

基于总变分和形态学的航空图像道路检测算法

李书晓 常红星

(中国科学院自动化研究所综合信息系统研究中心 北京 100080)

摘 要 高分辨率航空图像中道路通常表现为较狭窄的面,这给分类算法创造了机会.文中提出了一种新的基于分类的航空图像道路自动提取方法——基于总变分和形态学分析方法,它首先根据邻域总变分和直方图得到分割道路所需的合适阈值并从图像中分割出道路区域,然后根据基于区域总变分和几何测度的准则函数及其模式频谱得到形态学普通开运算的阈值,最后用此准则及阈值对图像进行形态学普通开运算以去除和路面具有相似光谱特性的物体的干扰.初步实验证明,该方法具有良好的稳定性和较强的环境适应能力.

关键词 道路检测;总变分;形态学普通开运算;变分几何测度;模式频谱

中图法分类号 TP391

Road Extraction Algorithm for Aerial Images Based on Total Variations and Mathematical Morphology

LI Shu-Xiao CHANG Hong-Xing

(Integrated Information System Research Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Roads in high resolution aerial images appear to be narrow areas and this creates an opportunity for classification based methods. A new approach based on classification to road extraction for aerial images is proposed in this paper. The method is based on total variation and mathematical morphology analysis. This approach firstly classifies the image into road and non-road pixels by appropriate thresholds based on neighbor total variations and histogram analysis, and then uses a criterion based on connected area total variations, geometric attributes and its pattern spectrum to find an appropriate threshold for morphological trivial opening. Finally, morphological trivial opening is adopted to avoid noises including objects that have similar spectral characteristics to road surfaces. Strict experiments show that this algorithm is robust and is capable of coping with partial occlusion and extracting roads with different spectral characteristics in the same image.

Keywords road detection; total variations; morphological trivial opening; variation geometry criterion; pattern spectrum

1 引 言

近年来,国内外学者很重视航空图像中道路提

取方法的研究,并进行了大量的研究工作,提出了许多用于道路检测的有效算法.这些方法从处理策略上可以分为半自动方法和自动方法.半自动方法需要用户交互地提供一些信息来控制道路提取.

Baumgartner 等用轮廓匹配的方法跟踪道路的中心线,并对跟踪结果进行了评估,它提供了一个交互式的图形用户界面来指导数据处理操作^[1]. Poz 和 Agouris 等用动态规划的方法分别从高分辨率和低分辨率的航空图像中提取道路的中心线,这种方法需要提供道路的若干控制点的位置^[2-3]. 半自动方法由于充分利用了用户的交互信息,因此一般来说道路提取的结果更稳定,但对实时性要求较高或人很难参与的场合不能胜任.

这些半自动方法可以通过相应的初始化等操作扩展为自动方法. 自动方法通常首先通过直线和边缘检测得到路段的初始假设,然后在这些路段间建立联系形成路网^[4-5]. 杨文杰等在使用 Sobel 算子得到道路边缘后利用色彩及阴影信息过滤边缘,最后利用 Hough 变换及迭代的方法得到路面边界^[6]. 徐全生等首先利用局部平均值提取背景,然后基于最小二乘法进行直线拟和得到车辆行驶的当前车道^[7]. Steger 等用模糊集的理论先找到道路和图像边界的交点及长段道路的终点等显著点,然后在它们之间找到最优化的路径来填充道路间的小的间隙^[8]. Zhang 等在提取出路面区域后,用形态学普通开运算去除噪声和同路面有相似光谱特性的物体的干扰,其中采用了最小外接椭圆长轴准则^[9]. Bicego 等提出一种基于概率轮廓跟踪的全自动道路提取算法,它首先利用 Hough 变换和一些拓扑学的知识得到路面的起始假设,然后对路面进行轮廓跟踪,最后利用颜色和梯度信息对路面进行合并^[10]. 另外, Radon 变换和 Hough 变换也用来提取道路的中心线并估计图像中道路的宽度^[11-12]. Koutaki 等采用主动轮廓的方法对道路进行检测与跟踪,这种方法利用模板匹配的方法得到道路的交叉点,然后利用交叉点的位置和方向信息对道路进行跟踪^[13]. Liu 等利用各向同性的非线性滤波来提取图像中的线状目标,并把其应用于道路、指纹和舌纹的提取中^[14]. 模型法在道路检测中很受重视. Steger 等较早的道路检测中引入模型,它利用道路在几何、辐射、拓扑和邻域等不同方面的性质建立模型,并利用多分辨率的方法减少建模过程中错误的假设^[15]. Lacoste 等引入 Markov 模型从光学图像和雷达图像中提取道路^[16]. Porikli 利用点高斯模型和迭代的方法实现道路的提取和更新^[17].

以上算法普遍存在着算法复杂度高或环境适应性差的缺陷,本文在道路的自动分割和干扰的自动去除这两个道路检测过程的关键技术中引入了总变

分思想,为算法的后处理提供了可靠的结果,且计算上简单可行. 该方法主要面向分辨率在 $0.2 \sim 2\text{m}$ 的航空灰度图像. 高分辨率航空图像中的道路具有如下 3 个明显的特征: (1) 道路的表面是坚实和光滑的,它们通常由混凝土或沥青铸成,具有相应的光谱特性; (2) 道路的宽度一般是恒定的并有上界和下界; (3) 相邻的道路一般会连接形成路网. 本文的方法利用前两个特征把道路模型化为半径为道路宽度一半的圆盘沿道路中心线的移动所形成的平坦区域,并以此为根据提出了基于总变分和形态学的道路自动检测算法,然后利用第 3 个特征对检测到的路段进行连接. 实验证明,该方法不仅对道路的部分遮挡和背景图像的干扰具有良好的适应能力,而且可以用于检测同一图像中具有不同光谱特性的道路. 本文第 2 节提出了基于邻域总变分的道路分割方法;第 3 节介绍了形态学普通开运算,并提出了其用于道路检测的准则——变分几何准则;之后是实验结果及结论.

2 基于邻域总变分的道路分割

若处理图像为 $u(x, y)$, 则总变分定义为^[18]

$$J_T(u) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{D_u} |\nabla u| dx dy = \int_{D_u} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} dx dy \quad (1)$$

而 $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, $u_y = \frac{\partial u}{\partial y}$, D_u 是图像 u 的支持域.

由于道路一般具有恒定的宽度(w)和均匀的光谱特性,使得图像 u 中路面区域的总变分相对非路面区域要小得多. 利用上述特性,定义如下的邻域总变分:

$$\begin{aligned} J_{LT}(u(x, y)) &\stackrel{\text{def}}{=} \int_{D_{u(x, y)}^r} \sqrt{|\nabla u|^2 + \beta} du dv \\ &= \int_{D_{u(x, y)}^r} \sqrt{u_u^2 + u_v^2 + \beta} du dv \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $D_{u(x, y)}^r$ 为以 $u(x, y)$ 为圆心, 半径为 r 的支持域, $r = w/(2 \times re)$ (re 为图像的分辨率). 支持域的这种选择可以由图 1(a) 来解释, 图中把道路看成是一半径为 r 的圆球沿道路中心线滚动的结果. $\beta > 0$ 是可调参数, 其取值与测量噪声的方差成正比, 它的作用是避免邻域总变分 $J_{LT}(u(x, y))$ 在 $u_x = u_y = 0$ 处倒数不存在, 实际应用中 β 取 $20 \sim 100$. 邻域总变分反映了图像上某一点附近的平滑程度, 其值越小则越平滑.

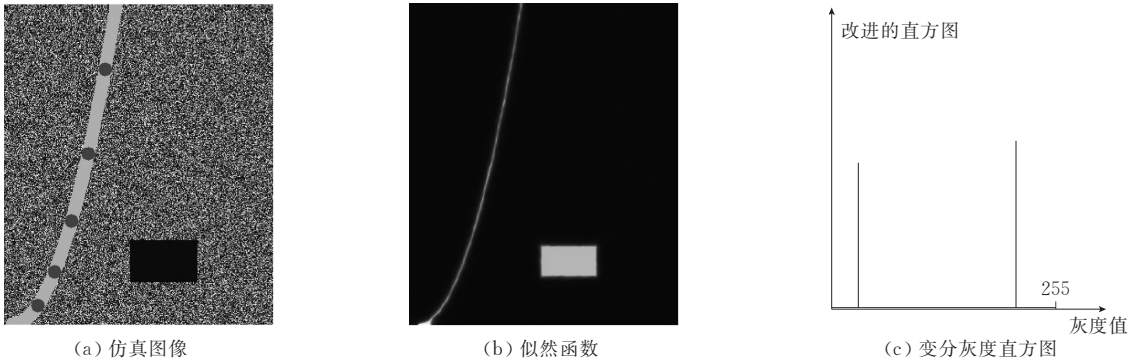


图1 基于邻域总变分的道路分割方法的仿真实验解释

考虑到邻域中不同位置的点可能具有不同的贡献,定义如下的加权邻域总变分:

$$J_{LT1}(\mathbf{u}(x, y)) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{D_{\mathbf{u}}^r(x, y)} \lambda(u, v) \sqrt{u_u^2 + u_v^2} + \beta \, dudv \quad (3)$$

其中, $\lambda(x, y)$ 为对应点的权值, 当 $\lambda(x, y) \equiv 1$ 时为普通的邻域总变分. 同邻域总变分一样, 加权邻域总变分也反映了图像上某一点附近的平滑程度, 其值越小则越平滑.

由于道路的表面通常比较光滑, 根据加权邻域总变分可以定义如下的似然函数, 它表示了图像中的每一点和道路中心线上的点的相似程度:

$$LS(\mathbf{u}(x, y)) = \frac{\int_{D_{\mathbf{u}}^r(x, y)} \lambda(u, v) \, dudv}{J_{LT1}(\mathbf{u}(x, y))} \quad (4)$$

$LS(\mathbf{u}(x, y))$ 越大, 表明 $\mathbf{u}(x, y)$ 位于道路中心线上的可能就越大, 如图 1(b) 所示 ($r=8$). 另外 r 的选取并不要求很精确, r 偏大得到的结果还是道路的中线, 只不过似然函数的最大值要小一些; r 偏小将会检测出具有一定宽度的道路中心线带, 这并不影响算法的后处理及适应性; 考虑到计算效率, 应用中一般取 3~6 即可. 在计算得到似然函数后, 需要对其进行规格化至 $[0, 255]$ 之间.

由于矩形邻域内的平均计算可以由积分图像快速求得, 故实际中计算邻域总变分时常以矩形邻域近似代替圆形邻域. 对加权邻域总变分通常采用 Epanechnikov 模板^[19], 因为该模板可以表示为两个均匀矩形模板的卷积的形式, 进而利用积分图像求解. 另外, 式(2)、式(3)中的变分值和式(4)中的似然函数的可能取值有限, 实际计算中事先计算这些可能的取值并存储, 最终的似然函数获取只涉及到积分图像计算和查找操作快速实现, 效率很高.

既然规格化似然函数 $LS(\mathbf{u}(x, y))$ 表示了像素

点 $\mathbf{u}(x, y)$ 是路面点的程度, 通过选择合适的阈值 T 对其进行二值化:

$$LSB(\mathbf{u}(x, y)) = \begin{cases} 1, & LS(\mathbf{u}(x, y)) > T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

对 $LSB(\mathbf{u}(x, y))$ 为 1 的像素点进行灰度直方图分析, 并结合道路本身比阴影及树木等背景亮的特点即可得到分割道路所需的合适的阈值, 如图 1(c) 所示, 并称其为变分灰度直方图. 考虑到道路边缘的似然函数值只有道路中心的似然函数值的一半左右及可能存在比路面更平滑的干扰的存在, 实际应用中 T 的取值比规格化似然函数的最大值的一半要小, 在 60~120 之间.

3 形态学普通开运算和变分几何准则

数学形态学是一门建立在严格的数学理论基础上的科学, 它利用集合论的方法对物体的几何结构进行分析和处理. 形态学的基本操作有腐蚀、膨胀、开运算、闭运算、击中击不中变换等, 具体请参考相关文献^[20].

3.1 形态学普通开运算

普通开运算 (Trivial Opening, TO) 由 Serra 和 Vincent 定义^[21]. 令 $\{\mathbf{u}(n) | n=1, 2, 3, \dots, N\}$ 为图像 \mathbf{u} 的各个连通区域, 则具有准则 T_{TO} 的普通开运算定义为

$$TO(\mathbf{u}(i)) = \begin{cases} \mathbf{u}(i), & \text{若 } \mathbf{u}(i) \text{ 满足准则 } T_{TO} \\ \emptyset, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

这种运算具有递增性、反扩张性和幂等性, 因此为形态学开运算. 在图像处理中, 这个运算用准则 T_{TO} 滤除图像 \mathbf{u} 中不满足此准则的连通区域^[21].

区域连通基于膨胀算法来实现. 假设找到了区域 $\mathbf{u}(n)$ 的种子区域 \mathbf{u}_n^0 (通常为一个像素), 则区域 $\mathbf{u}(n)$ 可以由区域 \mathbf{u}_n^k 膨胀到稳定状态得到, 表示

如下：

$$\mathbf{u}(n) = \bigcup_{\delta_n^k \neq \emptyset} \delta_n^k \tag{7}$$

$$\mathbf{u}_n^k = \mathbf{u}_n^{k-1} \cup \delta_n^k \tag{8}$$

$$\delta_n^k = ((\delta_n^{k-1} \oplus H) - \mathbf{u}_n^{k-1}) \cap \mathbf{u}, \delta_n^0 = \mathbf{u}_n^0 \tag{9}$$

上述公式中 H 为单位尺寸的标准膨胀算子. 这种算法对每个像素最多进行一次 4 邻域运算,效率很高.

3.2 变分几何准则

同邻域总变分一样,定义如下的区域总变分似然函数：

$$LTO(\mathbf{u}(n)) = \int_{D_{\mathbf{u}(n)}} LS(\mathbf{u}(x,y)) \mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{10}$$

其中, $D_{\mathbf{u}(n)}$ 为区域 $\mathbf{u}(n)$ 的支持域, $LTO(\mathbf{u}(n))$ 表示了区域 $\mathbf{u}(n)$ 在区域特性方面和路面的相似程度.

道路的几何特性可以通过图 2 来近似刻画. 设区域 $\mathbf{u}(n)$ 的外接正矩形的边长分别为 L_1 和 L_2 , 区域 $\mathbf{u}(n)$ 的大小为 $N(\mathbf{u}(n))$, 则狭长区域 $\mathbf{u}(n)$ 的长近似为 $\sqrt{L_1^2 + L_2^2}$, 宽近似为 $N(\mathbf{u}(n)) / \sqrt{L_1^2 + L_2^2}$, 因此道路的几何特性可以用如下的近似长宽比 (Length to Width Ratio, LWR) 来近似：

$$LWR(\mathbf{u}(n)) = \frac{L_1^2 + L_2^2}{N(\mathbf{u}(n))} \tag{11}$$

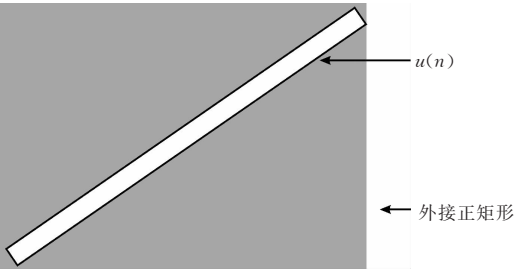
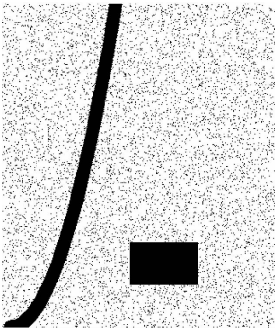
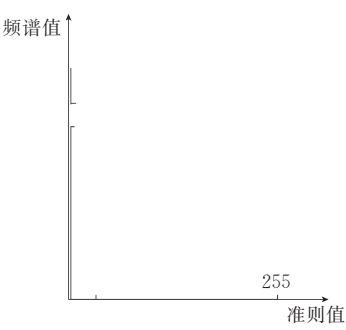


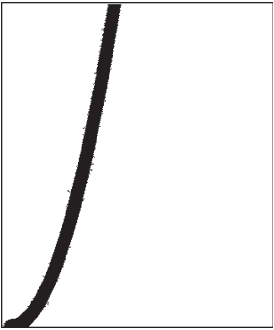
图 2 道路的几何特征描述



(a) 阈值分割结果



(b) 变分几何模式频谱



(c) 形态学普通开运算结果

图 3 形态学普通开运算及变分几何准则的仿真实验解释

4 实验结果

本文采用加拿大某城区经过校正后的图像来验

在正方形情况下, LWR 取值为 2, 故定义如下的准则函数进行形态学的普通开运算：

$$T_{TO}(\mathbf{u}(n)) = LTO(\mathbf{u}(n)) \cdot [LWR(\mathbf{u}(n)) - 2] \tag{12}$$

式(12)近似描述了区域 $\mathbf{u}(n)$ 的区域特性和几何特性, 称为变分几何准则. 虽然其表达不是唯一的, 但它确实给出了区域 $\mathbf{u}(n)$ 和道路相似程度的一种描述, 且在计算上简单可行.

对得到的 $T_{TO}\mathbf{u}(n)$ 进行规格化处理 (不失一般性, 设为 $0 \sim 255$), 并把其等分为 K 个间隔: $0 = T_0 < T_1 < \dots < T_K = 255$. 统计出落入每个间隔的物体的个数便可得到图像 \mathbf{u} 的变分几何模式频谱：

$$\begin{aligned} dT_{TO}(k) &= N(\{i | k \leq T_{TO}(\mathbf{u}(i)) < k + 1\}), \\ k &= 0, 1, \dots, K - 1 \end{aligned} \tag{13}$$

式中, N 表示求集合中元素的个数, 模式频谱由密集变为稀疏的值即为基于变分几何准则的形态学普通开运算的阈值.

图 3 显示了用变分几何准则进行形态学普通开运算的一般过程. 图 3(a) 是基于邻域总变分的道路分割结果, 实验中采用了两个不同的阈值 (如图 1(c)), 使得本算法可以应用于同一幅图像中存在具有不同光谱特性的道路 (如沥青路 and 水泥路) 的情况. 图 3(b) 为计算得到的变分几何模式频谱, 图中横坐标轴表示连通域的准则函数值, 纵坐标轴表示取此准则值的物体的个数. 为了便于显示, $T_{TO}\mathbf{u}(n) = 0$ 的模式频谱进行了缩放显示. 由图可见, $35 \leq T_{TO}\mathbf{u}(n) \leq 250$ 的任何值都可以作为形态学普通开运算变分几何准则的阈值. 图 3(c) 是用上述准则及阈值进行形态学普通开运算后所得的结果.

证上述算法的有效性. 图像的分辨率为 $1\mathrm{m}$, 大小为 320×380 , 图像中的道路相互连接形成路网, 如图 4 所示. 图中房屋的顶部和道路具有相似的光谱特性, 道路两旁的树木遮挡或部分遮挡了路面. 道路检测

的主要流程如图 5 所示.



图 4 加拿大某城区原始图像

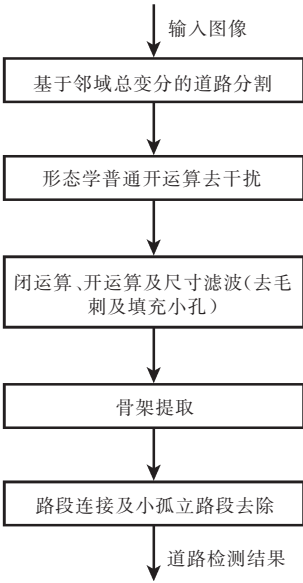


图 5 道路检测主要流程

在基于邻域总变分的道路自动分割算法中,取参数 $\beta=50, T=80$. 图 6(a)显示了 $r=4$ 时的变分灰度直方图,在道路灰度特征附近呈现明显的单峰分布,分割结果为 219 并选择道路的灰度范围为 196~242. 图 6(b)显示了实验图像的灰度直方图,很难从图中得到可靠的路面灰度特征. 图 6(c)显示了 $r=6$ 时的变分灰度直方图,在道路灰度特征值附近仍然呈现明显的单峰分布,这说明本文提出的道路自动分割方法具有良好的稳定性. 图 6(d)显示了用上述阈值对实验图像进行阈值分割后的结果. 由图可见,原本连通的道路由于树木的完全遮挡被分成了 4 段,部分路段由于树木或房屋的部分遮挡路面变窄,路旁的屋顶大都显示出了虚假的轮廓,这些都对分割后的处理工作提出了较高的要求.

在完成道路分割后,需要应用形态学普通开运算去除图像中和路面具有相似光谱特性的干扰区域. 普通开运算应用了本文提出的变分几何准则. 图 7(a)显

示了在计算出每个区域的变分几何准则值后所得到的变分几何模式频谱. 实际运算中,通常把变分几何模式频谱由密集变为稀疏的值,作为基于变分几何准则的形态学普通开运算的阈值. 由图可见,准则值较大的 4 个区域呈现较稀疏的分布,而其它区域的准则值较小且很集中,故 $10 \leq T_{TO} u(n) \leq 20$ 的任何值都可以作为形态学普通开运算的阈值. 图 7(b)是用上述准则及阈值进行形态学普通开运算后的结果. 由图可见,该运算很好地去除了房屋等和路面具有相似光谱特性的干扰的影响.

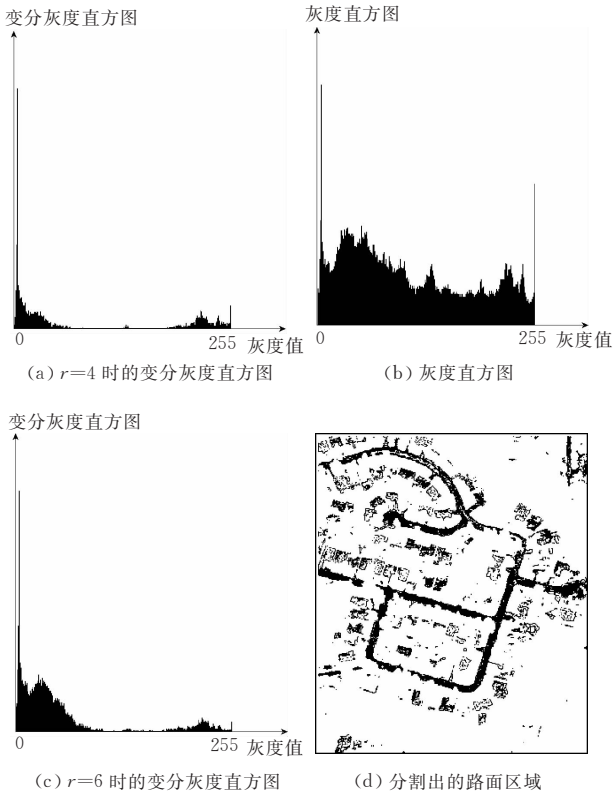


图 6 道路检测结果

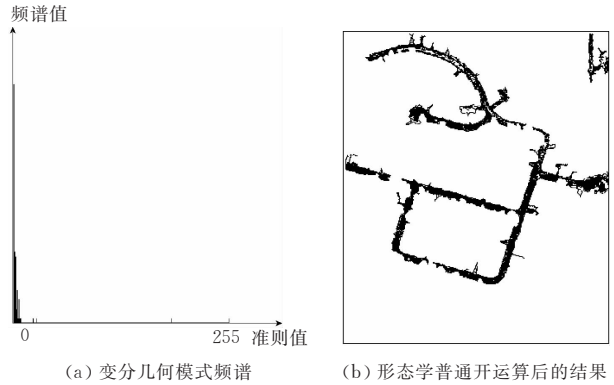


图 7 去除噪声后的结果

4.1 对比实验

为了验证算法的性能,我们将本文的方法与自

适应滤波^[7]和各向同性非线性滤波^[14]两种基于区域的方法进行了比较. 由于航空图像中的道路较其它区域亮,故只提取比周围区域亮的特征. 自适应滤波的区域大小选择为 81×81 ,采用积分图像的方法快速计算,分割结果含有较多的干扰噪声,如图 8(a)所示. 图 8(b)显示了文献[14]的方法的分割结果,虽然该方法在较简单的环境或细线条的检测中取得了较好的效果^[14],但不适用于复杂的中高分辨率的道路检测的情况. 对比图 6(d)可知,本文的算法比自适应滤波和各向同性非线性滤波具有较强的环境适应性.

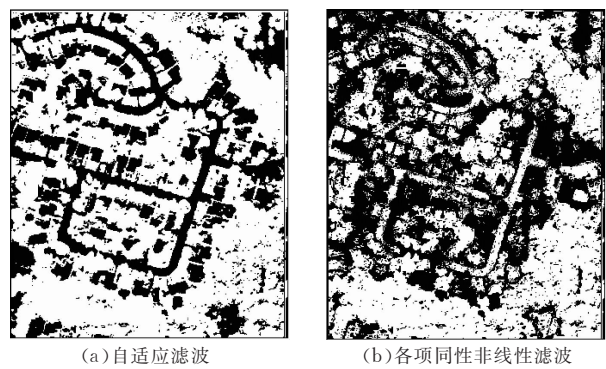


图 8 对比实验

表 1 显示了 3 种算法在 PIV 2400 下的算法耗时,虽然自适应滤波比本文的算法快 2ms,但其大量噪声带来的后续处理的复杂度远远超出了其在分割效率方面的优势,而各向同性非线性滤波的方法无论是效率还是效果都不如本文的算法. 本文的算法在计算效率和计算复杂度之间取得了较好的平衡,在保证检测效果的前提下完全可以满足实时监控系统的需要.

表 1 不同算法道路分割时间性能比较	
	算法耗时/ms
本文算法	8
自适应滤波	6
文献[14]的方法	330

4.2 后处理

得到道路的初始区域后需要填充道路的间隙,去掉道路的毛刺,并对道路进行平滑和骨架提取. 图 9(a)显示了经过开运算及闭运算后的结果,处理后去掉了部分毛刺. 图 9(b)显示了用尺寸滤波器去除小的区域再经闭运算后的结果. 图 9(c)显示了对得到的路面区域进行骨架提取后的结果.

由于相邻的道路一般会相互连接形成路网,故还需对提取后的骨架进行连接. 本文采用一种相对简单的连接方式,对小于一定距离的不同路段上的

端点用直线段连接. 实验中采用逐步连接的方法,即先对间隔较小的不同路段的端点进行连接,逐步加大间隔距离后对间隔较远的路段进行连接. 实验中设定间隔的最大值为 40,以处理由于树木的遮挡等因素造成的道路中断. 图 9(d)显示了路段连接后的结果. 图中的缺口是由于其两边端点属于同一个路段(结论部分给出了可能的解决方案),除此之外连接的结果相当满意. 图 9(e)显示了用尺寸滤波器去除路网以外的小路段后的结果. 从原图像可见,这条被去掉的路段属于路网的一部分,但由于视角的影响被遮挡了近 100 像素,实际中可以通过调整相机的拍摄角度来对这样的路段作进一步的分析. 图 9(f)是将检测到的道路中心线叠放到原图像上的结果.

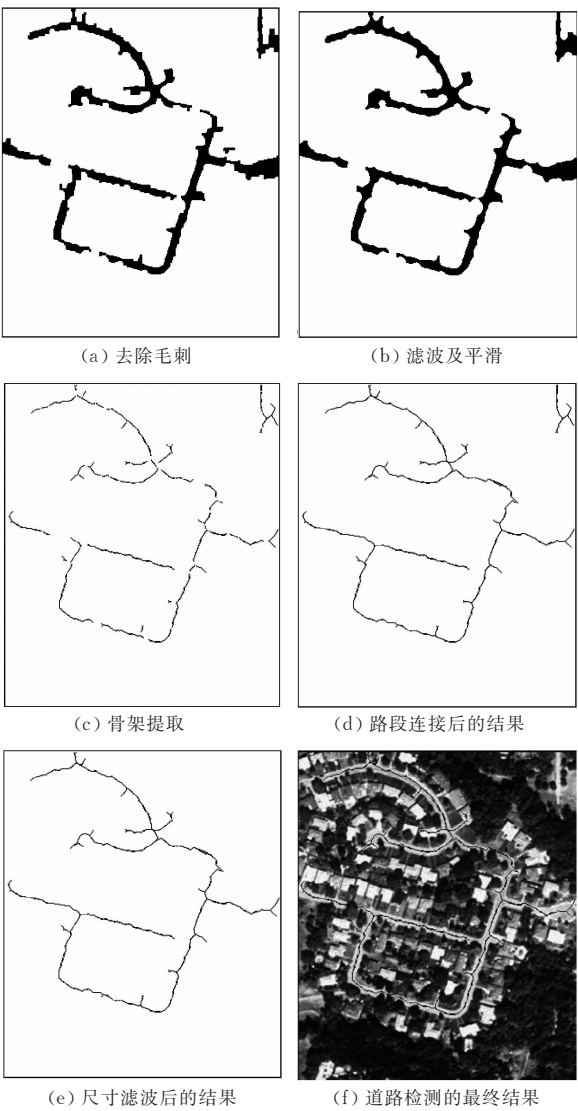


图 9 后处理结果

图 10(a)显示了用本文的方法处理的另一幅高分辨率航空图像. 该图像的分辨率约为 0.3m. 除参

数设定 $r=6$ 外,实验中的其它参数及步骤均无改变.图 10(b)显示了路面提取的最终结果,图 10(c)显示了把检测到的道路中心线叠加到原图像后的最终结果.图中右下角中心线的扭曲是由于图像骨架提取过程中边缘效应的影响,而非道路检测错误.

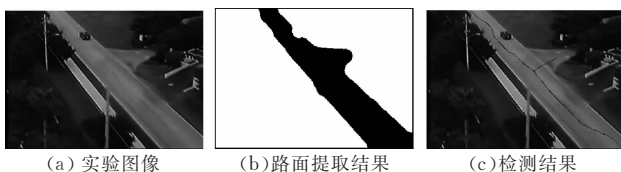


图 10 另一幅实验图像的道路检测结果

5 结 论

当图像空间分辨率为 $0.2\sim 2\text{m}$ 时,道路通常表现为较狭窄的面.本文提出了基于总变分和形态学普通开运算的道路检测算法来处理高分辨率的航空图像.特别是其中的基于邻域总变分的似然函数、变分灰度直方图、基于区域总变分似然函数及长宽比的变分几何准则和变分几何模式频谱等概念和算法是作者首先提出并应用于航空图像的道路自动提取算法.这些算法基于道路的平滑性和恒定宽度假设,通常符合应用现实.基于邻域总变分的似然函数和变分灰度直方图主要用来确定道路分割所需的合适的阈值,基于区域总变分及长宽比的变分几何准则及其模式频谱主要为形态学普通开运算提供合适的准则及其对应的阈值.初步实验证明,这种方法为道路检测算法的后续处理提供了有用和可靠的信息.

本文提出的算法计算效率相当高.实验中的图像大小为 320×380 ,在 PIV 2400 和 VC++ 情况下,每秒可以完成 40 幅以上图像的路面检测及干扰去除工作,如果考虑到程序的进一步优化、某些计算步骤的可能近似和跟踪过程对前一帧分割结果的有效利用,完全可以达到单板机下运行的道路检测与跟踪系统的实时性的要求.

另外,该算法具有良好的稳定性和较强的环境适应能力.它可以解决道路上大部分树木的遮挡或部分遮挡问题,而且可以检测同一幅图像中具有不同光谱特性的道路,但对通过较宽的路径和路网连接的屋顶仍有困难.这种情况下很难在保持路网不变的情况下移去这些较宽的路径,这有可能通过轮廓跟踪的方法去除检测到的道路中心线中的较短的分支来解决,去掉小分支后也可以对本文处理后的图像中的残余缺口按照最近邻原则进行连接.该方

法也很容易推广到检测其它具有显著的区域特性或几何特征的物体,如敏感图像检测等.

总之,邻域总变分、变分灰度直方图、区域总变分似然函数和变分几何模式频谱等新概念和形态学普通开运算的结合,很好地解决了高分辨率航空图像中的道路检测问题.这种方法和其它技术或信息(如轮廓跟踪、颜色信息等)的结合将会提供更可靠和精确的道路检测结果.

参 考 文 献

- [1] Baumgartner A, Hinz S, Wiedemann C. Efficient methods and interfaces for road tracking. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 34(3B): 28-32
- [2] Poz A, Vale G. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium and high resolution images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2003, 34(8): 87-91
- [3] Agouris P, Gyftakis S, Stefanidis A. Dynamic node distribution in adaptive snakes for road extraction//*Proceedings of the Vision Interface*. Ottawa, Canada, 2001: 134-140
- [4] Gautama S, Goeman W. Robust detection of road junctions in VHR images using an improved ridge detector//*Proceedings of the ISPRS XXth Congress*. Istanbul, 2004: 1682-1777
- [5] Barsi A, Heipke C. Artificial neural networks for the detection of road junctions in aerial images//*Proceedings of the ISPRS Joint Workshop on Photogrammetric Image Analysis*. Munich, 2003: 113-118
- [6] Yang Wen-Jie, Hu Ming-Hao, Yang Jing-Yu. A fast edge based unstructured road detection algorithm. *Computer Science*, 2006, 33(5): 257-260(in Chinese)
(杨文杰,胡明昊,杨静宇.一种快速的基于边缘的道路检测算法. *计算机科学*, 2006, 33(5): 257-260)
- [7] Xu Quan-Sheng, Yu Miao, Zhou Hai-Hua. Method of realizing road detection in advanced vehicle control system. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2006, 28(2): 150-153(in Chinese)
(徐全生,于淼,周海华.高级车辆控制系统中道路检测的实现方法. *沈阳工业大学学报*, 2006, 28(2): 150-153)
- [8] Steger C, Mayer H, Radig B. The role of grouping for road extraction//*Proceedings of the Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Image*. Basel, Switzerland, 1997: 245-256
- [9] Zhang C, Murai S, Baltsavias E. Road network detection by mathematical morphology//*Proceedings of the ISPRS Workshop "3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements"*. Paris, France, 1999: 185-200

- [10] Bicego M, Dalchini S, Vernazza G, Murino V. Automatic road extraction from aerial images by probabilistic contour tracking//Proceedings of the International Conference on Image Processing. Barcelona, Spain, 2003: 585-588
- [11] Aggarwal N, Karl W C. Line detection in images through regularized Hough transform. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(3): 582-591
- [12] Zhang Q P, Couloigner I. Accurate centerline detection and line width estimation of thick lines using the Radon transform. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 310-316
- [13] Koutaki G, Uchimura K. Automatic road extraction based on cross detection in suburb//Proceedings of the SPIE, Electronic Imaging. California, USA, 2004: 337-344
- [14] Liu L, Zhang D, You J. Detecting wide lines using isotropic nonlinear filtering. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(6): 1584-1595
- [15] Steger C, Glock C, Eckstein W, Mayer H, Radig B. Model-based road extraction from images//Proceedings of the Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Image. Basel, Switzerland, 1995: 275-284
- [16] Lacoste C, Descombes X, Zerubia J. Road network extraction in remote sensing by a Markov object process//Proceedings of the International Conference on Image Processing. Barcelona, Spain, 2003: 1017-1020
- [17] Porikli F. Road extraction by point-wise Gaussian models. The International Society for Optical Engineering, 2003, 5093: 758-764
- [18] Zou Mou-Yan. Deconvolution and Signal Retrieval. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 2001(in Chinese)
(邹谋炎. 反卷积和信号复原. 北京: 国防工业出版社, 2001)
- [19] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-577
- [20] Ruan Qiu-Qi. Digital Image Processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001(in Chinese)
(阮秋琦. 数字图像处理学. 北京: 电子工业出版社, 2001)
- [21] Serra J, Vincent L. An overview of morphological filtering. International Archives of Circuits Systems Signal Process, 1992, 2(1): 47-108



LI Shu-Xiao, born in 1981, Ph. D. candidate. His main research interests include digital image processing and analysis, computer vision, object detection and tracking, etc.

CHANG Hong-Xing, born in 1965, professor. His research interests include object recognition, computer vision, etc.

Background

The problem in object detection with moving camera has been far beyond resolved because of the complexity of itself. There has been no object detection system which has the high adaptability that could fit for the general situation in this case till now. We usually have to solve these problems according to different specific problems. Pilotless aircrafts that have their own vision can have extensive potential applications such as traffic surveillance from aircraft videos, frontier patrolling and emergency managing and so on. And this stimu-

lates the work in this paper.

The main technologies on computer vision involved in this project are road detection and tracking, vehicle detection and tracking, man-made object recognition, singularity detection and vision matching etc. The authors and other members in this project have made a great deal of work on object tracking, man-made object recognition and vision matching. This paper mainly focuses on the research of the road detection techniques for high resolution aerial images.