

一种稳健的直线提取算法*

文贡坚, 王润生

(国防科学技术大学 ATR 国家实验室, 湖南 长沙 410073)

E-mail: rswang@nudt.edu.cn

http://www.nudt.edu.cn

摘要: 直线是图像分析中一种非常重要的中层描述符号. 已有的提取算法较多, 但都存在一些缺陷, 限制了它们的使用范围. 提出一种稳健的直线提取算法, 设计了一系列的方法来克服实际图像中存在的种种干扰和噪声. 首先提取并细化边缘, 然后利用卡尔曼滤波器跟踪边缘点, 获得直线支持区, 最后设计一种稳健的方法来拟合直线支持区. 实验结果表明, 这种算法具有良好的性能, 适应于较广范围的实际图像.

关键词: 直线提取; 图像分析; 卡尔曼滤波器; 稳健的方法

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

直线是一种数学上简单的中层描述符号, 利用它可以描述许多人造目标, 如建筑物^[1]、机场^[2]以及主要道路^[3]等, 因而从图像中提取直线是许多目标识别和场景分析系统中的一个重要组成部分. 另外, 在场景匹配^[4]、立体匹配^[5]以及序列分析^[6]中, 直线又是一种非常重要的基元. 正因为直线在图像分析中的重要性, 它的提取算法倍受人们关注. 近 20 年来, 人们提出了许多算法, 但它们各有优缺点^[7].

Hough 变换^[8]的优点是抗噪性能较好, 且能连接共线短直线, 其缺点是参数难于选择且计算复杂、提取直线的分辨率较低且缺乏局部特性. 启发式连接算法^[9-11]的最大问题是, 对边缘检测的结果比较敏感且容易产生断裂的短直线. Boldt 等人^[12]提出的层次记号编组法提取直线的速度快且能连接共线短直线, 它的缺陷与 Hough 变换有些类似, 如参数难于选择、低分辨率. 基于假设检验策略的直线提取方法^[13,14]可消除短直线之间的间隔. Burns 等人^[15]设计了相位编组法, 克服了已有算法只依据图像梯度的幅度信息来提取直线的缺点, 因而在提取低对比度直线时有明显优势. 各种直线的性能比较见表 1.

Table 1 Comparison of some existing methods

表 1 已有直线提取算法之间的比较

Method ^①	Line resolution ^②	Low contrast ^③	Bridge gaps ^④	Complexity ^⑤	Local feature ^⑥	Sensitive to noise ^⑦
Hough ^⑧	Low ^⑨	No ^⑩	Yes ^⑪	Complex ^⑫	Bad ^⑬	No
Edge Linking ^⑭	Media ^⑮	No	No	Simple ^⑯	Good ^⑰	A little ^⑱
Token-Based ^⑲	Media	No	Yes	Simple	Bad	A little
Pred/Verif ^⑳	Media	No	Yes	Complex	Good	A little
Burns ^㉑	High ^㉒	Yes	No	Simple	Good	Yes

①方法, ②直线分辨率, ③低对比度, ④连接短直线, ⑤复杂性, ⑥局部性, ⑦抗噪性, ⑧Hough 变换, ⑨边缘连接法, ⑩层次记号编组法, ⑪假设检验法, ⑫相位编组法, ⑬低, ⑭否, ⑮是, ⑯复杂, ⑰差, ⑱中, ⑲简单, ⑳良好, ㉑一般, ㉒高.

• 收稿日期: 1999-11-15; 修改日期: 2000-06-13

基金项目: 国家 863 高科技发展计划资助项目(863-308-13-02(4))

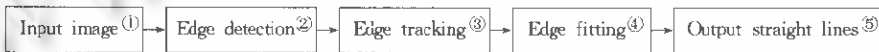
作者简介: 文贡坚(1972-), 男, 湖南宁乡人, 博士, 主要研究领域为图像理解, 目标识别, 图像测量, 信息融合; 王润生(1941-), 男, 江苏扬州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为图像分析与理解, 信息融合.

当然,一种优秀且稳健的直线提取算法应具有下列特性:(1)提取直线的分辨率要高;(2)能提取低对比度的直线;(3)能消除共线的短直线之间的间隔;(4)计算简单且参数容易选择;(5)对噪声不太敏感;(6)具有良好的局部特性.从表1中可以看出,现有的算法都不能同时具备上述6个特性.本文提出了一种稳健的直线提取算法,它设计了一系列的方法来克服实际图像中存在的种种干扰和噪声,使算法能适应比较广的范围.

本文第1节详细讨论上述算法,第2节给出了一些实验结果.第3节是结论.

1 算法描述

整个算法大致分为3步:首先,采用抗干扰性强的算子提取并细化边缘;然后,根据边缘点的位置和相位特性,利用卡尔曼滤波器跟踪边缘点获得直线支持区;最后,用稳健方法拟合直线支持区,得到直线参数.其流程图如图1所示.这种方法的思路看上去和启发式连接方法有些类似,但与其比较有以下特点:(1)它对边缘提取算子无特殊要求,容易将各种优秀的边缘提取算子引入算法中;(2)它采用卡尔曼滤波器来跟踪和预测边缘点,这样可以消除短直线之间的断裂现象;(3)在跟踪边缘点时引入边缘点的相位特性,可提高直线的分辨率;(4)它不采用传统最小二乘法来拟合直线,而用稳健的方法来拟合,以提高直线拟合的精度.下面将详细讨论这3个步骤.



①输入图像,②提取边缘,③跟踪边缘,④拟合边缘,⑤输出直线.

Fig. 1 The flow chart of extracting straight lines
图1 直线提取流程图

1.1 边缘提取与细化

边缘提取是图像处理和分析中研究最多也最为困难的问题之一.文献[7]对此作了比较详细的讨论.本文的方法对边缘提取算子没有特殊要求.下面我们只简单地讨论为测试该算法而选用的Canny算法^[16].

Canny定义了最佳边缘提取算子的3个准则:(1)真正的边缘点应被检测出来;(2)边缘点的定位准确;(3)一个边缘点只被检测一次.根据这些准则,Canny设计了一个最优滤波器.算法分为3步:(1)图像与最优滤波器卷积;(2)对卷积图像进行求导;(3)检测导图像的局部极大值点作为边缘点.

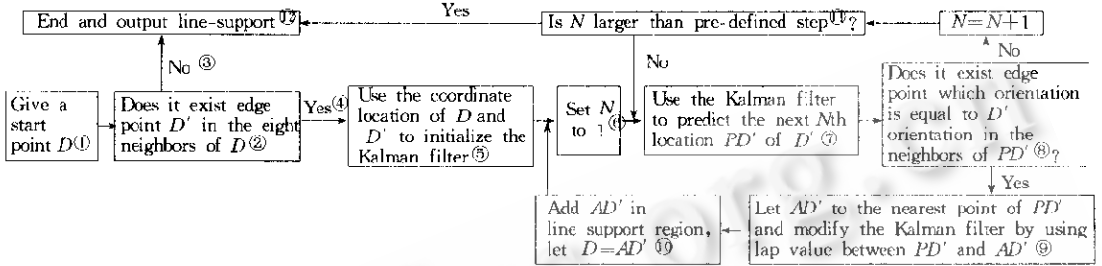
对于每一边缘点,除了位置信息外还保存其幅度和相位信息.相位信息用二进制数描述,即0表示相位小于 180° ,1表示相位大于等于 180° .

1.2 基于卡尔曼滤波的边缘跟踪

跟踪边缘点是启发式连接算法中最关键的一步,虽然不同的算法采用的连接策略不完全相同,但基本思想是一致的:在跟踪下一个边缘点时,考虑当前点所在的一个小邻域内(如 3×3 、 5×5)是否存在候选边缘点,然后比较候选边缘点与当前边缘点的相位差异来确定下一边缘点的位置.由于在边缘提取过程中可能遗漏一些边缘点,这种跟踪策略因难以弥补这些点而导致一些短直线的产生.本文提出了一种基于卡尔曼滤波的跟踪算法,能够很好地解决这一问题.

我们把图像中的每一条直线视为一条目标匀速直线运动的轨迹,考虑到边缘点位置的量化效果以及提取的不准确,这一轨迹将受到污染,我们将其视为白噪声干扰,从而可以借用卡尔曼滤波器来跟踪边缘点.具体方法如下:

把图像上各边缘点的坐标作为测量数据,给定一边缘点 D ,分别在水平和垂直方向上建立边缘点 D 随时间变化的无干扰匀速直线运动模型,然后利用卡尔曼滤波器预测边缘点 D 的下一位置 PD ,通过分析包含 PD 的一个邻域内各边缘点的特性来确定边缘点 D 的下一跟踪点 D' 的位置,最后由 PD 与 D' 之间的差值来修改滤波器参数.其详细流程图如图 2 所示.



①给定一个起始点 D ,②在其 8 个邻域内是否存在边缘点 D' ,③否,④是,⑤用 D 和 D' 的位置坐标值初始化卡尔曼滤波器,⑥将 N 置 1,⑦用卡尔曼滤波器预测 D' 的下位置 PD' ,⑧包含 PD' 的一个邻域内是否存在与 D' 相位一致的边缘点,⑨选择离 PD 最近的点 AD ,由 PD 与 AD 之间的差值来修改卡尔曼滤波参数,⑩将 AD' 加入直线支持区, D' 用 AD 代替,⑪ N 大于最大预测步长,⑫结束,输出直线支持区.

Fig. 2 The flow chart of edge tracking to acquire line-support region
图 2 边缘跟踪形成直线支持区流程图

下面对图 2 作一些说明:

(1) 卡尔曼滤波器的设计

卡尔曼滤波器一般由状态模型、测量模型以及递归迭代方法 3 部分组成.考虑到点在水平和垂直方向上的运动是无关系的,这里只讨论水平方向上的运动,而在垂直方向上可作类似分析.对于无干扰的匀速直线运动,它的模型列在下面.在以下式子中, $X(k)$ 表示运动状态向量, $x(k)$ 为位移量, $x'(k)$ 为速度量; $z(k)$ 为测量量,即为跟踪边缘点的水平坐标; T 为时间间隔,它一般取常数; k 为跟踪时刻,它是从起始边缘点开始的.

(a) 状态模型

边缘点 D 沿直线匀速运动的状态方程为

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k), \tag{1}$$

其中
$$X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x'(k) \end{bmatrix}, \Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

(b) 测量模型

D 点运动的测量方程为

$$z(k) = C(k)X(k) + n(k), \tag{2}$$

其中 $C(k) = [1 \ 0]$, $n(k)$ 是均值为 0 方差为 σ^2 的白噪声.

(c) 问题求解及滤波器结构

利用卡尔曼滤波求解式(1)和式(2),可简化为(见参考文献[17])

$$K(k) = \frac{\begin{bmatrix} 2(2k+3) \\ (k+2)(k+3) \\ 6 \\ T(k+2)(k+3) \end{bmatrix}}{\tag{3}}$$

由式(3)可以看出,卡尔曼滤波增益只与 k 值有关,这样将大大简化滤波器的结构,同时也降低了计算量.图 3 是这种卡尔曼滤波器的结构.

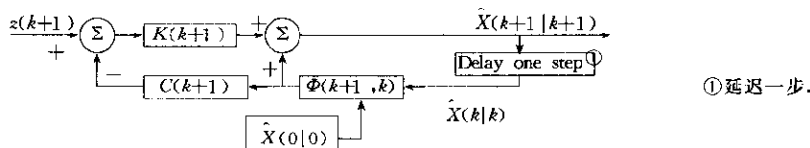


Fig. 3 The structure of the Kalman filter
图3 卡尔曼滤波器的结构

(d) 滤波器特性的分析

(1) 如果边缘点 D 的运动偏离原来的运动方向,即进入另一直线段,卡尔曼滤波增益 $K(K)$ 将使滤波输出的结果越来越与测量的数据不一致,从而导致滤波发散.因此,可以通过分析滤波预测结果与测量数据之间的误差来修改原有的运动方向,并确定直线支持区的范围.

(2) 为了避免相互平行且相距很近的两条直线编成一组,以提高直线的分辨率,我们只跟踪相位和起始点一致的边缘点(注意,相位只有两个值),因为相互平行且相距很近的直线的边缘点相位正好相反.

(3) 为了消除短直线之间的断裂现象,我们利用卡尔曼滤波器向前预测一定距离.这一距离可以与直线支持区的长度有关,也可以是一个固定长度.在实验中,我们采用固定长度.

(4) 在预测点 PD' 的邻域内寻找边缘点,其邻域大小就是算法所允许的滤波预测结果与测量数据之间的最大误差,一般选择 1 个像素.

(5) 在图 2 中,跟踪了起始点 D 一侧的边缘点,同样可以跟踪另一侧的边缘点,它在初始化滤波器时,对前次滤波器的参数最后结果取反.

(6) 在跟踪过程中,凡是被跟踪过的边缘点均置为非边缘点.

1.3 稳健的直线拟合方法

直线拟合一般采用最小二乘法.这种方法的缺点是,若参加直线拟合的部分点出现偏差,将会影响整个拟合效果.边缘跟踪形成的直线支持区受结束条件的限制,在其两侧会出现弯曲点,这些弯曲点属于另外的直线,不应参加该直线拟合.传统的最小二乘法难以去掉这些点.我们设计了一种稳健的直线拟合算法,它能很好地解决这一问题.

我们先定义几个参数.设点 A, B 是直线支持区内两点,经过这两点的直线为 AB ,则定义直线 AB 所包含的正常点为在直线支持区内,到直线 AB 的距离小于一个设定门限的边缘点.这些点的个数为正常点数.下面分 3 步来拟合直线:

首先,随机从直线支持区内挑选若干对点,对每一对点,求出它们所包含的正常点及正常点数;然后,挑选正常点数最多的那一组,用最小二乘法拟合其包含的正常点,求得直线拟合方程;最后,从直线支持区两侧开始,依次求边缘点到拟合直线的距离,若遇到距离小于一个预置门限的边缘点就结束,把直线支持区两侧距离大于门限的边缘点重新置回图像中.

2 实验结果与结论

2.1 实验结果

下面分两部分给出一些实验结果.

2.1.1 与已有算法的比较

我们选用一幅标准的房屋图像(如图 4(a)所示)作为测试图像,分别用相位编组法、层次记号

编组法以及本文的方法提取直线,如图 4(b)~(d)所示,其运行时间见表 2.

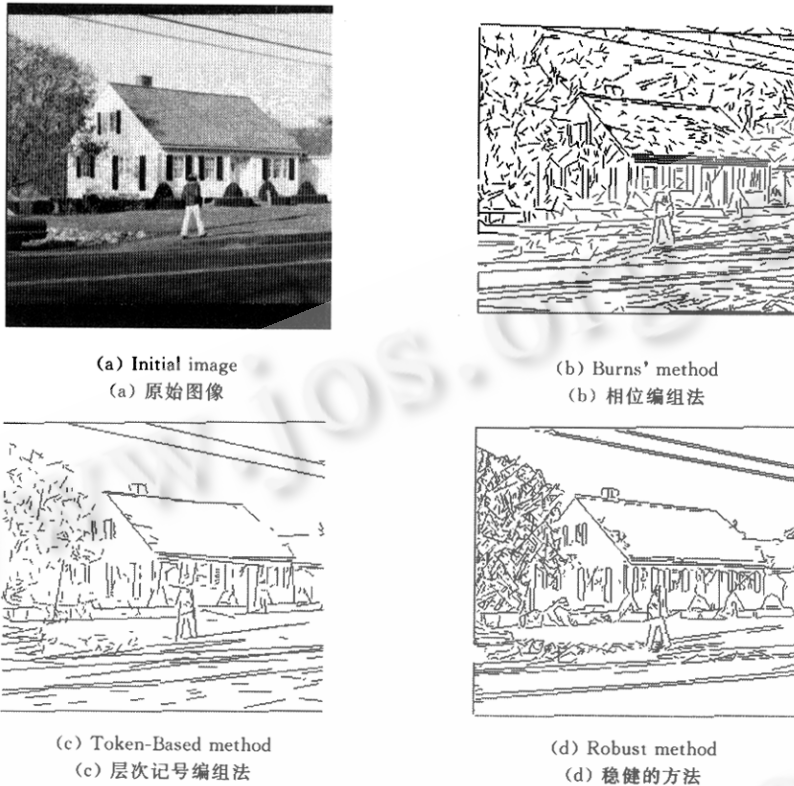


Fig. 4 Comparison between the robust method and existing methods

图 4 与已有算法的比较

Table 2 Comparison of runtime of three methods

表 2 3 种算法运行时间的比较

Method ^①	Burns ^③	Token-Based ^④	Proposed method ^⑤
Runtime ^② (s)	0.38	0.50	0.22

①方法,②运行时间,③相位编组法,④层次记号编组法,⑤本文提出的方法.

2.1.2 对大量实际图像的处理结果

我们用大量的实际图像对本文方法进行了测试,并利用提出的直线进行了目标识别^[3]和建筑物测量^[18].图 5 只给出了部分实验结果,其中长度小于 5 的直线已滤除.图 5(a)是一幅标准的机场卫片图像,图 5(b)为其提取出的直线,机场跑道、滑行道以及连接两者的短直线均被提取出来,因而可以方便地识别出机场.图 5(c)为有主要道路的城市航空图像,图 5(d)为其提取出的直线,从实验结果可以看出,主要道路上的直线基本上被提取出来.我们可以利用文献[3]的算法方便地检测出主要道路.

3 结论

本文通过总结已有直线提取算法所存在的缺陷,给出了一种优秀直线提取算子所应具备的 6 个基本特征,由此提出了一种稳健的直线提取算法.它有以下一些优点:(1)采用卡尔曼滤波器跟踪边缘点,可以弥补在边缘提取和细化中所遗漏的细节;(2)用稳健的拟合方法代替传统的最小二

乘拟合,可极大地提高直线的精度;(3)巧妙地利用边缘点的相位信息,将其二值化,这样,不仅使算法免受噪声干扰,而且还能提高直线的分辨率;(4)整个算法基本上不存在参数的选择问题,虽然在算法中提到了几个门限,但它们基本上是固定的;(5)整个算法的计算量不大.首先它只是在细化后的边缘图像上进行处理,其次在跟踪时,先用卡尔曼滤波器预测位置,可以大大缩小搜索范围.理论和实验结果均表明这种方法基本上具备6个基本特征,是一种适应范围很广的直线提取算法.我们已将它应用到许多实用系统中,都取得了很好的效果.



(a) An airport satellite image
(a) 一幅机场卫星图像



(b) Straight lines extracted from the airport image
(b) 机场图像的直线提取结果



(c) A city aerial image
(c) 一幅城市航空图像



(d) Straight lines extracted from the city image
(d) 城市图像的直线提取结果

Fig. 5 Part of the results for actual images

图5 提取实际图像直线的部分结果

References:

- [1] Huerlas, A., Nevatia, R. Detecting buildings in aerial images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, 41(2):131~152.
- [2] Huerlas, A., Cole, W., Nevatia, R. Detecting runways in complex airport scenes. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1990, 51(2):107~145.
- [3] Wen, Gong-jian, Wang, Run-sheng. Automatic extracting main roads from aerial remote sensing images. *Journal of Software*, 2000, 11(7):957~964 (in Chinese).
- [4] Nevatia, R., Price, K. Locating structures in aerial images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(5):476~484.
- [5] Mcintoah, J., Mutch, K. Matching straight lines. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, 43(3):386~408.
- [6] Zhang, Z. Estimating motion and structure from correspondences of line segments between two perspective images. *IEEE*

- Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent, 1995,17(12):1129~1139.
- [7] Wen, Gong-jian. Research on the new way to image analysis [MS Thesis]. Changsha: National University of Defence Technology, 1997 (in Chinese).
- [8] Illingworth, J., Kittler, J. A survey of the Hough transform. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988,44(1):87~116.
- [9] Nevatia, R., Babu, K. Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, 1980,13(3):257~269.
- [10] Zhou, Y., Venkateswar, V., Chellappa, R. Edge detection and linear feature extraction using a 2-D random field model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1989,11(1):84~95.
- [11] Venkateswar, V., Chellappa, R. Extracting straight lines in aerial images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1992,14(11):1111~1114.
- [12] Boldt, M., Weiss, R., Riseman, E. Token-Based extraction of straight lines. *IEEE Transactions on System, Man Cybernetics*, 1989,19(7):1581~1594.
- [13] Mansouri, A., Malowany, S., Levine, M. Line detection in digital picture: a hypothesis prediction/verification paradigm. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1987,40(1):95~114.
- [14] Nelson, R. Finding line segments by stick growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1994,16(5):519~523.
- [15] Burns, J., Hanson, A., Riseman, E. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1986,8(4):425~455.
- [16] Canny, J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1986,8(6):679~698.
- [17] Zhang, You-wei. Theory on the Verna and Kalman Filter. Beijing: People's Education Press, 1980 (in Chinese).
- [18] Wen, Gong-jian, Wang, Run-sheng. An approach to measuring a city building based on its structure information. *Chinese Journal of Computers*, 2000,11(11):1201~1207 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [3] 文贡坚,王润生.从航空遥感图像中自动提取主要道路. *软件学报*,2000,11(7):957~964.
- [7] 文贡坚.图像分析新途径的研究[硕士学位论文].长沙:国防科学技术大学,1997.
- [17] 张有为.维纳与卡尔曼滤波理论导论.北京:人民教育出版社,1980.
- [18] 文贡坚,王润生.基于结构信息的城市建筑物测量方法. *计算机学报*,2000,11(11):1201~1207.

A Robust Approach to Extracting Straight Lines*

WEN Gong-jian, WANG Run-sheng

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

E-mail: rswang@nudt.edu.cn

http://www.nudt.edu.cn

Abstract: Straight lines are very important intermediate level symbol in image analysis. There are many approaches to extracting straight lines, but they all have their particular drawbacks to limit their use. A robust approach to extracting straight lines is proposed in this paper. A series of methods are devised to overcome all kinds of noise in real images. It firstly thins edge points, and then tracksthem to form line support regions by using the Kalman filter, finally line support region is approximated to a line by using a robust method. The experimental results show that this line finder has a perfect performance and is suitable to a wide range of real images.

Key words: extracting straight lines; image analysis; Kalman filter; robust method

* Received November 15, 1999; accepted June 13, 2000

Supported by the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No. 863-308-13-02(4)