

Chan-Vese图像分割模型的快速实现算法的研究

蒋宁¹, 章日康¹, 蒲立新², 陈伟建³

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054;

3. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

【摘要】重初始化是水平集方法耗时的一个主要原因, 通过将水平集函数与符号距离函数的偏差作为能量项引入C-V模型, 以此来约束水平集函数成为符号距离函数, 从而去掉了重初始化步骤。在检测多目标时, 采用了曲线族代替单曲线作为初始曲线。在数值算法上, 利用加性可操作分裂算子(AOS)消除了对时间步长的限制, 可以选择大步长, 从而加速了演化过程而且绝对稳定。实验结果表明, 分割速度相对于经典的C-V模型有了很大的提高, 而精度损失可以忽略。

关键词 加性可操作分裂算子; C-V模型; 图像分割; 水平集
中图分类号 TP391 文献标识码 A

Research of Fast Approach for Chan-Vese Model

JIANG Ning¹, ZHANG Ri-kang¹, PU Li-xin², and CHEN Wei-jian³

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

3. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The reinitialization process is quite time-consuming in level set method. A new variational formulation which is the difference between the level set function and the signed distance function is introduced to C-V model. In this way, the level set function is forced close to a signed distance function, and therefore completely eliminates the need of the constly re-initialization procedure. Also, when detecting more than one object, a group of curves are choosed to be the initial curve. In the numerical implementation, AOS scheme is adopted to eliminates limit of time step. So the large time step can be selected to accelerate the evolution velocity. The result shows that the evolution velocity is greatly improved and the precision doesn't reduce.

Key words AOS; C-V mode; image segmentation; level set

文献[1]在Mumford-Shah模型的基础上提出了一个停止项不依赖于梯度而是依赖于图像全局信息的特定的分割模型, 简称C-V模型。该模型克服了Snake模型对初始曲线位置有严格要求的缺点, 但是由于用到了水平集方法把二维曲线嵌入到三维来演化, 使模型相当耗时。而关于水平集的快速算法大部分是基于文献[2-3]的, 最近的研究可以参考文献[4-5]。本文主要针对C-V模型, 在模型本身、初始条件、数值算法方面来加以改进, 提高分割速度。

1 改进的C-V模型

C-V模型在实现过程中, 把初始曲线C嵌入到水平集函数 Φ 中, 并用 Φ 的零水平表示C, 对 Φ 直接进行演化, 隐含的包括了C的演化, 只要在 Φ 演化完毕后, 取 Φ 的零水平集就得到最终的分割结果。C-V模

型的水平集表示为:

$$F_1(c_1, c_2, \Phi) = \mu \int_{\Omega} |\nabla H(\Phi)| dx dy + \nu \int_{\Omega} |H(\Phi)| dx dy + \lambda_1 \int_{\Omega} |H(\Phi) - u_0(x, y) - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\Omega} |1 - H(\Phi) - u_0(x, y) - c_2|^2 dx dy$$

这里的水平集函数 Φ 须构造为符号距离函数, 但是, Φ 在演化过程中, 经过少量的迭代后, 就会背离符号距离函数。为了保持演化时的稳定, 传统的水平集方法不得不进行重新初始化。但是, 作为一种数值修正, 重初始化的代价是昂贵的, 使算法速度大大降低了。文献[6]从符号距离函数本身的性质考虑, 在模型中加入了一项控制水平集函数接近符号距离函数的能量项, 这样在演化过程中, 曲线

收稿日期: 2007-04-02; 修回日期: 2007-10-11

基金项目: 信息产业部电子发展基金([2006]549)

作者简介: 蒋宁(1958-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事变分水平集方法、图像分割方面的研究。

可以自动保持为大概的符号距离函数, 消除了重初始化带来的额外代价, 大大提高了分割速度。该能量项可表示为:

$$F_2(\Phi) = \frac{1}{2} \beta \int_{\Omega} (|\nabla \Phi| - 1)^2 dx dy$$

把该项加入到C-V模型就可以去掉重初始化步骤。另外C-V模型没有很好利用图像的边缘信息, 因此在原模型上再加入了分割前后图像的梯度差, 其水平集表示为:

$$F_3(b_1, b_2, \Phi) = \alpha_1 \int_{\text{inside}(c)} (|\nabla u_0(x, y)| - b_1)^2 dx dy + \alpha_2 \int_{\text{outside}(c)} (|\nabla u_0(x, y)| - b_2)^2 dx dy$$

结合上述分析可得改进后的C-V模型为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

然后利用梯度下降流方程可得最终的演化方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = & -\frac{\partial F}{\partial \Phi} = \mu \delta(\Phi) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right) + \\ & \beta \operatorname{div} \left(\left(1 - \frac{1}{|\nabla \Phi|} \right) \nabla \Phi \right) + \\ & \delta(\Phi) (\alpha_2 (|\nabla u_0(x, y)| - b_2)^2 - \\ & \alpha_1 (|\nabla u_0(x, y)| - b_1)^2 + \\ & \lambda_2 (u_0 - c_2)^2 - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 - \nu) \end{aligned}$$

式中 H 为Heaviside函数; δ 为Dirac量; μ 、 ν 、 λ_1 、 λ_2 、 α_1 、 α_2 为常数; b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 的值可通过固定 Φ 求得, 具体解法可参考文献[1]。

2 数值实现

传统的水平集数值实现方法都是采用文献[7-8]提出的显式迭代方案, 该方案实现简单, 计算 $n+1$ 层的数据只要计算前 n 层就可以。但是, 显式格式是一种条件稳定的数值方法, 为了保证算法的稳定性, 就需要采用很小的时间步长, 那么就导致了迭代次数的增加, 使得在计算时非常低效。为此, 本文采用了文献[9-10]提出的应用到非线性扩散中的AOS算法, 它是一种特殊的半隐迭代方案。

首先用一个简单的偏微分等式来说明AOS算法, 该等式如下:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \operatorname{div}(g(\nabla \Phi) \nabla \Phi) \quad (1)$$

它的半隐格式表示为:

$$\Phi^{n+1} = (I - \sum_{l \in (x, y)} \tau A_l(\Phi^n))^{-1} \Phi^n \quad (2)$$

AOS格式表示为:

$$\Phi^{n+1} = \frac{1}{2} \sum_{l \in (x, y)} (I - 2\tau A_l(\Phi^n))^{-1} \Phi^n \quad (3)$$

通过泰勒展开可以验证半隐格式和AOS格式相差了一个 $O(\tau^2)$ 项。这个误差并不影响整个模型的精确度。也就是说AOS格式是在同一个数量级上对原来模型的近似。很显然, 得到了半隐格式的一种特例: AOS差分格式。它继承了半隐格式的绝对稳定和计算简便等特性, 并且不增加模型的误差。另外, $A_l(\Phi^n)$ 是一个三对角严格对角优势矩阵, 因此式(3)方程可以利用追赶算法很容易解出。追赶算法只要做 $5N-4$ 次乘除和 $3N-3$ 次加减, 它的线性复杂度 $O(N)$, 相比半隐格式 $O(N^2)$ 的复杂度, 效率高很多。

把AOS应用到本文模型中可得如下演化公式:

$$\Phi^{n+1} = \frac{1}{2} \sum_{l \in (x, y)} (I - 2\tau A_l(\Phi^n))^{-1} (F'(\Phi) + \Phi^n)$$

其中:

$$F'(\Phi) = \tau \delta(\Phi) (\lambda_2 (u_0 - c_2)^2 - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 - \nu)$$

$$\delta(z) = \frac{\varepsilon}{\pi(\varepsilon^2 + z^2)}$$

$$A_l(\Phi^n) = (a_{ij}(\Phi^n)) :=$$

$$\begin{cases} (\delta_i^n) \mu \frac{g_i^n + g_j^n}{2h^2} + \beta \frac{g_i^m + g_j^m}{2h^2} & j \in N(i) \\ -(\delta_i^n) \mu \sum_{k \in N(i)} \frac{g_i^n + g_k^n}{2h^2} - \beta \sum_{k \in N(i)} \frac{g_i^m + g_k^m}{2h^2} & \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$g = \frac{1}{|\nabla \Phi|}, g' = 1 - \frac{1}{|\nabla \Phi|}$$

式中 $N(i)$ 代表像素 i 在 l 方向(二维情况就是 x, y 方向)的相邻点; h 代表网格的大小。

至此, 整个模型的数值方案解决完毕, 具体的AOS算法步骤如下:

(1) 求解三角矩阵方程组中 x 方向的值。

$$\Phi_x^{n+1} = (I - 2\tau A_x(\Phi^n))^{-1} (F'(\Phi) + \Phi^n)$$

(2) 求解三角矩阵方程组中 y 方向的值。

$$\Phi_y^{n+1} = (I - 2\tau A_y(\Phi^n))^{-1} (F'(\Phi) + \Phi^n)$$

(3) 对求得两个方向的分量和进行平均。

$$\Phi^{n+1} = \frac{1}{2} (\Phi_x^{n+1} + \Phi_y^{n+1})$$

(4) 计算 $\Phi^{n+1} - \Phi^n$, 如果 $\Phi^{n+1} = \Phi^n$, 则停止迭代; 否则, 继续步骤(1)~(3)的过程。

3 实验结果

本文的实验结果是通过一系列不同形态的合成和实际图像得到的。实验的硬件环境为Pentium III 800 MHz, 512 KBRAM, 软件环境为Matlab 7.0。实

验参数设置如下： $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ ， $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ ， $\nu = 0$ ， $h = \varepsilon = 1$ ， $\tau = 5$ ， μ 是一个尺度系数，当只希望检测大目标时， μ 值可以设置的大些，反之亦然，本文将在每个具体的实验中给出具体的 μ 值。 β 在满足 $\tau\beta \leq 0.05$ 时，模型演化一般是稳定的，本文取 $\beta = 0.005$ 。

首先分别用C-V模型和改进后的快速C-V模型(用FCV代表)分别对一幅 120×120 含有不同形状边缘模糊的复合图进行检测，如图1所示。上两幅图分别是FCV模型迭代5步和15步的情况，图像中间的圆曲线代表初始曲线，下两幅图是C-V模型迭代150步和300步的情况。从图中可以看出，两种模型都可以自动改变拓扑形状，把不同形状的目标都检测出来。另外，还能成功的把内圆环检测出来，这是基于边缘信息的模型，是测地线模型(GAC)^[1]等做不到的。但是两种模型在速度上有着巨大的差异，由于FCV模型中采用了AOS算法，可以选择大的时间步长，使迭代步数和演化时间大大降低了。模型的比较如表1所示。

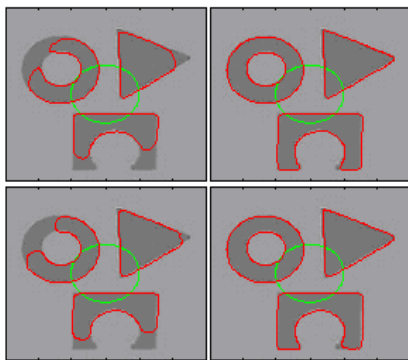


图1 $\mu = 0.06 \times 255^2$

表1 C-V模型和FCV模型的比较

| 模型 | 步长 | 步数 | 耗时/s |
|-----|-----|-----|-------|
| C-V | 0.1 | 300 | 84.93 |
| FCV | 5.0 | 15 | 3.74 |

下面说明 F_2 项对模型的作用。去掉 F_2 项，模型就要进行重新初始化，这样就会严重影响到分割速度，但是迭代步数保持不变。本文通过处理一幅 84×84 的噪声图来说明 F_2 的作用，如图2所示。第1幅图为初始曲线图，其余3幅用完整的模型来实验，分别耗时1.01、3.61、5.19 s，而用重初始化模型耗时为2.68、9.25、16.12 s。然后通过处理一张 120×82 的血管图来说明 F_3 (梯度约束项)对模型的作用，如图3所示。左图是去掉梯度约束项后的演化情况，右图是完整的模型演化情况。从左图中可以看出，分割结果在图的左上方误差较大，没有很好地收敛到

图像的边上，右图就很好地收敛到了图像的边缘。

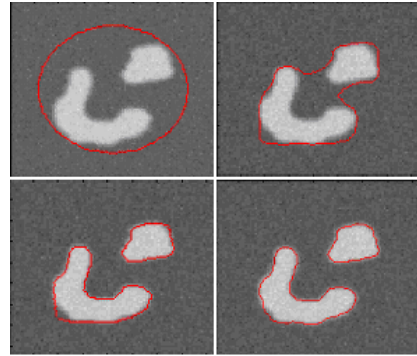


图2 $\mu = 0.08 \times 255^2$

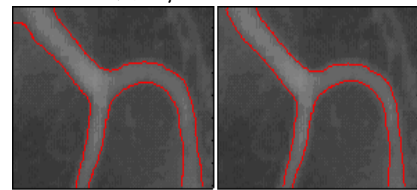


图3 $\mu = 0.08 \times 255^2$

虽然文献[1]已经论证了C-V模型对初始位置不敏感，但是当检测多目标时，不同的初始条件对速度的影响非常明显。下面用FCV模型根据不同的初始条件来对一幅 170×164 的米粒图来说明多初始化可以大大的提高演化速度。如图4，左边3幅图是采用多初始化情况的演化过程，初始曲线为半径为10的一族曲线，迭代6步耗时3.50 s就演化完毕；右边3幅图是单初始化的演化过程，需要迭代20步耗时9.52 s才演化完毕。

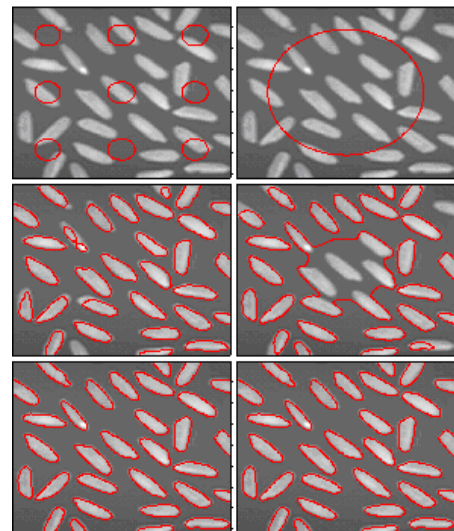


图4 $\mu = 0.01 \times 255^2$

4 结论

本文主要针对水平集方法耗时长的缺点，通过对具体的模型(C-V模型)进行改进和分析来提高水平集的演化速度。该模型把符号距离约束项作为能

量项引入模型中,从而克服了重新初始化的缺点;在数值实现方面采用了AOS算子,相对于传统的数值方法,它克服了迭代对时间步长的限制,可以选择大步长,而且绝对稳定;对多目标采用曲线族作为初始曲线的方法来提高演化速度。实验表明,改进后的模型相对原模型的速度有大幅度的提高。

参考文献

- [1] CHAN T, VESE L. Active contours without edges[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [2] ADALSTEINSSON D, SETHIAN J A. A fast level set method for propagating interfaces[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 118(2): 269-277.
- [3] SETHIAN J A. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts[J]. Proc Nat Acad Sci, 1996, 93(4): 1591-1595.
- [4] 林亚中,程跃斌,陈武凡.一种水平集分割的快速算法[J].南方医科大学学报,2006,26(6):764-766.
LIN Ya-zhong, CHENG Yue-bin, CHEN Wu-fan. A fast approach for level set segmentation[J]. Journal of Southern Medical University, 2006, 26(6): 764-766.

- [5] WANG J N, LI L, WU B Y. An improved approach to image segmentation based on mumfordShah model [C]//Machine Learning and Cybernetics, 2006 International Conference on. Dalian: IEEE, 2006: 3996-4001.
- [6] LI C, XU C, GUI C, et al. Level set evolution with out reinitialization: a new variational formulation[C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). San Diego: IEEE, 2005, 1: 430-436.
- [7] OSHER S, FEDKIW R. Level set methods and dynamic implicit surfaces[M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [8] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on the Hamilton-Jacobi formulation[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-49.
- [9] WEICKERT J, ROMENY B M H, VIERGEVER M A. Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 398-410.
- [10] WEICKERT J, KÜHNE G. Fast implicit active contour models[M]. Berlin: SprinAer-Verlag, 2002: 133-140.
- [11] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours[J]. Int'l J Comp Vis, 1997, 22: 61-79.

编辑 漆蓉

(上接第700页)

4 结束语

针对基于FPGA的宽带数字下变频的特点,本文提出了分级实现以降低抗混叠滤波器阶数,并且每级用不同算法实现滤波抽取以占用不同资源。论述了一种同时进行滤波抽取的抽取滤波器算法——时钟选择运算法;并介绍了时钟选择运算法与对称法、DA算法、MAC算法的结合使用。根据多次比较得出的结果,本文的算法所占资源最为合理、高效。

参考文献

- [1] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2004.
YANG Xiao-niu, LOU Cai-yi, XU Jian-liang. Principles and applications for software radio[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004
- [2] DANIEL R Z, DAVID L S, TIMOTHY W F. A hardware-efficient, multirate, digital channelized receiver architecture[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 137-151.
- [3] HOLLIS T, WEIR R. The theory of digital down converse on[EB/OL]. [2007-01-26]. <http://www.hunteng.co.uk/pdfs/tech/ddctheory.pdf>.
- [4] OHTA L S, HATTORI M, MATSUO H. Development of super broadband interferometer in FIR[J]. Proc of SPIE, 2004, 5487: 1563-1571.

- [5] 赵瑞杰,赖晓平.复FIR数字滤波器幅值约束Chebyshev设计[J].电子学报,2006,34(9):1694-1699.
ZHAO Rui-jie, LAI Xiao-ping. Chebyshev design of complex FIR digital filters with magnitude constraints[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1694-1699.
- [6] CHENG C, PARHI K K. Low-cost parallel FIR filter structures with 2-stage parallelism[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2007: 54(2): 280-290.
- [7] 程佩青.数字信号处理教程[M].第2版.北京:清华大学出版社,2001.
CHENG Pei-qing. Digital signal processing[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [8] 刘朋全.基于FPGA的FIR数字滤波器的设计和实现[D].西安:西北工业大学,2006.
LIU Peng-quan. Design and implementation of FIR digital filter based on FPGA[D]. Xi'an: North Western Polytechnical University, 2006.
- [9] 白剑,杨伟,白应林,等. FIR抽取滤波器高效实现算法[J].无线电工程,2004,34(8):15-16.,
BAI Jian, YANG Wei, BAI Yin-lin, et al. An effective implementation algorithm for FIR decimation filter[J]. Radio Engineering of China, 2004, 34(8): 15-16.

编辑 税红