. Total rectangle matching approach to road extraction from high resolution remote sensing images [J]. *J. Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2008, **36**(2): 75~77
朱长青, 杨 云, 邹 芳等. 高分辨率影像道路提取的整体矩形匹配方法[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2008, **36**(2): 75~77
- Zhang Daobing, Liu Bo, Wang Hongqi. Parallel active contour model for main road segments extraction from high-resolution remote sensing images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1345~1350
张道兵, 刘 波, 王宏琦. 基于平行活动围道模型的高分辨率遥感影像城区主干道路提取[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1345~1350
- Ding Weili, Wang Wenfeng, Zhang Xuguang *et al.*. Extracting straight lines from building image based on edge orientation image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2904~2910
丁伟利, 王文锋, 张旭光等. 基于边缘方向图的建筑物直线特征提取[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2904~2910
- P. D. Kovesi. Matlab and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing [EB/OL]. <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/>, 2008
- Yun Seok Lee, Han Suh Koo, Chang Sung Jeong. A straight line detection using principal component analysis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27**(14): 1744~1754

栏目编辑:李文喆