

基于形态学的快速拐点检测统一模型

李 华 刘文予 朱耀庭 朱光喜

(华中科技大学电信系图象教研室图象信息处理与智能控制国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 拐点检测一直是计算机视觉和图象处理中的关键问题. 传统方法是通过计算曲率来实现拐点的检测, 其要求准确定位拐点所在局部区域的位置, 并易受到噪声干扰, 为此提出了一种新的基于形态骨架的快速拐点检测方法, 该方法基于物体条件骨架原理, 采用改进的非对称开运算算子, 并利用内外骨架分别实现对物体凸点和凹点的检测, 以保证对拐点检测的完整性; 对于有噪声图象, 则采用多刻度形态滤波进行去噪预处理; 对拐点给出了统一的检测算法和实现模型. 实验结果表明, 该统一算法检测准确度高、具有旋转不变性、计算量小、硬件实现简单, 对有噪声干扰图象也能很好地进行检测.

关键词 拐点检测 数学形态学 形态骨架 非对称开运算

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)06-0543-05

A Uniform Model of Corner Detection Based on Morphology

LI Hua, LIU Wen-yu, ZHU Yao-ting, ZHU Guang-xi

(Dept. of Electronics & Information Engineering, State Education Commission Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract Corner detection is an important task in various computer vision and image-understanding system. Traditional methods are based on chain-code and curvature computation of curves, which suffer the dependence either on the correctness of region segmentation or on the susceptibility of noise. In this paper, a novel corner detection method based on mathematical morphology is proposed, which is very different from traditional chain-code based corner detection methods. This method is based on morphological skeleton principle, and uses a modified opening operator to detect the convex and concave corner of the image. The result of the corner detection is achieved by compose the result of the two-corner sets of the source image and its complement set. The multi-scale morphological filter is used to eliminate noise. The uniform model of corner detection has also been established. Experiments show that this method leads to accurate detection, low computational cost, and rotational invariance.

Keywords Corner detection, Mathematical morphology, Morphological skeleton, Modified opening operator

0 引 言

拐点包含着物体形状的重要信息, 因此拐点检测作为计算机视觉和图象处理中的重要内容, 被广泛应用于形状分析、模式识别、图象匹配、数据压缩、运动分析等方面. 近年来, 有许多研究者就这一问题开展了广泛的研究. 传统的拐点检测方法是将被检测的边界用链码表示, 通过寻找高曲率点来达到拐点

检测的目的. Rosenfeld^[1,2]提出的 k 曲率方法是这类方法中最早的研究, Asada^[3], Langridge^[4], Gerard Medioni^[5] 和 Fischler^[6] 提出的算法也属于这一类. 但这类方法中导数的局部估计, 对噪声非常敏感, 而应用平滑算子又会影响检测的准确性, 且计算量也较大.

其他的一些方法还包括基于模型方法^[7,8], 这类方法检测准确性较高, 但需要进行前期预测; 基于神经网络的检测方法^[9]; 基于协方差的检测方法^[10];

基于小波变换的方法^[11]以及基于亮度对比的方法^[12]等等.但这些方法或者抗噪性能差,或者计算复杂,都不能在各项指标上均达到令人满意的结果.

由于形态运算具有强的几何选择特性和通过积分几何理论可间接获取图象的几何参数的能力,数学形态学已成为图象处理领域的一个重要分支,因此有一些研究者将形态算子应用到拐点检测中,并取得了较好的效果.文献^[13]利用形态开运算和圆形结构算子检测二维曲线上的拐点,实现简单,但在离散图象中,圆形结构算子并不是真正意义上的圆,只采用某种结构算子进行检测势必会引入较大误差,而且这一方法只能检测二维闭曲线上的拐点,在灰度图象中的应用效果不是很好.文献^[14]提出的方法相对于文献^[13]有所改进,但对于凹点的检测效果并不是很好,这种算法采用多个结构算子的混合运算实现检测,运算相对而言要复杂一些.这两种方法对于噪声干扰图象的处理都是采用传统的高斯滤波方法,这样整个检测过程的硬件实现就比较复杂,不易于统一,为此提出了一种新的基于形态骨架的拐点检测方法.

1 拐点检测统一模型

定义 1^[15] 设 X 为 $E^{(n)}$ 中的闭集,结构元素 B 为 $E^{(n)}$ 或其子空间 $E^{(m)}$ 中的一个点集.那么,集合 X 关于结构元素 B 的形态和、形态差分别定义如下:

$$X \oplus B = \{x; \check{B}_x \uparrow X\} = \{x; \check{B}_x \cap X \neq \emptyset\}$$

$$X \ominus B = \{x; \check{B}_x \subset X\}$$

集合 X 关于结构元素 B 的形态开变换、形态闭变换分别定义为:

$$X_B = X \ominus B \oplus B \quad X^B = X \oplus B \ominus B$$

其中, $\check{B}_x \triangleq \{x-b; b \in B\}$, 即集合 B 关于原点对称后沿向量 x 的平移.

形态和、形态差是数学形态学中的基本运算,其中结构元素的选择有着至关重要的作用.在大多数应用中,一般选择小尺寸、简单形状的结构算子.若采用圆形结构算子,形态开 X_B 对 X 具有平滑功能,清除 X 边缘毛刺及孤立斑点.形态闭 X^B 对 X 具有过滤功能,填补 X 的裂缝及破洞.

骨架是一类特殊的复合形态运算,对于集合的压缩表示与形态过滤有着重要的意义.其定义如下:

定义 2^[15] 设闭集 $X \subset E^{(2)}$, B 为 $E^{(2)}$ 的单位闭球, ∂X 为 X 的边界.如果 ρB_x ($\rho \geq 0$, B 的中心为 x) 满足以下 3 个条件:

(1) $\rho B_x \subset X$;

(2) 不存在另一个结构元素 $\rho' B_x \subset X$, $\rho' > \rho$, 且 $\rho' B_x \supset \rho B_x$;

(3) ρB_x 与 ∂X 至少有两个公共点 ($\rho > 0$ 时);

那么称 ρB_x 为集合 X 的最大圆,点 x 为其中心, ρ 为其半径.点 x 又称为集合 X 的骨架点,骨架点的全体称为集合 X 的骨架,记为 $SK(X)$.而半径等于 ρ 的最大球中心之全体,记为 $SK_\rho(X)$.显然

$$SK(X) = \bigcup_{\rho \geq 0} SK_\rho(X) \quad (1)$$

为了揭示形态骨架和拐点之间的关系,给出下述一个非常有用的定理.

定理 1 设 $X \in E^{(2)}$, B 为单位闭球,那么

$$SK_\rho(X) = \bigcap_{\mu > 0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \mu B)_{\mu B}] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} SK(X) &= \bigcup_{\rho \geq 0} \bigcap_{\mu > 0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \mu B)_{\mu B}] \\ &= \bigcup_{\rho \geq 0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \rho B)_{\rho B}] \quad (3) \end{aligned}$$

证明 由图 1 可知,有 $\rho B_x \subset X \Rightarrow x \in X \ominus \rho B$, $(\rho+a)B_y \subset X \Rightarrow aB_y \subset X \ominus \rho B$, $\rho B_x \subset (\rho+a)B_y \Leftrightarrow x \in aB_y$, 于是, $X \in SK_\rho(X) \Rightarrow \rho B_x$ 是 x 的最大圆 $\Leftrightarrow$ 点 x 本身是集合 $X \ominus \rho B$ 的一个最大圆(半径为 0) $\Leftrightarrow x \in X \ominus \rho B$, 但 x 不属于任何一个形态开 $(X \ominus \mu B)_{\mu B}$ ($\forall \mu > 0$) $\Leftrightarrow x \in \bigcap_{\mu > 0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \mu B)_{\mu B}]$. 因此式(2)成立.又由式(1)得式(3)成立.证毕.

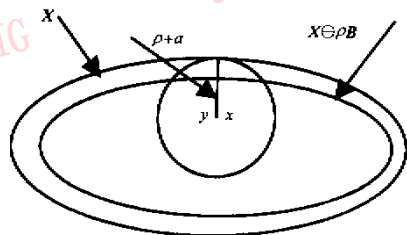


图 1 内接圆 $(\rho+a)B_y$ 与形态差 $X \ominus \rho B$

对于平面点集,式(3)意味着集合 X 的骨架是由 $X \ominus \rho B$ 中的拐点及没有厚度的线条构成的.当 $\rho \rightarrow 0$ 时, $X \ominus \rho B$ 的拐点也即是集合 X 边界上的拐点.由此可以看出,骨架中包含了集合的拐点,为了精确地定位拐点,在骨架的基础上引入条件骨架的概念.

定义 3 设 $X \in E^{(2)}$, B 为单位闭球,那么

$SK^a(X) \stackrel{\text{def}}{=} \left\{ x; \lim_{t \rightarrow 0} \frac{d(x, X \ominus (\rho_X(x) + t)B)}{t} > a \right\}$,
 $a \geq 1$, 且称之为集合 X 的条件骨架. 其中, $d(\cdot)$ 为欧氏距离, $\rho_X(x) = \begin{cases} \text{Sup} \{ \rho; \rho B_x \subset X \} & x \in X \\ 0 & x \notin X \end{cases}$ 为结构示性函数. $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{d(x, X \ominus (\rho_X(x) + t)B)}{t}$ 称为骨架点 x 的收缩率.

由图 2 可知, 当 $x \in SK^a(X)$, 但 $x \notin SK(X)$ 时, 有 $d(x, X \ominus (\rho_X(x) + t)B) = t$, 则 $x \in SK^a(X)$, 与前提矛盾, 因此 $SK^a(X) \subset SK(X)$, 即条件骨架是骨架的一个真子集.

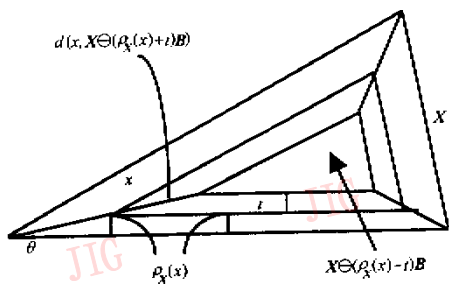


图 2 骨架点的收缩率与条件骨架

条件骨架是骨架的一部分, 比骨架更为直观地揭示了集合的结构性质. 条件骨架有以下重要性质.

性质 1^[15] 设 X 为平面多边形, 顶角为 $2\theta_i$. 当 $a \leq 1/\sin\theta_i$ 时, $SK^a(X)$ 是其角平分线; 否则, 当 $a > 1/\sin\theta_i$ 时, 它是空集. 对于给定的 a , $SK^a(X)$ 过滤了 $SK(X)$ 中顶角较大的角平分线 ($\sin\theta_i > 1/a$), 而保留了 $SK(X)$ 中顶角较小的角平分线 ($\sin\theta_i \leq 1/a$). 特别当 $a = 1$ 时, $SK^1(X) = SK(X)$.

性质 2^[15] 设 X 为正则集 (即 X 的边界足够光滑)

$$SK^a(X) = \bigcup_{\rho \geq 0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \rho B)_{d\rho \cdot B} \oplus (a-1)d\rho \cdot B]$$
$$SK_\rho^a(X) = [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \rho B)_{d\rho \cdot B} \oplus (a-1)d\rho \cdot B]$$

由性质 1 和性质 2 可知, 当 $\rho \rightarrow 0$ 时,

$SK_0^1(X) = X - X_{d\rho \cdot B}$, 此时 $SK_0^1(X)$ 即表示多边形 X 中, 小于 π 的内角顶点 (即凸点). 可以看出, 利用形态条件骨架可简单地检测平面多边形的边界拐点, 但集合 X 的内角并非都小于 π , 应选择合适的结构算子来完整地检测所有拐点. 这一问题可通过外骨架来解决.

定义 4^[15] 设闭集 $X \in E^{(2)}$, 其补集为 X^C . 那么, 集合 X 的外骨架定义为其补集 X^C 的骨架 $SK^*(X^C)$.

在离散形态变换时, X^C 也为闭集, 有单位圆球 B , 则

$$SK^*(X^C) = \bigcup_{\rho \geq 0} \bigcap_{\mu > 0} [(X^C \ominus \rho B) - (X^C \ominus \rho B)_{\mu B}]$$
$$= \bigcup_{\rho \geq 0} [(X^C \ominus \rho B) - (X^C \ominus \rho B)_{d\rho \cdot B}]$$

由性质 2 可有

$$SK_\rho^{*a}(X^C) = [(X^C \ominus \rho B) - (X^C \ominus \rho B)_{d\rho \cdot B} \oplus (a-1)d\rho \cdot B] \quad (5)$$

当 $\rho \rightarrow 0$ 时, $SK_0^{*1}(X^C) = X^C - X_{d\rho \cdot B}^C$, 此时 $SK_0^{*1}(X^C)$ 表示的是集合 X^C 中小于 π 的内角顶点. 而 X^C 中小于 π 的内角顶点恰恰对应了 X 中大于 π 的内角顶点 (即凹点). 综上所述, 由 $SK_0^1(X)$, $SK_0^{*1}(X^C)$, 即可检测出集合 X 的所有拐点.

$$SK_0^1(X) = X - X_{d\rho \cdot B}, \quad SK_0^{*1}(X^C) = X^C - X_{d\rho \cdot B}^C \quad (6)$$

但值得注意的是, 在离散情况下, X^C 和 X 的边界并不重合而是相差一个像素的距离, 这就会对检测的准确性有影响, 因此需要对 X^C 进行扩展运算以得到 $X' = X^C \oplus E$, 使 X' 的边界和 X 重合. 这里 E 采用 4 结构元素.

离散情况下的拐点检测中, 结构元素 B 不能取得过大, 又要较接近圆, 但 B 并不可能完全逼近单位圆, 这样的矛盾就可能造成两种不利情况: 一是检测的各向同性, 也即是算法的旋转不变性无法保证; 再就是某种形状的结构元素总是会对被检测物体中具有相应结构特征的部分产生一定的影响. 因此为了克服上述问题, 将一般常用的开运算进行修改, 即采用一种对式 (6) 改进的非对称开运算:

$$Cor_1 = X - (X \ominus B_1) \oplus B_2, \quad Cor_2 = X' - (X' \ominus B_1) \oplus B_2 \quad (7)$$

即先用一种结构算子对图象进行腐蚀, 然后再采用另一种结构算子进行膨胀来实现开运算. 实验中采用的 B_1 和 B_2 的结构如图 3 所示.

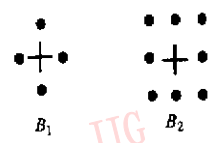


图 3 结构算子 B_1 和 B_2 的结构示意图

最终的检测算子应是

$$Cor = Cor_1 \Delta Cor_2 \quad (8)$$

式中的符号 Δ 表示异或关系. 式 (8) 即为进行拐点检测的统一方法. 此方法的实现模型可由图 4 简单表示.

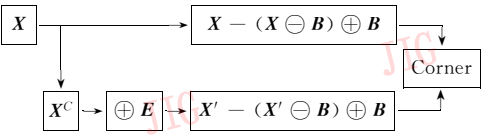


图 4 硬件实现模型

2 实验结果与讨论

对所提出的拐点检测方法,在计算机上进行了模拟实验.图 5 是对 3 幅 256×256 二值图象的检测结果.从检测结果可以看出,提取出的拐点精度高,并且速度很快.这是由于形态运算中只有整数的加法运算和乘法运算,没有任何浮点运算,计算量小,而且对于凸点和凹点的检测可以采用并行计算方法.从图中可以看出,被检测图象中的水平、竖直边界被滤除掉,但在斜边上却有若干点被检测出,这主要是因为离散图象中的斜边并不是平滑的,而是锯齿状的阶梯,阶梯的变化部分也是拐点.这样的斜线变化是有一定的规律的,可以采用一些简单的滤除办法去掉这些斜线,如采用 Lin 提出的弦长方法^[16].从图中还可以看出,其中 4 个不同方向的四边形的顶点都可以检测出来,说明本算法具有旋转不变性.

图 6 是对含有噪声的图象的检测结果,首先是去噪,采用交变序列滤波器进行形态滤波,从小结构元素开始,逐渐增大结构元素的尺寸,可以首先消除小的砂眼及胡椒状噪声,便于后续使用更大的结构元素.本实验中,采用 3×3 结构元素就可以滤掉噪声.这样对图象的预处理和拐点检测方法同为形态处理,就可以实现算法和硬件结构上的统一,比传统的高斯滤波方法要简单很多.图 7 是对灰度图象进行检测的结果,可以看出,本算法对灰度图象中拐点的检测准确度也较高.

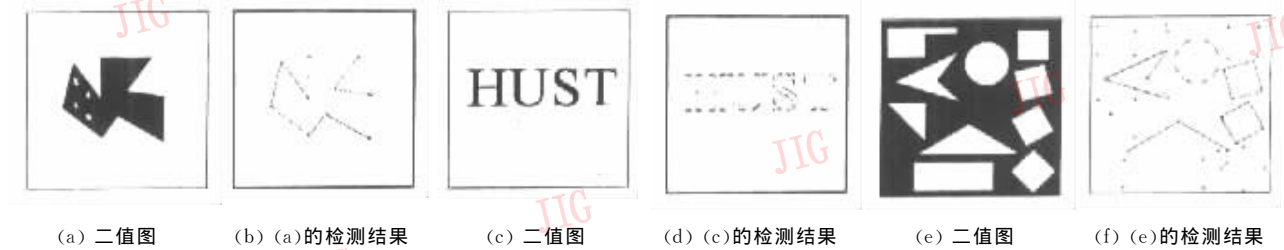


图 5 二值图象拐点检测结果

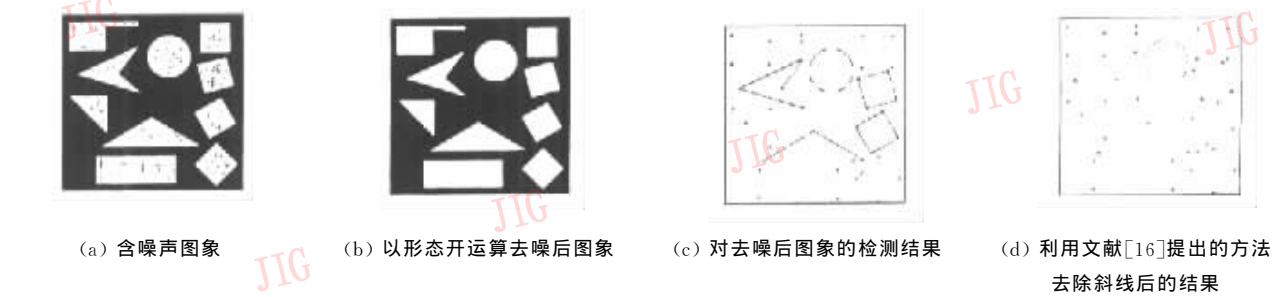


图 6 含噪声二值图象检测结果

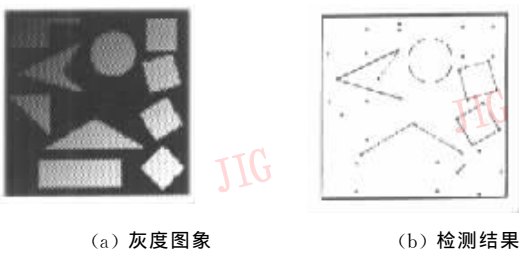


图 7 对灰度图象的检测结果

3 结 论

本文提出了一种基于形态骨架的图象拐点检测统一方法,建立了统一的硬件实现模型.该方法可以进行并行运算,且由于形态开运算不需要进行任何浮点运算,所以整个算法计算量小、运行时间短;对噪声图象,采用形态开运算进行滤波,这样在硬件实现上和检测方法统一起来,比起文献^[13],^[14]采

用的高斯滤波方法就简单得多。本算法还可应用于灰度图象中的拐点检测。实验表明,该统一算法检测准确度高,对有噪声图象的检测准确性也很好、计算量小、硬件实现简单。另外,若骨架的定义中,结构元素为紧致凸结构元素(包含原点),那么此时定义的骨架就是一种广义骨架,而对集合的补集定义的外骨架就是广义外骨架。紧致凸结构元素并不局限于具有各向同性的整体结构元素,如圆、球等,而可以在紧致凸集类中任意选择,例如有向线段等,这样就具有更广泛的用途,更有利于模式的特征提取与图象的形态分析。

参 考 文 献

- 1 Rosenfeld A K. Digital picture processing[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982.
- 2 Kitchen L, Rosenfeld A K. Gray level corner detection[J]. Pattern Recognition Letters, 1982,3(1):95~102.
- 3 Asada H, Brady M. The curvature primal sketch[J]. IEEE Trans on PAMI, 1986,8(1):2~14.
- 4 Langridge D J. Curve encoding and the detection of discontinuities[J]. CVGIP, 1982,20(1):58~71.
- 5 Medioni G, Yasumoto Y. Corner detection and curve representation using cubic B-splines[A]. In:Proc. of 1986 IEEE Intern. Conf. on Robotics & Automation[C]. San Francisco, 1986:764~769.
- 6 Fischler M A, Bolles R C. Perceptual organization and curve partitioning[J]. IEEE Trans on PAMI, 1986,8(1):100~105.
- 7 Deriche R, Blaszk T. Recovering and characterizing image features using an efficient model based approach[A]. In:Proceeding of the 1993 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C], IEEE Publication,1993:530~535.
- 8 Rohr K. Modeling and identification of characteristic intensity variations[J]. Image and Vision Computer, 1992,10(1):66~76.
- 9 Tsai D M. Boundary based corner detection using neural networks[J]. Pattern Recognition, 1997,30(1):85~97.

- 10 QJi, Haralick R M. Corner detection with covariance propagation[A]. In:Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition[C], 1997:362~367.
- 11 Quddus A, Fahmy M M. Fast wavelet-based corner detection technique[J]. Electronics Letters, 1999,35(4):287~288.
- 12 Smith S M, Brady J M. SUSAN-a new approach to low-level image processing[J]. Journal of Computer Vision, 1997,23(1):45~78.
- 13 Zhang X T, Zhao D M. Parallel algorithm for detecting dominant points on multiple digital curves[J]. Pattern Recognition, 1997,30(2):239~244.
- 14 Laganieri R. A morphological operator for corner detection[J]. Pattern Recognition, 1998,31(11):1643~1652.
- 15 吴敏金,图象形态学[M]. 上海:上海科技文献出版社,1991.
- 16 Lin Rey-Sern, Chu Chyi-Hwa, Hsueh Yuang-Cheh. Modified morphological corner detector[J]. Pattern Recognition Letters, 1998,19(3-4):279~286.



李 华 1975 年生,华中科技大学电信系 98 级博士研究生。主要研究领域为计算机图形学、数字水印隐藏技术、计算机视觉、多媒体通信、计算机网络应用等。

刘文予 1963 年生,现为华中科技大学电信系教授。目前从事数字图象处理、计算机视觉、物体变形技术等研究工作。

朱耀庭 1939 年生,现为华中理工大学电子与信息系教授,博士生导师。目前从事数字图象处理、计算机视觉、电子设备故障诊断专家系统等研究工作。



朱光喜 1945 年生,现为华中理工大学电子与信息系教授,博士生导师,系主任。长期从事计算机图象、图形处理、多媒体通信等领域的工作,获得多项研究成果,发表论文近百篇,现主要从事 CSCW、数字电视、多媒体通信等工作。