

# 一种有效的平面曲线关键点检测新方法

任金昌<sup>1</sup>, 赵荣椿<sup>1</sup>, 冯大淦<sup>2,3</sup>

(1. 西北工业大学计算机系, 陕西西安 710072; 2. 悉尼大学计算机系, 澳大利亚; 3. 香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港)

**摘要:** 平面曲线的关键点检测可用于数字曲线的直线段逼近, 因此在很多图像识别、测量及分析的场合均有重要应用. 由于一般的数字直线均为若干连续的水平、垂直、 $\pm 45^\circ$  夹角直线段合成, 称之为四个基本方向, 并将每个基本方向的最大直线段长度定义为其方向像素长度 (directional pixel length, DPL). 提出了四个定理, 证明了在相互垂直方向上的 DPL 不会同时超过 1 个像素, 而  $45^\circ$  夹角方向上 DPL 不会同时超过 2 个像素. 在此基础上, 提出并设计了一种全自动关键点检测算法. 通过和现有典型算法的实验对比, 验证了该方法在减少关键点数和时空开销方面的显著优势.

**关键词:** 关键点检测; 方向像素长度; 直线判别; 斜直线

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 05-0640-03

## A New Effective Method on Critical Point Detection of Planar Curves

REN Jin-chang<sup>1</sup>, ZHAO Rong-chun<sup>1</sup>, David D FENG<sup>2,3</sup>

(1. Dept. of Computer Science & Engg, Northwestern Polytechnical Univ, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

2. Department of Computer Science, University of Sydney, Australia;

3. Dept. of Electronics & Information Engg, The Hong Kong Polytechnic Univ, Hong Kong)

**Abstract:** Critical point detection (CPD) of planar curves can be well applied in approaching of curves using poly-lines which has very important applications in image recognition, measurement and analysis. As digital lines are commonly composed by several continuous short lines, which are horizontal ( $k$  is 0), vertical ( $k$  is 1) and  $\pm 45^\circ$  ( $k$  is  $\pm 1$ ) lines. We call these four lines basic lines and define the maximum length of every basic line as corresponded directional pixel length (DPL), which are further denoted as  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_+$  and  $L_-$ . Furthermore four theorems on DPL are proposed, based on which, an automatic algorithm for CPD is also presented. The comparisons of algorithms from Ansari-Huang, Zhu-Chindian and ours was showed. The satisfactory experimental results have demonstrated that our algorithm has apparent advantages in reducing critical point number and spatial-temporal spending.

**Key words:** critical point detection; directional pixel length (DPL); line judgment; leaning line

## 1 引言

关键点检测又可称为直线判别, 就是在连续数字曲线段上检测直线端点的过程. 由于曲线往往可以由折线段逼近, 所以关键点检测在图像中的形状识别、测量及分析等方面具有重要应用<sup>[1,2]</sup>.

现有关键点检测方法可分为空间域方法和变换域方法两类. 前者通过考察像素的位置关系直接进行关键点检测, 其典型方法有基于最小二乘的拟合法和基于邻域的关键点检测方法等<sup>[2,3]</sup>. 后者则将原始图像通过变换, 进而将空间域关键点判别问题转化为变换域参数判别问题. 比如, 基于 Hough 变换及基于小波变换的方法分别将问题转换为求参数域极值问题或一组小波描述子的判别等<sup>[4,5]</sup>.

总的来说, 变换域方法虽然可能使问题得到简化, 但在变换前后往往需要大量额外的时间和存储空间, 因此实用性较

差. 空间域方法虽然时空开销较少, 但可能因所考察邻域像素数目过多或过少, 因而存在判别精度不足或效率低等缺点.

本文通过对数字直线邻域像素分布特点的理论分析, 提出了一种自动关键点检测新方法, 在很小的时空开销下有效地解决了连续像素中的直线检测问题, 具有理论和实验两方面的优势.

## 2 数字直线中方向像素分布的特点

从函数映射的观点可将直线分为  $x$  直线和  $y$  直线两类, 前者中  $y$  是  $x$  的单值函数, 对应斜率  $|k| \leq 1$  (图1中 (a) ~



图1 像素级观点上的直线比较图 ( $k$  为斜率)

(e)); 后者中  $x$  是  $y$  的单值函数, 对应  $|k| > 1$  (图 1 中 (d) ~ (h)).

从像素级观点看, 数字直线是由垂直、水平及斜率为  $\pm 1$  的四种基本线的连续短直线构成的. 若某一数字直线中包含有 1 种以上的基本线, 称之为严格意义上的斜直线, 简称斜直线. 任一数字直线中水平、垂直、 $45^\circ$  及  $-45^\circ$  方向上直线段最大长度, 定义为该方向的方向像素长度, 并分别用  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_+$  和  $L_-$  来表示.

**定理 1** 在单个数字直线中,  $L_x > 1$  和  $L_y > 1$  不能并存. 证明略.

**定理 2** 在单个数字直线中,  $L_+ > 1$  和  $L_- > 1$  不能并存.

**证明** 下面用反证法先证明不存在这样的  $x$  直线. 假设上面条件可以共存, 则对应的  $x$  直线  $y = kx + b$  中必存在点  $x_1, x_2$  满足下面条件:

$$(y_1 - 1) + 0.5 \leq kx_1 + b < y_1 + 0.5 \quad (1)$$

$$y_1 + 0.5 \leq k(x_1 + 1) + b < (y_1 + 1) + 0.5 \quad (2)$$

$$(y_2 - 1) + 0.5 \leq kx_2 + b < y_2 + 0.5 \quad (3)$$

$$(y_2 - 2) + 0.5 \leq k(x_2 + 1) + b < (y_2 - 1) + 0.5 \quad (4)$$

其中式(1~2)和式(3~4)分别对应  $L_+ > 1$  和  $L_- > 1$  的假设. 由式(2)有:

$$y_1 + 0.5 - k \leq kx_1 + b < (y_1 + 1) + 0.5 - k \quad (5)$$

结合(1)和(5), 有  $y_1 + 0.5 - k \leq kx_1 + b < y_1 + 0.5$  即  $y_1 + 0.5 - k < y_1 + 0.5$ , 所以  $k > 0$ ;

同理, 由(3)和(4), 可得  $k < 0$ , 和上面的  $k > 0$  矛盾, 所以假设不成立, 也就是不存在同时满足  $L_+ > 1$  和  $L_- > 1$  的  $x$  直线; 同理可证不存在这样的  $y$  直线. 证毕.

**定理 3** 在单个数字直线中,  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2, L_- > 2$  不能并存.

**证明:** 由定理 2,  $L_+ > 2$  和  $L_- > 2$  显然不能并存. 现在只需证明  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2$  或  $L_- > 2$  不能并存即可. 下面用反证法证明  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2$  不能并存. 假设直线中同时存在  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2$ , 则对应的  $x$  直线  $y = kx + b$  中必存在点  $x_1, x_2, y_1, y_2$  满足下面的条件:

$$(y_1 - 1) + 0.5 \leq kx_1 + b < y_1 + 0.5 \quad (6)$$

$$(y_1 - 1) + 0.5 \leq k(x_1 + 1) + b < y_1 + 0.5 \quad (7)$$

$$(y_1 - 1) + 0.5 \leq k(x_1 + 2) + b < y_1 + 0.5 \quad (8)$$

$$(y_2 - 1) + 0.5 \leq kx_2 + b < y_2 + 0.5 \quad (9)$$

$$y_2 + 0.5 \leq k(x_2 + 1) + b < (y_2 + 1) + 0.5 \quad (10)$$

$$(y_2 + 1) + 0.5 \leq k(x_2 + 2) + b < (y_2 + 2) + 0.5 \quad (11)$$

其中式(6~8)和式(9~11)分别对应  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2$  的假设. 给不等式(6)各项加 1, 有:

$$y_1 + 0.5 \leq kx_1 + b + 1 < (y_1 + 1) + 0.5 \quad (12)$$

由式(8), (12), 有  $k(x_1 + 2) + b < y_1 + 0.5 \leq kx_1 + b + 1$ , 进而有  $kx_1 + 2k + b < kx_1 + b + 1$ , 所以  $k < 1/2$ ;

给不等式(9)各项加 1, 结合(11), 有  $kx_2 + b + 1 < kx_2 + 2k + b$ , 得  $k > 1/2$ , 和上面  $k < 1/2$  的结论矛盾. 所以假设不成立, 即  $L_x > 2$  和  $L_+ > 2$  不能并存. 同理可证  $L_x > 2$  和  $L_- > 2$  不能并存. 证毕.

**定理 4** 在单个数字直线中,  $L_y > 2$  和  $L_+ > 2, L_- > 2$  不能并存(证明同定理 3 从略).

上面定理 1、2 说明数字直线在相互垂直方向上不会同时存在超过 1 个像素, 而定理 3、4 则说明在  $\pm 45^\circ$  夹角方向上不会同时存在超过 2 个像素, 下面将依此给出自动关键点检测算法.

### 3 全自动关键点检测算法

为简化问题, 假设用于关键点检测的二值图像已经细化. 关键点检测就是自上而下、从左向右对骨架图像进行扫描的过程, 其结果将是由一系列关键点构成的折线段的集合. 定义  $D_o$  和  $D_c$  分别为起始方向和当前方向, 其中  $D_o$  是判断的起点及其邻域决定的直线方向, 而  $D_c$  指直线在当前点相对于前一像素的方向. 假设黑像素为目标点, 且  $P$  和  $P_0$  分别为当前目标点及当前折线起点, 并设  $Q_0$  与  $Q_1$  为  $P_0$  的邻点(最多有两点). 下面给出具体的判断算法:

(1) 在当前图像中搜索黑像素点  $P_0$ . 若无, 算法结束. 否则, 转(2);

(2) 若  $P_0$  的  $3 \times 3$  邻域无点, 删除  $P_0$ , 转(1). 否则, 记录  $P_0$  为折线中关键点, 取其邻域点  $Q$  令  $D_c$  和  $D_o$  均为方向,  $P = Q$  并对 DPL 初始化(除  $D_o$  方向为 1 外, 其余均为 0), 转(3);

(3) 从  $P$  点连续跟踪该线, 不断调整  $D_c$  及其 DPL 值. 当且仅当下面条件之一满足时, 转(4):

(a)  $P$  的邻域已经无点;

(b) 相互垂直的方向上 DPL 值大于等于 1(定理 1、2);

(c) 相互成  $45^\circ$  方向上 DPL 值大于 2(定理 3、4)

(4) 记录  $P$  为折线中关键点. 若  $P$  的邻域有点  $Q$ , 令  $P = Q$  并对 DPL 初始化, 转(3); 否则, 转(5);

(5) 若  $P_0$  的  $3 \times 3$  邻域无点, 转(1); 否则取  $P_0$  的邻点  $Q$  令  $D_c$  和  $D_o$  均为  $P_0Q$  方向,  $P = Q$ , 转(3).

### 4 实验结果及分析

图 2 及图 3 分别给出了针对一幅标准图像进行关键点检测的结果. 为了增强可比性, 原始图像 2(a)、3(a) 及 2(b)、2(c) 结果均来自[7], 而 2(b) 算法则源于[6].

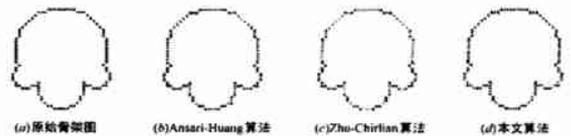


图 2 直线判别对比恢复结果(黑点为关键点)

文献[6]定义了最大像素误差  $E_{max}$  和累计平方误差  $E_{isq}$  准则, 可以对检测精度进行衡量. 对图 2 和图 3 来说, 三种算法的  $E_{max}$  和  $E_{isq}$  均为 0, 但其关键点数目不同. 图 2 中 Ansan-Huang 及 Zhu-Chirlian 算法关键点数分别为 53 和 52, 而本文算法仅为 36; 而三个算法对图 3 则得到相同的 37 个关键点.

分析图 2(a) 和图 3(a) 中的原始骨架图可以发现, 后者中每一段的 DPL 至少为 3, 由定理 3、4 则从其中任意一点出

发, 邻域方向变化的点即为关键点; 也就是说, 图 3(a) 中没有严格意义上的斜直线, 这和图 2(a) 中情况不同. 本文算法和 Ansan-Huang 算法、Zhu-Chirlian 算法的区别就在于可以有效处



图 3 直线判别结果 2, 其中用 Ansan-Huang Zhu-Chirlian 和本文算法可以获得相同的结果

理一般斜直线的情形, 所以在图 2(a) 中的关键点判别中才可以取得较好的结果.

下面对本文算法进行效率分析: 设  $n$  和  $m$  分别为骨架图像黑像素数目及关键点数, 从时间复杂度看, 算法仅为加减运算, 且其时间复杂度为  $O(n)$ ; 而 Zhu-Chirlian 算法的时间开销中加法为  $O(n)$ , 且包含乘法及  $\Gamma$  形点的判别等<sup>[8]</sup>, 效率远比本算法低. 从空间复杂度看, 除折线关键点外, 算法在执行过程中只需要存储步差、起始跟踪点  $P_0$ 、 $P_0$  的邻点、 $D_c$ 、 $D_o$  及其 DPL 值等, 所以空间开销仅为  $O(m)$ , 而关键点是必须另行记录的, 所以本文算法的空间消耗几乎达到最优.

## 5 结语

本文通过理论分析, 提出并设计了一种关键点检测算法, 用于图像分析或识别中曲线的多边形逼近. 和现有的算法相比, 本文算法在减少关键点数和时空开销方面均有显著提高.

### 参考文献:

- [1] Alan J F, Robert F. Automated conversion of engineering drawings to CAD form [J]. Proc. Of IEEE, 1992, 80(7): 1195-1209.
- [2] Mokhtarian F, Mackworth A K. A theory of multiscale, curvature-based shape representation for planar curves [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1992, 14(8): 789-805.
- [3] Zhu Y, Seneviratne L D. Optimal polygonal approximation of digitized curves [J]. IEE Proceedings on VISIP, 1997, 144(1): 8-14.

- [4] Pao D C W, Li H F, Jayakumar R. Shapes recognition using the straight line hough transform; theory and generalization [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1992, 14(11): 1076-1089.
- [5] Chuang G C H, Kuo C C J. Wavelet descriptor of planar curves; theory and applications [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1996, 5(1): 56-70.
- [6] Teh C, Chin R. On the detection of dominant points on digital curves [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11(8): 859-872.
- [7] Zhu P F, Chirlian P M. On critical point detection of digital shapes [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1995, 17(8): 737-748.

### 作者简介:



任金昌 男, 1970 年 3 月生于陕西乾县, 现为西北工业大学计算机系副教授, 博士, 1998-2001 曾两次在香港理工大学做合作研究, 目前主要研究兴趣为视频等多媒体信号处理、存储检索, 计算机视觉和模式识别等领域, 荣获省部级以上科技进步奖 6 次, 发表论文 20 余篇.



赵荣椿 男, 1937 年 11 月生于辽宁岫岩, 现为西北工业大学计算机系教授, 博导, 目前主要研究兴趣为语音、图像处理, 计算机视觉与模式识别等领域, 发表论文 100 余篇.



冯大淦 男, 澳籍华人, 博士/教授, IEEE 高级会员, 目前主要研究兴趣为多媒体信息处理、生物医学和功能图像、模拟仿真、快速算法缩等, 已发表重要论文 50 余篇.