

文章编号:1001-9081(2009)03-0747-03

# 一种改进的 Ribbon Snake 遥感图像道路自动生成算法

胡 阳<sup>1,2</sup>, 祖克举<sup>3</sup>, 李光耀<sup>1</sup>, Kacem CHEHDI<sup>2</sup>

(1. 同济大学 CAD 研究中心, 上海 201804;

2. 法国雷恩第一大学 多模多组态信号处理实验室, 法国 雷恩 22305;

3. 同济大学 宽带无线通信与多媒体实验室, 上海 201804)

(cinderella2169@yahoo.com.cn)

**摘要:** 针对树木或高大建筑物遮挡以及噪声等因素造成道路提取结果不完整的现象, 根据道路的几何特征, 在 Snake 模型中加入道路宽度信息, 构造 Ribbon Snake 模型。为了克服模型对内部参数依赖性较大、容易受到复杂背景干扰影响的不足, 采用 B 样条曲线对道路的平滑性进行约束, 与 Ribbon Snake 相结合建立道路提取算法, 通过调节控制点的数目增强曲线的灵活性。从改进的 B 样条 Ribbon Snake 的道路网分割结果可以看出, 分割的结果更加平滑, 精度更高, 对噪声具有更好的鲁棒性。

**关键词:** 道路提取; Snake 模型; Ribbon Snake; B 样条 Snake

中图分类号: TP391.41 文献标志码:A

## Improved Ribbon Snake algorithm for automatic road generation

HU Yang<sup>1,2</sup>, ZU Ke-ju<sup>3</sup>, LI Guang-yao<sup>1</sup>, Kacem CHEHDI<sup>2</sup>

(1. CAD Research Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Laboratory of Multicomponents and Multimodals Signals and Images Processing, University of Rennes 1, Lannion 22035, France;

3. Broadband Wireless Communication and Multimedia Laboratory, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to modify the incomplete road extraction caused by shadow, shelter and noise in high resolution remote sensing images, a Ribbon Snake model with width information was established based on the geometric characteristics of road. To overcome the great dependence of interior parameters and the easy being affected by the complex background of Ribbon Snake, a B-Spline Ribbon Snake was constructed, where the smoothness of the Snake was implicit in the B-spline formulation and the flexibility of the Snake was adjusted by the number of control points. The road network segmentation results show that the improved B-spline Ribbon Snake can obtain a more accurate and smoother segmentation and is more robust to noise.

**Key words:** road extraction; Snake model; Ribbon Snake; B-spline Snake

## 0 引言

典型的全自动遥感图像道路网信息提取一般分为道路种子生成、道路跟踪和道路网生成三部分。由于树木或高大建筑物遮挡以及噪声等因素的影响, 存在道路种子提取位置不准确或漏检、道路段连接不平滑或不完整等现象, 在道路网生成过程中需要在更加全局的意义上加以完善。

Kass 等人在第一届计算机视觉国际会议上提出的活动轮廓模型<sup>[1]</sup> (又称为 Snake), 是一种有效的寻找目标轮廓的搜索算法, 具有良好的提取、跟踪特定区域内目标边缘的能力, 在国内外已被广泛用在边缘检测、建模、图像分割和运动跟踪等方面。在遥感图像道路提取中, Laptev 等人在研究使用活动轮廓模型提取显著道路时, 提出 Ribbon Snake 方法<sup>[2]</sup>, 用来提取带状区域的两条边线。

然而实际应用中, Ribbon Snake 模型也具有其自身的不足: 对内部参数依赖性大, Snake 迭代过程中容易被复杂背景吸引等。在分割对象确定的情况下, 在模型中融入待提取目标的先验信息是一种有效的解决上述问题的途径。本文根据道路的几何约束, 构造 B 样条 Ribbon Snake, 增加对道路的平滑约束, 降低 Snake 对细小岔路等复杂背景的敏感度。从改

进的 B 样条 Ribbon Snake 道路生成结果可以看出, 分割的结果更加平滑, 对噪声具有更好的鲁棒性。

## 1 Ribbon Snake 模型

原始 Snake 模型在图像中目标边界附近给出一条封闭的初始轮廓曲线, 轮廓曲线的能量由内部能量和外部能量两部分组成。最小化能量时产生内力和外力, 轮廓曲线在自身的内力和由图像数据产生的外力共同作用下运动(变形), 运动的最终结果使得轮廓曲线与图像中目标边界或与图像中期望检测到的特征形状相一致<sup>[3-6]</sup>。文献[2]在原始 Snake 算法中加入了宽度成分构造 Ribbon Snake, 其参数化曲线用  $v(s, t)$  表示, 并且加入了宽度参数  $w(s, t)$ , 定义为:

$$v(s, t) = (x(s, t), y(s, t), w(s, t)); 0 \leq s \leq 1 \quad (1)$$

式(1)中  $s$  与 Ribbon 的长度成比例,  $t$  为当前时刻,  $x$  和  $y$  则是 Ribbon 中心线位置的坐标, 而  $w$  是与中心线相垂直的 Ribbon 的宽度的一半。

如图 1 所示, 中心线  $(x(s, t), y(s, t))$  和宽度  $w(s, t)$  定义了 Ribbon 的左右两边,  $v_L(s, t)$  和  $v_R(s, t)$ 。与传统 Snake 相比, Ribbon Snake 的内部能量表达式依然保持不变, 而图像力则是沿着 Ribbon 的两边的, 宽度与  $x$  和  $y$  坐标成分受到同

收稿日期:2008-09-11;修回日期:2008-11-10。

作者简介:胡阳(1977-),女,黑龙江哈尔滨人,讲师,博士研究生,主要研究方向:数字图像处理与应用; 祖克举(1976-),男,吉林长春人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像及视频信号处理; 李光耀(1965-),男,安徽安庆人,教授,博士生导师,主要研究方向:大规模城市建模与仿真、计算机图形图像; Kacem CHEHDI,男,法国人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像及信号处理。

样的张力和刚性的约束。假定道路与周围场景具有鲜明的对比度并具有亮的灰度属性,相应地,当从明亮的道路到黯淡的背景来优化 Ribbon 的过程中,图像函数  $P$  可以被重新定义为沿着  $v_L(s, t)$  和  $v_R(s, t)$  方向的图像梯度级的总和。也可以将图像梯度投影到 Ribbon 的归一化法向量  $\mathbf{n}(s, t)$  上,并使投影在 Ribbon 的左边为正值,右边为负值。

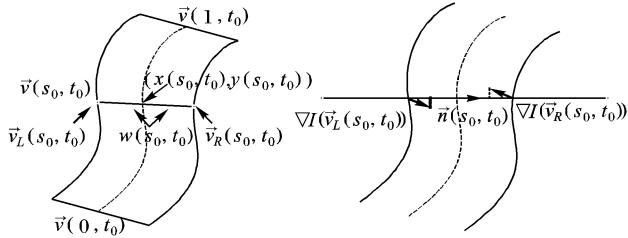


图 1 Ribbon Snake 的参数化表示

能量模型中的外部能量函数表示为:

$$P(v(s, t)) = (\nabla I(v_L(s, t)) - \nabla I(v_R(s, t))) \cdot \mathbf{n}(s, t) \quad (2)$$

Ribbon Snake 的全局能量与相应的原始 Snake 能量公式保持一致:

$$E(v) = - \int_0^1 P(v(s, t)) \, ds + \frac{1}{2} \int_0^1 \alpha(s) \left| \frac{\partial v(s, t)}{\partial s} \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{\partial^2 v(s, t)}{\partial s^2} \right|^2 \, ds \quad (3)$$

式(3)中的第一部分表示了图像能量,而第二部分对应内部能量。 $\alpha(s)$  和  $\beta(s)$  为确定最优化中几何约束影响大小的任意函数。

此外,可通过将条件  $\int E(v) + D(v) \, dt$  最小化来实现优化过程中对 Ribbon 运动的约束和控制。此处  $D$  是一个分散函数,  $D(v) = \frac{1}{2} \int_0^1 \gamma(s) |v_i|^2 \, ds$ ,  $\gamma$  是阻尼系数。对于离散形式的 Ribbon, 具有  $n$  个顶点,  $\gamma$  可以通过  $\gamma = \frac{\sqrt{2n}}{\Delta} \left| \frac{\partial E(v)}{\partial v} \right|$  求得。

如文献[7]所示,这保证了在优化过程的一步中 Ribbon 的每一个顶点的位移平均起来都在  $\Delta$  数量级。在优化开始的时候,选择较大的  $\Delta$  值(20~30 像素),之后逐渐减小,以缩小 Ribbon 的搜索区域。

## 2 改进的 B 样条 Ribbon Snake

由 Snake 模型的机理可知,Snake 模型的内力保持 Snake 平滑。在遥感图像道路提取的实际应用中,Ribbon Snake 提取结果极大地依赖于内部参数,且受噪声影响较大,平滑性较差,曲线容易受到细小岔路等复杂背景的吸引。

采用 B 样条曲线<sup>[8]</sup>对道路进行描述的好处在于:Snake 模型的平滑约束已经隐含在 B 样条曲线中,调整一个控制点的位置只能引起一小部分曲线的变化,易于实现曲线对于局部的控制,增强了模型的灵活性。因此,B 样条曲线很好地对道路平滑性进行约束,增强了提取结果的准确性和平滑性。B 样条可以根据需要,选择闭合或者打开的形式,并且可以在每个节点连续定义。控制点选取得越多,曲线越灵活:每增加一个控制点,曲线可以进行更大的形变。

本文中的改进 B 样条 Ribbon Snake 通过三次 B 样条曲线对 Snake 进行平滑约束。三次 B 样条由  $m+1$  个控制点指定:  $p_0, p_1, \dots, p_m$ , 并且包含  $m-2$  个三次曲线段:  $r_3, r_4, \dots, r_m$ 。每条曲线之间的连接点称为节点(knots)。曲线方程为:

$$r_i(s_i) = \frac{1}{6} [s_i^3 \quad s_i^2 \quad s_i \quad 1]$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-3} \\ p_{i-2} \\ p_{i-1} \\ p_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $0 \leq s_i \leq 1$ , 并且  $3 \leq i \leq m$ 。为了便于描述,可以将样条曲线用单个参数  $s$  表示,其中,  $f_i$  为样条基函数且  $0 \leq s \leq 1$ :

$$r(s) = \sum_{i=3}^m f_i(s) p_i \quad (5)$$

如图 2 所示,沿着曲线均匀分布的  $n$  个采样点  $r(s_1), \dots, r(s_n)$  计算局部力。在每个采样点,沿着样条曲线的法线方向进行一维搜索,找到  $p(x, y)$  的局部最小值  $y(s_i)$ : 目标点记为  $y(s_1) \dots y(s_n)$ 。每个采样点上的外力与采样点和目标点的距离成比例,即:

$$E_{\text{ext}} = \sum_{i=1}^n \left( y(s_i) - \sum_{j=3}^m f_j(s_i) p_j \right)^2 \quad (6)$$

通过线性最小二乘法对能量  $E_{\text{ext}}$  进行最小化来对控制点的位置进行更新。控制点的一维搜索和估计重复进行,直到 Snake 达到平衡状态。

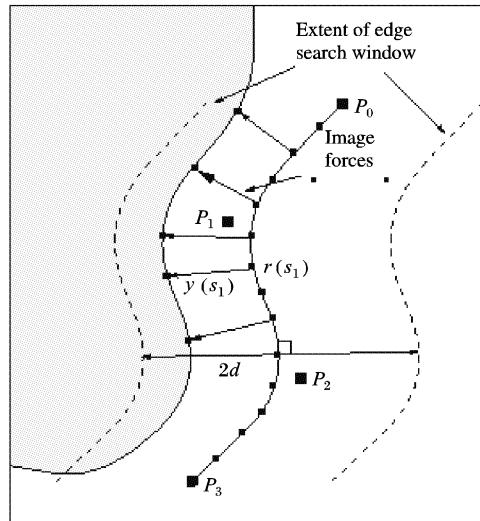


图 2 B 样条 Snake

在采样点集上的一系列外力作用下,Snake 进行运动。每个外力都与采样点和目标点之间的距离成比例。通过沿着样条曲线的法线方向搜索感兴趣的图像特征,得到目标点。Snake 达到平衡后,得到边界的紧凑描述。

采用 B 样条进行分割的难点在于如何确定控制点。为了提高道路网生成的质量,本文中采取 Canny-Deriche 边缘检测与模糊 C 均值(Fuzzy C-Mean, FCM)分类相结合的方法,排除噪声及不必要的细节信息,准确定位道路的种子点,并在此基础上采用卡尔曼滤波方法来确定三次 B 样条曲线的控制点<sup>[9]</sup>。由于道路跟踪的步长为 5 个像素,因此样条曲线具有多个控制点,从而避免了曲线过度平滑而不能充分描述道路边缘。

综上,改进的 B 样条 Ribbon Snake 算法的实现步骤为:

- 1) 检测道路种子点;
- 2) 进行卡尔曼道路跟踪,得到道路中心初始点;
- 3) 将道路中心点作为 B 样条 Snake 的控制点,生成样条曲线;
- 4) 在 B 样条曲线基础上构造 Ribbon Snake;
- 5) 迭代 B-spline Ribbon Snake, 对遥感图像道路进行分割。

### 3 实验结果及分析

为验证本文算法的有效性,在有建筑物或树木遮挡的遥感图像、存在岔路及树木遮挡截断道路的遥感图像上提取道路网。

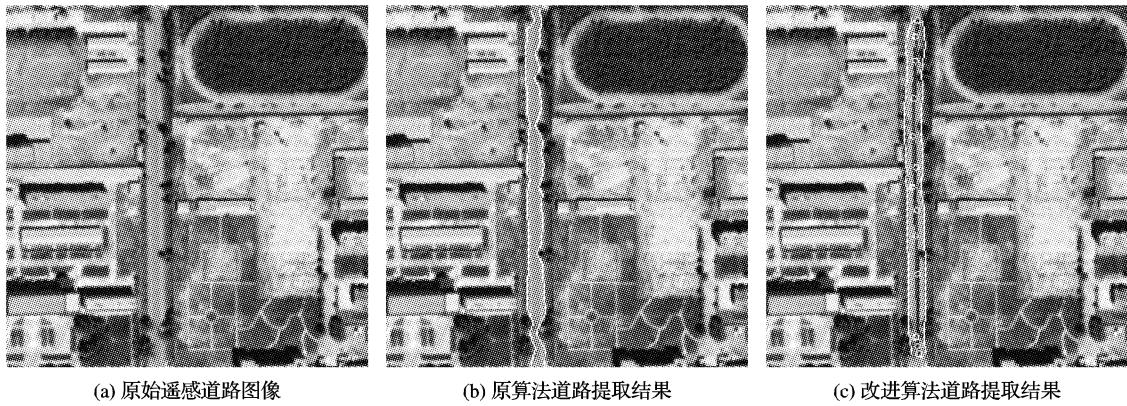


图3 树木遮挡的遥感图像道路提取结果

图3(a)为原始遥感图像,在路的一侧树木遮挡了部分路面。对于直路的提取,主要需要克服各种遮挡的影响,最终得到道路的平滑边界。图3(b)给出了原始 Ribbon Snake 在参数为  $\alpha = 0.2, \beta = 0.8$  时得到的较理想的结果。但是,从提取的道路结果可以看出,算法在出现树木遮挡的部分过度收敛到细节部分,不能得到平滑的道路网。通过反复的调整模型参数,可以发现算法对内部参数依赖性较大,如果平滑系数  $\alpha$  值较小,对曲线的平滑约束太小,曲线运动受到噪声的干扰很大;而在  $\alpha$  值较大时,对曲线的平滑约束太强,难以收敛到正确的道路边界。图3(c)为改进的 B 样条 Ribbon Snake 道路提取结果。实验中通过种子点提取和卡尔曼跟踪得到的道路

分别利用 Ribbon Snake 和改进的 B 样条 Ribbon Snake 分别对两种不同类型遥感图像道路进行了道路网生成实验。首先,在有建筑物或树木遮挡的遥感图像上进行道路提取(文中主要遮挡物是树木)。图3给出了我国青海省某处的遥感图像道路提取结果。

中心线初始位置,在线上取 13 个点作为样条曲线的控制点,其他参数同上。从提取结果可以看出,改进模型通过 B 样条曲线的约束,在模型中融入了道路特征的先验信息。提取结果克服了树木遮挡的影响,得到了平滑的道路边界。同时,B 样条的引入降低了 Ribbon Snake 模型对内部参数的依赖。在相同参数设置的情况下,无需反复调整模型参数即可自动得到平滑的道路网。

图4给出了对弯曲道路的提取实验。图4(a)为原始遥感图像,与图3(a)的直路图像相比,图4(a)在转弯处道路受树木遮挡较为严重,甚至完全将道路截断。在右上部,几乎一半的路面都被遮挡,而在图像的底部则有细小的分岔路。

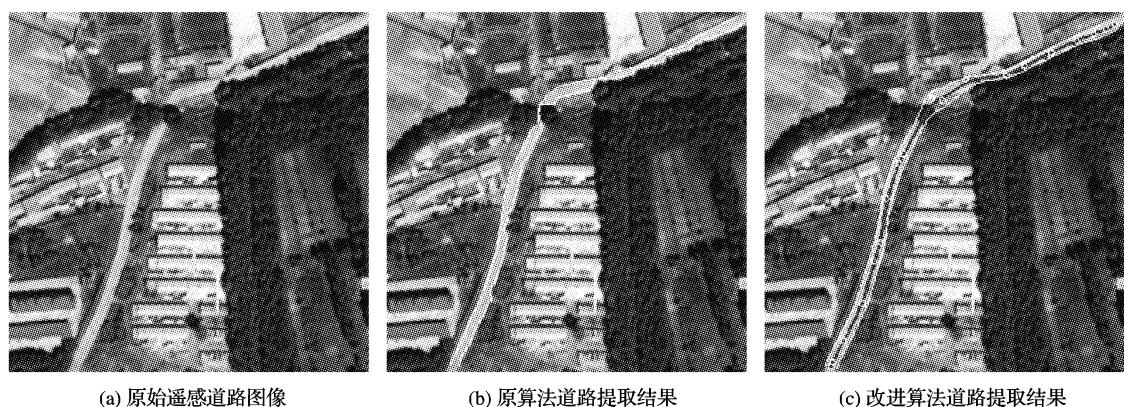


图4 道路方向变化并有细小岔路及阴影遮挡的提取结果

图4(b)为采用与上述实验相同参数的情况下,Ribbon Snake 算法的提取结果。在道路方向发生变化时,提取结果受干扰影响很大:特别是在道路被树木截断的部分,模型两侧边界受到树木轮廓产生的图像力作用发生扭曲,破坏了模型参数的初始假设,因此不能得到正确的道路提取结果;而在其他树木及小的分岔路干扰的部分,提取结果也出现了不平滑。图4(c)为改进的 B 样条 Ribbon Snake 算法的提取结果。实验中采用 19 个控制点,其他模型参数同上。从图中可以看出,模型在道路的弯曲部分分配了更多的控制点,使曲线具有更大的形变能力,从而对弯曲的道路能够进行准确的提取。对于树木截断的道路部分,提取结果很好地体现了道路全局约束的作用,避免了图4(b)所示的两侧边界重叠。另外,在树木以及细小分岔路干扰的部分,与上一个实验一样,改进的算法仍然可以得到平滑的提取结果。

### 4 结语

根据道路的几何特征,在 Snake 模型中加入道路宽度信息,构造 Ribbon Snake 模型对遥感道路分割已经成为道路提取算法的研究重点。然而模型的不足之处在于,曲线对内部参数依赖性较大,且容易受到复杂背景的吸引。如何采用有效的机制兼顾道路提取结果的准确性和平滑性是该领域的研究难点。本文中采用道路种子点提取算法结合卡尔曼道路跟踪算法,从而能够对道路中心线进行有效的自动初始化。充分结合遥感图像中道路的几何约束,构造 B 样条 Ribbon Snake,将 Snake 的平滑约束隐含在 B 样条描述中,并通过控制点的数量调节曲线的灵活性。从改进的 B 样条 Ribbon Snake 的道路分割结果可以看出,分割的结果更加平滑,精度更高,对噪声具有更好的鲁棒性。  
(下转第 791 页)

$a^2 + b^2 = c^2$  识别出来的公式序列是:“a 1 2 4 + 1 b 1 2 4 = 1 c 1 2 4”,在转换程序中,读入识别出来的字符序列,然后根据 MathML 的语法规规定,将其转换为 MathML 的描述。由于 MathML 规范中分为语义表达和内容表达两种情况,在实验系统中仅使用了内容描述一种方法。另一方面,如何将基于内容的 MathML 到基于语义的 MathML 转换也是很方便的。

例如要进行识别的公式如图 3 所示。

$$f(n) = \frac{12n^3 - 6/2}{35x^2 - x + 1}$$

图 3 一个演示用的数学公式

经过 MFRS 处理后识别出来的序列如图 4 所示。

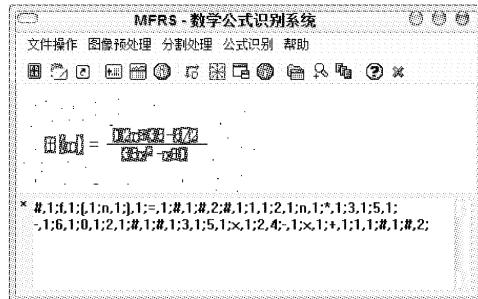


图 4 识别结果

上述识别结果序列中的#号后的数字含义是:1—左右结构;2—上下结构;3—杂合结构。字符和符号后面的数字的含义是:1—居中,2—上方,3—下方,4—右上方,5—右下方。“#;1; f,1; (,1;n,1,);1,=,1;#,1;”表示的“ $f(n) =$ ”表示其整体结构是左右型的,以“#;1”开始,到“#,1”结束来描述;而“#,2;#,1;1,1;2,1;n,1,\* ,1;3,1;5,1; -,1;6,1;0,1;2,1;#,1;#;1,3;1;5,1;”表示的是分式部分。其中“#,1;1,1;2,1;n,1,\* ,1;3,1;5,1; -,1;6,1;0,1;2,1;#,1;”部分表示分子,“#,1;3,1;5,1;x,1;2,4; -,1;x,1; + ,1;1,1;#,1;#;2;”表示分母。

经过 VC++ 编程,得到转换后的、能够在浏览器中显示的文本形式。在 Firefox 浏览器中显示的结果如图 5 所示。

### 3 结语

从数学公式位图到数学公式的 MathML 描述,尽管它呈现的形式没有发生变化,但在实质上有了根本性的不同。一种是图像表示,另一种是文本描述。本文所做的工作,就是通过 MFRS 这一初步的实验系统,来完成公式图像的读入、处理,将其转换为 MathML 文本表示的形式,最终交付

给浏览器显示。

在 MFRS 这一简单实验系统中,我们还只是局限于实验阶段,还需进一步的改进和提高。今后我们要克服的问题和研究的方向主要有:第一,MFRS 中的模板还很不全面,这就使得我们还只能局限在对于简单的数学公式进行识别处理。模板的建立还未能动态化、程序化,提取的特征还不够多。第二,MFRS 还只是基于内容来进行数学公式识别。尽管要达到基于语义级别来进行公式识别还需要很长时间,但这是人们的努力方向。

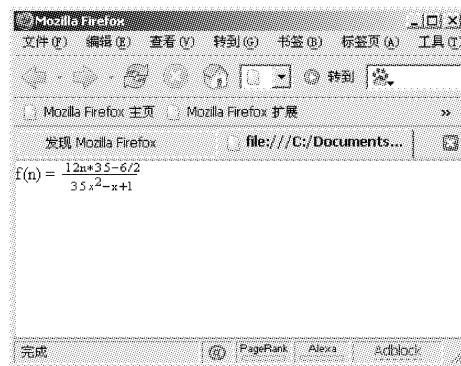


图 5 演示公式在浏览器中显示的结果

### 参考文献:

- [1] ETO Y, SUZUKI M. Mathematical formula recognition using virtual link network[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 430–437.
- [2] OKAMOTO M, MIAO B. Recognition of mathematical expressions by using the layout structures of symbols[C]// ICDAR'91. France: [s. n.], 1991: 242–250.
- [3] CHAUDHURI B B, GARAIN U. An approach for recognition and interpretation of mathematical expressions in printed document[J]. Pattern Analysis and Applications, 2000, 3(2): 120–131.
- [4] 江红英,靳简明,王庆人. 基于统计特征的印刷体数学公式上下标关系判别[J]. 计算机工程与应用,2003, 39(28): 75–78.
- [5] 李军国,张立昂. 基于 XML 的网上数学表达式显示技术[J]. 北京大学学报:自然科学版,2003, 39(5): 675–680.
- [6] 王科俊,林桂芳,王黎斌. 数学表达式识别方法综述[J]. 自动化技术与应用,2003, 22(8): 1–6.
- [7] 刘峰,袁春风. 基于 MathML 的数学表达式等价性的研究[J]. 计算机应用研究,2003, 21(11): 54–56.
- [8] 王黎斌. 印刷体数学公式识别中公式提取和符号定位[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.
- [9] 程进. 基本数学公式识别技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2004.
- [5] ROCHERY M, JERMYN I, ZERUBIA J. RR5656, Higher-order active contours[R]. Paris: INRIA, 2006.
- [6] CREMERS D, ROUSSON M, DERICHÉ J. A review of statistical approaches to level set segmentation: integrating colors, texture, motion and shape[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 72(2): 195–215.
- [7] FUA P, LECLERC Y G. Model driven edge detection[J]. Machine Vision and Applications, 1990, 3(1): 45–56.
- [8] BLEVIENAISE-OBADIA B, GEE A. Adaptive segmentation of ultrasound images[EB/OL]. [2008-09-01]. <http://www.bmva.ac.uk/bmvc/1997/papers/047/node2.html>.
- [9] GEORGE V, KNECHT J D. Road tracing by profile matching and Kalman filtering[C]// Proceedings of the Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhäuser, Germany: [s. n.], 1995: 265–274.

(上接第 749 页)

### 参考文献:

- [1] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321–331.
- [2] LAPTEV I, MAYER H, ECKSTEIN W, et al. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale and space and snakes[J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12(1): 23–31.
- [3] ROCHERY M, JERMYN I, ZERUBIA J. Phase field models and higher-order active contours[C]// Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 970–976.
- [4] BHATTACHARYA A, JERMYN I, DESCOMBES X, et al. Computing statistics from a graph representation of road networks in satellite images for indexing and retrieval[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Georgia, USA, IEEE Computer Society, 2006: 244–250.