

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)12-1755-07

论文索引信息: 牛照东, 刘洋, 陈曾平. 利用自适应相位分区和边缘位置约束的直线提取新方法 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(12): 1755-1761

利用自适应相位分区和边缘位置约束的 直线提取新方法

牛照东, 刘洋, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 由于利用边缘的梯度相位和位置提取直线容易受到噪声干扰, 从而导致直线断裂。为了增强直线提取算法的抗噪性能, 首先通过定量分析直线边缘梯度相位和位置分布的统计特性, 建立了边缘连接的自适应相位分区和位置约束准则; 然后基于两类新准则, 提出了一种直线提取新方法。该方法首先采用 Canny 算子检测边缘; 然后初步连接短直线, 并估计边缘连接的约束准则参数; 最后通过“相位准则连接”与“位置准则连接”模式并行交互执行来提取直线。实验结果表明, 该方法提取的直线完整、断裂少、准确度高。

关键词: 直线提取; 自适应相位分区; 统计推断理论; 边缘位置约束

Line extraction using adaptive phase partitioning and edge location constraint

NIU Zhaodong, LIU Yang, CHEN Zengping

(National Key Laboratory of ATR, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract: When line edges are linked with gradient phase and location information, linking result is easily affected by noise, which produces broken line segments. To improve the robustness of line extraction to noise, adaptive phase partitioning principle and location constraint principle for edge linking are proposed through analyzing the statistical characteristic of gradient phase and location of line edge. Based on above principles, a novel line extraction method is proposed. Firstly, the Canny method is used to detect edges. Secondly, short lines are extracted and used to estimate parameters for line linking. Finally, line edges are linked using “phase principle” and “position principle” alternatively. Experimental results show that the proposed method extracts lines completely and precisely.

Keywords: line extraction; adaptive phase partitioning; statistical inference theory; edge location constraint

0 引言

由于直线是一种基础而重要的中层描述符号, 能够用于准确描述机场^[1]、建筑^[2]和道路^[3-4]等人造物体的形状, 被广泛应用于目标的提取与识别^[1-2]、视觉导航^[3-4]等任务, 因而直线提取一直是计算机视觉领域的研究热点, 多年来学者们提出了

众多直线提取方法, 基于边缘约束连接的方法便是其中最主要的一种。

边缘约束连接类方法大致可分为以下两类: 第1类方法采用固定分区方式对边缘相位进行编组, 并利用编组信息提取直线, 例如 Kang 等人先通过连接编组相同的边缘形成直线支持区, 然后通过拟合支持区提取直线^[3]。由于相位分区量化误差和噪声的干扰, 该方法存在直线边缘编组不一致问题, 因

收稿日期: 2009-06-04; 改回日期: 2009-09-09

第一作者简介: 牛照东(1982—), 男, 国防科技大学讲师。主要研究方向为图像处理与理解、自动目标识别与跟踪。E-mail: nudtnzd@tom.com。

此难以完整提取直线。Venkateswar 等人建立了一种启发式的相位编组连接模板^[5],用于描述直线边缘之间可能的连接关系,它是通过依次连接满足模板约束条件的边缘来提取直线,由于模板很难涵盖所有的边缘连接情况,因此直线断裂依然存在。Lee 等人利用似然比判决准则对相位编组进行校正,先消除噪声干扰,然后通过连接编组相同的边缘形成直线^[6]。可是该方法仍然无法解决由相位分区量化误差引起的直线边缘编组不一致的问题。第 2 类方法主要依据边缘共线位置关系来提取直线,Yuan 等人通过先建立链码路径区域以及链码位置上下边界,然后依次连接位于边界所限定区域内的边缘来形成直线^[7]。尚振宏等人利用直线 Freeman 编码准则,首先提取线段子元,然后将其合并为线段元,最后计算线段元与直线间的夹角,并判断线段元是否属于直线^[8]。由于 Yuan 和尚振宏提出的方法均未考虑噪声对边缘定位的影响,故提取的直线质量较差。

针对边缘约束连接类方法的不足,本文首先分析了噪声干扰的边缘梯度相位的统计特性,同时利用统计推断理论建立了自适应相位分区准则,从而解决了固定相位分区存在的直线边缘编组不一致的问题;然后讨论了噪声和图像数字化对边缘定位的影响,并建立了边缘位置约束准则,用于连接直线。以此为基础,提出了一种直线提取新方法,综合应用两类准则来稳健连接直线。实验结果表明,本文方法提取的直线准确完整、断裂少、鲁棒性强。

1 问题描述

直线通常由共线的 2 维阶跃边缘(以下简称边缘)构成,它的数学表示形式是^[9-10]

$$f_n(x,y) = f(x,y) + n(x,y) = g + c \times U(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) + n(x,y) \quad (1)$$

式中, $f(x,y)$ 和 $f_n(x,y)$ 分别是无噪和噪声干扰的直线模型, x 和 y 是图像的纵横坐标, g 是背景灰度, c 是边缘对比度, $U(\cdot)$ 是阶跃函数, ρ 和 θ 分别是直线的距离和角度参数,同时 θ 也是直线边缘的梯度相位。 $n(x,y)$ 为平稳正态白噪声,方差为 σ_n^2 。直线提取通常包括边缘检测和连接两个步骤。

众多的边缘检测方法中,Canny 方法^[9]具有检测性能好、定位准确和单边缘响应等优点,已广泛应用于计算机视觉领域。Canny 推导证明的最佳图像

梯度算子近似为高斯函数的一阶微分,采用该算子计算梯度后,即可利用非极大抑制和“磁滞”阈值技术检测边缘。此时,梯度相位 $\omega(x,y)$ 的计算式为

$$\omega(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{(\partial G(x,y)/\partial y) * f_n(x,y)}{(\partial G(x,y)/\partial x) * f_n(x,y)} \right] \quad (2)$$

式中, $G(x,y) = \exp\{- (x^2 + y^2)/2\tau^2\} / 2\pi\tau^2$ 为高斯平滑模板, τ 是尺度因子。

由于边缘检测提供了边缘的位置与梯度相位,因而直线提取的本质就是如何利用上述信息稳健地连接共线边缘。为此,本文将讨论边缘梯度相位和位置分布的统计特性,并建立相应的直线连接准则。

2 直线边缘连接准则

2.1 自适应相位分区准则

2.1.1 固定相位分区的缺陷

同一直线的边缘通常具有相近的梯度相位,基于此,文献[3,5-6]采用固定分区方式对梯度相位进行编组,并以编组是否相同作为判断边缘共线的依据。图 1 给出了一种常见的相位固定分区方式,在该模式下,真实梯度相位为 θ 的边缘应该编组为 2,但由于噪声的干扰,致使式(2)计算的 ω 取值以一定的概率在 $[\theta_1, \theta_2]$ 内波动,相应地,边缘编组在 1 和 2 之间跳动,本文称之为直线边缘编组的不一致问题,这导致提取的直线容易发生断裂,特别当 θ 趋于相位分区的边界或者噪声方差较大时,直线断裂更加严重。

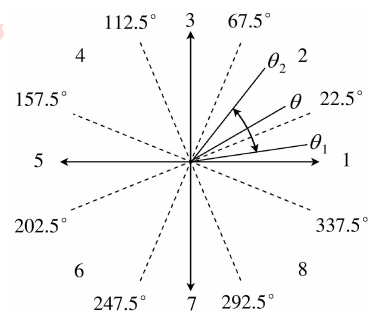


图 1 固定相位分区示意图

Fig. 1 Fixed phase partitioning

2.1.2 直线边缘梯度相位统计特性

命题 1 受噪声干扰的直线边缘梯度相位近似服从均值是 θ ,方差是 $\sigma_n^2/(4c^2\tau^2)$ 的正态分布,并近似为真实梯度相位的无偏估计。

证明 将式(1)代入式(2)即可得到

$$\omega(x,y) = \tan^{-1} \left[\left(\frac{\partial G(x,y)}{\partial y} * f(x,y) + \frac{\partial G(x,y)}{\partial y} * n(x,y) \right) + \left(\frac{\partial G(x,y)}{\partial x} * f(x,y) + \frac{\partial G(x,y)}{\partial x} * n(x,y) \right) \right] \quad (3)$$

令 $h(a,b) = \tan^{-1}(a/b)$, 将式(3)在 $\theta = h(\partial G(x,y)/\partial y * f(x,y), \partial G(x,y)/\partial x * f(x,y))$ 处进行泰勒展开,并忽略二阶和高阶项,即得到

$$\omega(x,y) \approx \theta - \frac{\sqrt{2\pi}}{c\tau} [(y\cos\theta - x\sin\theta)G(x,y)] * n(x,y) \quad (4)$$

当直线信噪比(SNR)较高时,由于噪声能量相对较弱,同时高斯模板也能够进一步平滑抑制噪声,因此上述近似具有较高的准确度。

式(4)中的随机项部分是噪声 $n(x,y)$ 在系统 $-\sqrt{2\pi}[(y\cos\theta - x\sin\theta)G(x,y)]/(c\tau)$ 作用下的输出,由正态随机信号通过线性系统的输出信号的分布规律^[11]可知,噪声干扰的梯度相位近似服从正态分布,容易证明,其均值为 θ , 方差为 $\sigma_n^2/(4c^2\tau^2)$, 是真实梯度相位的无偏估计。

证毕

2.1.3 相位自适应分区准则

基于梯度相位的统计特性,本文应用统计推断理论来实现相位自适应分区,即首先对直线连接遇到的边缘点 p 提出假设,原假设 H_0 : 点 p 属于当前直线,备选假设 H_1 : 点 p 不属于当前直线;然后构造检验统计量 $u = 2c\tau(\omega - \theta)/\sigma_n$, H_0 假设下,由直线边缘梯度相位的统计特性即可推断 u 服从标准正态分布;最后确定相位的自适应分区。当显著性水平为 α 时, H_0 假设成立的接受域为 $V = \{|u| \leq u_{1-\alpha/2}\}$, 其中 $u_{1-\alpha/2}$ 是标准正态分布的分位数。相应地,同一直线上边缘梯度相位自适应分区应为

$$\omega \in \left[\theta + u_{\alpha/2} \frac{\sigma_n}{2c\tau}, \theta + u_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_n}{2c\tau} \right] \quad (5)$$

相位分区示意图如图 2 所示。当边缘点 p 的梯度相位值在分区之内时,则判定其属于当前直线;否则判定不属于当前直线。 α 通常取值为 0.05。

2.2 边缘位置约束准则

本文先建立边缘位置约束准则,然后依据边缘定位误差连接直线。边缘定位误差的定义如下(如图 3 所示):

定义 1 直线 L 上边缘点 p 的检测位置到直线的距离称为边缘的定位误差 ε 。

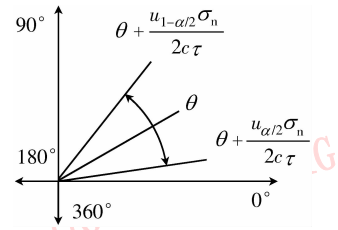


图 2 自适应相位分区示意图
Fig. 2 Adaptive phase partitioning

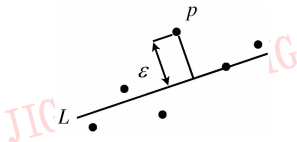


图 3 定位误差示意图
Fig. 3 Edge localization error

Kakarala 等人分析了 Canny 算子的边缘定位性能,并计算了正态白噪声干扰下边缘定位误差的统计特性^[12], $E(\varepsilon) \approx 0, D(\varepsilon) \approx 2.2 \cdot \sigma_n^2 \sqrt{\pi\tau}/(c^2S)$, S 为高斯模板尺寸;另一方面,由图像数字化引起的边缘定位的最大误差是 $\sqrt{2}/2$ 。综合考虑噪声和图像数字化效应,边缘定位误差 ε 的经验阈值设定为

$$T = \mu_1 \sqrt{D(\varepsilon)} + \mu_2 \sqrt{2}/2 \quad (6)$$

式中,第 1 和第 2 项分别对应噪声和由数字化引起的边缘定位误差。直线连接时,当边缘到直线的位置偏差小于 T 时,则判定其属于当前直线;否则不属于当前直线。通常当 $\mu_1 = 1.96, \mu_2 = 1$ 时,大量仿真和实测数据均能取得良好的处理效果。

2.3 两类准则的属性差异

自适应相位分区和边缘位置约束准则在鲁棒性和计算复杂度方面互有优劣。在鲁棒性方面, Kim 等人定性地指出了直线边缘梯度相位受噪声的影响通常大于定位误差^[13], 实际上两者标准差的计算式也能定量地印证该观点,图 4 给出了边缘梯度相位和定位误差的标准差,计算中直线的 SNR(c/σ_n) 的取值范围是 $[2, 4], \tau = 1, S = 7$, 从图 4 可见,定位误差对噪声的鲁棒性远大于梯度相位,例如当 SNR 值较低时(信噪比为 2), 梯度相位标准差约为 14° , 而定位误差标准差仅为 0.37;在计算复杂度方面,自适应相位分区准则是将梯度相位与分区阈值做

比较,计算量远小于边缘位置的约束准则,因此更具有优势。

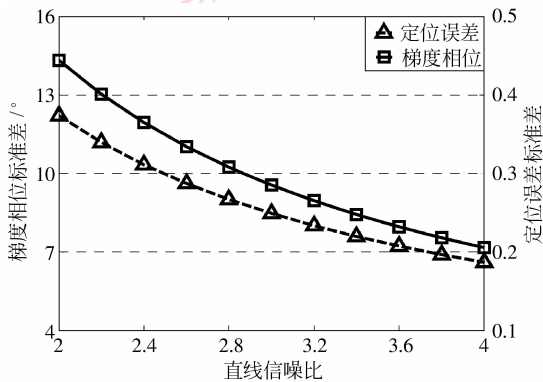


图 4 直线边缘梯度相位标准差和定位误差标准差

Fig. 4 Standard deviation of gradient phase and localization error for line edge

3 直线提取算法

基于自适应相位分区和边缘位置的约束准则,本文提出了一种直线提取新方法,其处理流程如图 5 所示。

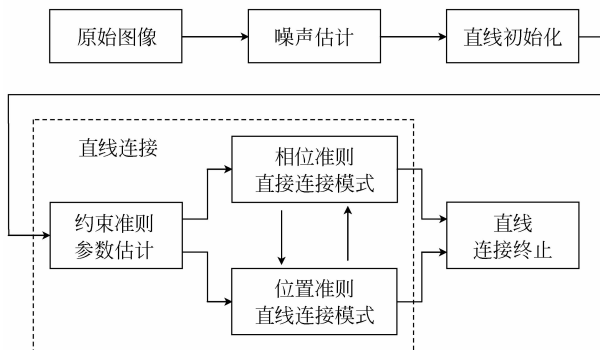


图 5 直线提取算法流程

Fig. 5 The flow chart of line extraction algorithm

3.1 噪声方差估计

本文采用 Shin 等人提出的方法^[14]来估计噪声方差,即首先将图像划分为多个互不交叠的区域,同时计算每个区域的图像标准差,并选取若干标准差较小的均匀图像块;然后采用自适应的高斯模板对选取的图像块进行平滑,并计算差分图像;最后计算差分图像的方差,作为图像噪声方差的估计。

3.2 直线初始化

直线初始化的步骤为:首先采用 Canny 算子提

取边缘;然后按照从左到右、从上至下的顺序扫描边缘图,搜索直线起始点;最后依据直线边缘梯度相位相近的特点初步连接短直线。

3.3 直线连接

利用直线初始化得到的短直线来估计直线连接的约束准则参数。具体方法是:先采用最大似然估计法计算边缘对比度和梯度相位,然后结合图像噪声方差,利用式(5)(6)计算相位分区间隔和边缘定位误差的判决阈值。此外还运用最小二乘算法来拟合直线位置参数,以便进行后续边缘定位误差的计算。

基于计算复杂度考虑,算法优先工作于“相位准则连接”模式,即先依次连接满足自适应相位分区准则的边缘,并实时更新直线连接约束准则参数和直线位置参数。当随机干扰导致边缘不满足相位连接条件时,则进一步依据边缘位置约束准则连接直线,以发挥其强鲁棒性的特点。为避免随机干扰对直线连接的影响,“位置准则连接”模式下不进行参数更新。通过两种直线连接模式交互并行执行,将大大改善算法的性能。

3.4 直线连接终止

存在下列情况时,结束当前直线连接:1)当前点不满足自适应相位分区准则和位置约束准则;2)连续两个边缘处于“位置准则连接”模式,并且当前点仍然仅满足位置约束准则;3)当前点的邻域内(3×3 或 5×5)不存在未标记的边缘点。

重复进行直线连接处理,直到图像中直线提取完毕,最后输出结果。

4 实验结果与分析

4.1 相位统计特性仿真

仿真时,首先仿真生成大小为 200×200 的直线图像,直线位置参数取 $\rho = 0, \theta \in [0^\circ, 90^\circ]$,SNR 的取值是 2、5 和 10,蒙特卡洛仿真次数为 1000。

然后采用 χ^2 拟合优度检验来验证直线边缘梯度相位是否服从正态分布,检验显著性水平为 0.05。计算通过检验的实验次数与总数的比值,并称之为检验通过率。图 6 给出了仿真直线的检验通过率,SNR 值分别为 2、5 和 10 等 3 种情况下的平均通过率分别高达 93.5%、95.1% 和 95.4%。图 7 和图 8 分别给出了相位均值和标准差的仿真值与理论值的偏差,SNR 值分别为 2、5 和 10 等 3 种情况下,相位

均值的最大偏差分别是 1.22° 、 0.60° 和 0.47° ;相位标准差的最大偏差分别是 1.39° 、 0.60° 和 0.28° 。图 6、图 7 和图 8 表明,直线边缘的梯度相位近似服从均值为 θ ,方差为 $\sigma_n^2/(4c^2\tau^2)$ 的正态分布,并且直线 SNR 值越大,近似效果越理想,这也印证了前述理论推导的正确性。

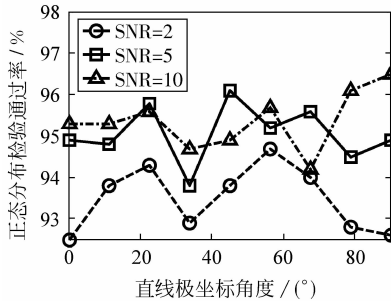


图 6 正态分布检验通过率

Fig. 6 Normal distribution test result

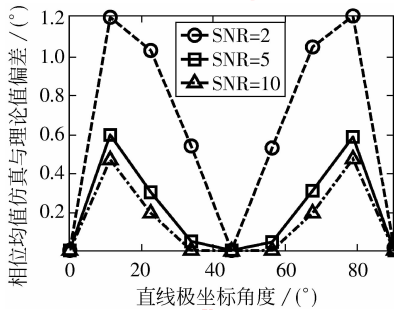


图 7 相位均值仿真值与理论值偏差
Fig. 7 The deviation between simulation result and theoretical deduction result for the mean of phase

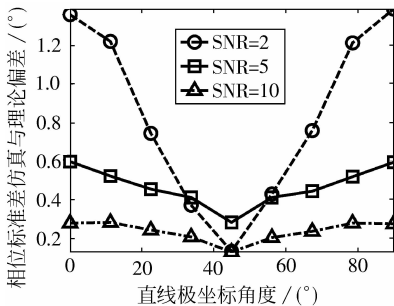


图 8 相位标准差仿真值与理论值偏差
Fig. 8 The deviation between simulation result and theoretical deduction result for the standard deviation of phase

4.2 直线边缘相位编组仿真

针对仿真直线边缘,分别采用固定(如图 1 所

示)和自适应相位分区方式进行编组,并统计编组的错误率,其值越大,提取的直线越容易断裂。图 9 给出了较低信噪比(SNR 值等于 2)仿真直线的编组错误率,从图 9 可以看出,对于所有方向的直线,自适应分区的编组错误率均低于固定分区方式。特别是在固定相位分区的边界处,如 $\theta = 22.5^\circ$ 时,固定和自适应分区的编组错误率分别是 50% 和 8.1%,减幅约为 83.8%。图 9 表明,本文方法有效缓解了固定分区方式存在的直线边缘编组不一致的问题,这有助于提高直线提取的质量。这是由于自适应分区准则依据梯度相位的统计特性动态调整了相位分区的中心和间隔,同时消除了相位分区量化误差和噪声的影响,从而改善了边缘编组的质量。

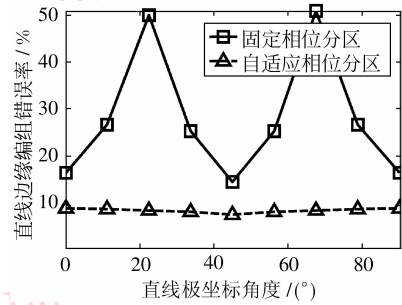


图 9 仿真直线边缘编组错误率

Fig. 9 False labeling rate of simulated line edge

4.3 直线提取性能仿真

针对 SNR 值等于 2 的仿真直线,采用 Canny 算子检测边缘,并分别采用文献[3,5-6]和本文方法提取直线,同时选取直线断裂的数量和归一化平均长度作为评价指标,直线断裂数量越少,表明直线提取越完整;而平均长度越长,则表明直线提取越完整。两种情况均表明直线提取效果良好。

图 10 给出了 4 种方法提取的直线的归一化平均长度。从图 10 可见,本文方法提取的直线长度最长,特别在固定相位分区边界处,当 $\theta = 0^\circ$ 时,长度是文献[3]方法的 15 倍;当 $\theta = 22.5^\circ$ 时,分别是文献[5]和文献[6]方法的 22.7 和 10.3 倍。图 11 给出了 4 种方法提取的直线的断裂数量。从图 11 可见,本文方法提取的直线其断裂的数量最少,当 $\theta = 0^\circ$ 时,比文献[3]方法少 90.4%; $\theta = 22.5^\circ$ 时,比文献[5]和文献[6]方法分别少 93.3% 和 85.4%。图 10 和图 11 表明,本文方法提取的所有方向直线均最完整、断裂也最少。

分析其原因主要有以下 3 点:1)文献[3]和文

献[5-6]方法均采用固定相位分区方式,存在直线边缘编组不一致问题,特别当直线的垂线方向趋于相位分区边界时,此问题更加严重,而自适应相位分区准则却有效解决了该问题,从而显著改善了直线的提取质量;2)本文还考虑到噪声和图像数字化的干扰,提出了一种边缘位置约束准则,依据边缘定位信息连接直线,大大增加了直线提取的信息利用量;3)本文设计了一种直线连接方法,能够综合发挥两类准则的优势,从而增强了算法的鲁棒性。这也证实了前述理论分析的正确性。

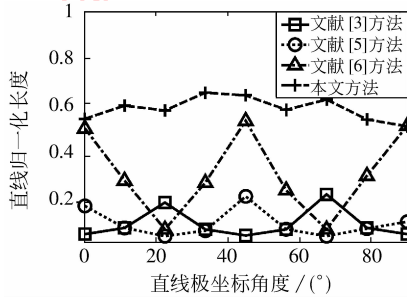


图 10 直线归一化长度

Fig. 10 The average of normalized length of lines

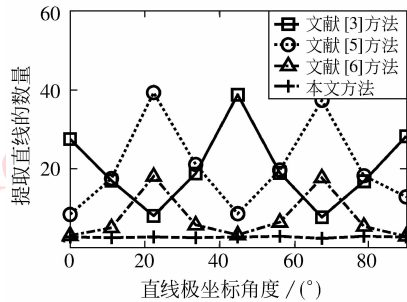
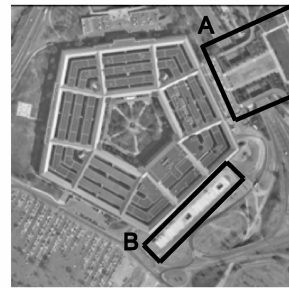


图 11 直线断裂的数量

Fig. 11 The number of line segments

4.4 标准测试图像处理结果

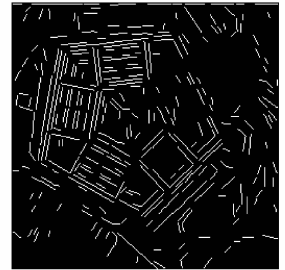
采用文献[3],文献[5-6]和本文方法分别对 USC-SIPI 遥感数据库中的标准图像进行测试,处理结果如图 12 所示,长度短于 5 的直线已删除。由图 12 可以看出,本方法对不同方向的建筑和道路轮廓均具有最佳的检测效果,提取区域 A 内道路和区域 B 内建筑轮廓最完整、断裂也最少。4 种方法提取直线的总长度分别是 5 188、4 043、6 259 和 7 735,本文方法比文献[3]和文献[5-6]提出的方法分别高 49.1%、91.3% 和 23.6%。实测数据的处理结果也表明,本文方法提取的直线准确完整、断裂少、鲁棒性强。



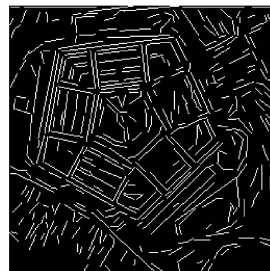
(a) 建筑光学遥感图像



(b) Kang 方法处理结果



(c) Venkateswar 方法处理结果



(d) Lee 方法处理结果



(e) 本文方法处理结果

图 12 4 种方法对标准建筑图像的处理结果

Fig. 12 Line extraction results of standard building image by four methods

5 结论

本文提出了一种灰度图像直线提取新方法,即首先采用 Canny 算子检测边缘;然后初步连接短直线,并设置约束准则参数;最后综合应用自适应相位分区准则和边缘位置约束准则来提取直线。与现有方法相比,该方法具有如下优点:1)能依据短直线的边缘梯度相位和 SNR 值大小实现自适应相位分区,解决了固定相位分区存在的直线边缘编组不一致问题;2)由于考虑了噪声和图像数字化对边缘定位的影响,因而增强了边缘位置约束准则的鲁棒性;3)由于合理地结合了两类直线连接判决准则的优势,因此使算法性能趋于最优。实验表明,本文方法提取的直线完整、断裂少、准确度高、鲁棒性强,能够广泛应用于建筑、机场和道路等人工目标的提取与识别。

参考文献 (References)

- [1] Di Nan, Zhu Ming, Wang Yinan. Real time method for airport runway detection in aerial images [C]// Proceedings of International Conference on Audio, Language and Image Processing. Shanghai: Shanghai University Press, 2008: 563-567.
- [2] Katartzis Antonis, Sahli Hichem. A stochastic framework for the identification of building rooftops using a single remote sensing image [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1):259-271.
- [3] Kang Dongjoong, Jung Munho. Road lane segmentation using dynamic programming for active safety vehicles [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(16): 3177-3185.
- [4] Wang Yan, Bai Li, Fairhurst Michael. Robust road modeling and tracking using condensation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(4): 570-579.
- [5] Venkateswar V, Chellappa Rama. Extraction of straight lines in aerial images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1111-1114.
- [6] Lee JoonWoong, Kweon InSo. Extraction of line features in a noisy image [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(10): 1651-1660.
- [7] Yuan Jianxing, Suen Ching Y. An optimal $O(n)$ algorithm for identifying line segments from a sequence of chain codes [J]. Pattern Recognition, 1995, 28(5): 635-646.
- [8] Shang Zhenhong, Liu Mingye. Line detection algorithm using freeman criteria [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(1): 49-53. [尚振宏, 刘明业. 运用 Freeman 准则的直线检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(1): 49-53.]
- [9] Canny John. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [10] Dong Hongyan. Research on Some Techniques in Edge Detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 84-85. [董鸿燕. 边缘检测的若干技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 84-85.]
- [11] Luo Pengfei, Zhang Wenming, Liu Fusheng. Random Signal Analysis [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2000: 149-150. [罗鹏飞, 张文明, 刘福声. 随机信号分析 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000: 149-150.]
- [12] Kakarala Ramakrishna, Hero Alfred O. On achievable accuracy in edge localization [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 777-781.
- [13] Kim HeungSoo, Kim JongHwan. A two-step circle detection algorithm from the intersecting chords [J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(6): 787-798.
- [14] Shin DongHyuk, Park RaeHong, Yang Seungjong, et al. Block-based noise estimation using adaptive Gaussian filtering [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(1): 218-226.