

基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割方法 *

王晓飞^a, 杨翠容^b, 杨 勇^a, 庞 全^a

(杭州电子科技大学 a. 自动化学院; b. 电子信息学院, 杭州 310018)

摘 要: 为提高分割速度、改善分割效果,从两方面进行改进:首先对传统的快速水平集分割进行改进,得到基于 CV 模型的快速水平集;其次,通过引入 HSI 空间中的彩色差概念,建立一种新的、尤其适合彩色图像的快速水平集分割方法。实验表明,新提出的基于 HSI 彩色差的快速水平集分割方法,对彩色图像具有良好的分割效果。与传统水平集分割相比,新方法在分割性能和运算时间两方面均有明显提高。

关键词: CV 模型; 快速水平集; 彩色图像分割; HSI 空间; 彩色差

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-1135-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.091

Fast level-set segmentation based on color difference in HSI color space

WANG Xiao-fei^a, YANG Cui-rong^b, YANG Yong^a, PANG Quan^a

(a. College of Automation, b. College of Electrics & Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To get better segmentation effect in shorter time, this paper improved the algorithm in two aspects. Firstly, it put forward a CV-based fast level-set method on the basis of the traditional fast level-set method. Secondly, it presented a new fast level-set method which was especially suitable for color image segmentation by introducing the color difference in HSI color space into the CV-based fast level-set method. Experimental results show that this method has good segmentation effect and shorter running time for color images. The new method proposed in this paper improves greatly in performance and running time compared with the old ones.

Key words: CV model; fast level-set method; color image segmentation; HSI color space; color difference

基于水平集的活动轮廓模型图像分割在医学图像分割、运动跟踪、三维重建等领域受到广泛重视^[1]。由 Chan 等人^[2]提出的 CV 模型,是水平集分割中传统的分割模型。该模型具有良好的抗噪性和模糊边界分割的效果,但因其建立在图像的灰度信息基础上,对彩色图像的分割效果较差。此外,这种方法需要求解偏微分方程,分割速度较慢,给实际应用带来困难。

为解决上述问题,文献[3]提出基于彩色梯度的水平集方法,但其最大的缺陷是抗噪性能差,对实际的图片处理较为困难。文献[4]中的彩色水平集模型主要是用彩色信息作为 CV 模型的迭代终止条件,这种方法对彩色信息的利用不充分。文献[5]提出快速水平集算法,极大地提高了分割速度。但该算法仅提供了两种快速分割模型,即基于阈值的和基于梯度的快速模型。这两种模型适用范围较小,前者仅适用于分割目标的灰度集中在一个范围的图像,后者主要适用于分割目标边缘清晰且噪声较少的图像。文献[6]提出用 B 样条函数来表示水平集,该方法可以减少迭代次数从而加快分割速度。与文献[6]相比,文献[5]提出的快速分割方法更易于扩展且表达式简单。

1 传统水平集分割及其存在问题

水平集的基本思想是将闭合曲线的演化问题转换为更高

维空间中函数的变化问题,曲线演化等价于水平集函数的变化^[1]。用水平集的变化来表示曲线演化的优点是其拓扑结构无关性及数值求解稳定性。其中,由 Chan 等人^[2]提出的活动轮廓模型(简称 CV 模型)应用较为广泛。CV 模型的能量泛函为

$$\begin{aligned} F(c_o, c_b, \varphi) = & \nu \cdot \int_{\Omega} H(\varphi(x, y)) dx dy + \\ & \mu \cdot \int_{\Omega} \delta(\varphi(x, y)) |\nabla \varphi(x, y)| dx dy + \\ & \lambda_1 \int_{\Omega} |I(x, y) - c_o|^2 H(\varphi(x, y)) dx dy + \\ & \lambda_2 \int_{\Omega} |I(x, y) - c_b|^2 (1 - H(\varphi(x, y))) dx dy \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: $\mu \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0, c_o$ 和 c_b 分别为轮廓线内部和外部的灰度平均值。其中前两项是平滑项,后两项是驱动曲线演化的动力项。式(1)中能量函数取得最小值时所对应的零水平集曲线即分割目标轮廓线。用欧拉方程可以求得式(1)中能量函数的最小值,其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = & \delta_{\varepsilon}(\varphi) \left[\mu \nabla \cdot \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} - \nu \right] + \\ & \delta_{\varepsilon}(\varphi) [\lambda_2 (I - c_o)^2 - \lambda_1 (I - c_b)^2] \end{aligned} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, CV 模型实质上是利用两个灰度常值区域来最佳拟合图像的整个区域。该模型具有抗噪性能好、能分割边界模糊图像甚至无边界图像的优点。

收稿日期: 2011-08-05; 修回日期: 2011-09-07 基金项目: 基于光多相干、多普勒和超高速 CCD 神经—血管偶联机制研究资助项目(30770685); 国家科技部支撑计划重点资助项目(2009BAB47B06)

作者简介: 王晓飞(1986-), 男, 河南新野人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与计算机视觉(sunyeifei@yeah.net); 杨翠容(1963-), 女, 副教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别; 杨勇(1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为生物医学工程、信息处理; 庞全(1951-), 男, 教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别。

传统的水平集分割有两大缺点:

- a) 分割彩色图像效果不理想;
- b) 分割速度较慢。

从式(1)可以看出,传统水平集的曲线演化是靠灰度信息驱动的。因此,当图像的目标和背景灰度信息区分性较小时,曲线演化的动力不足,导致分割失败。如图 1 所示,(a)中目标和背景的灰度值大小相同但颜色不同。用 CV 模型分割图 1 (d) 相当于对(b)进行分割,必然无法正确分割出目标,如图 1 (d)所示的分割结果。传统水平集分割慢的原因主要有如下三点:a)需要求解偏微分方程;b)每次迭代运算过程中需要对整幅图像所有像素点进行计算;c)迭代过程中需要不断重新初始化水平集函数为符号距离函数。从式(2)可知偏微分方程求解运算量大,式子中变量多,且每个变量都是以图像的宽、高为大小的矩阵。符号距离函数的构造比较耗时,进一步减慢了分割速度。

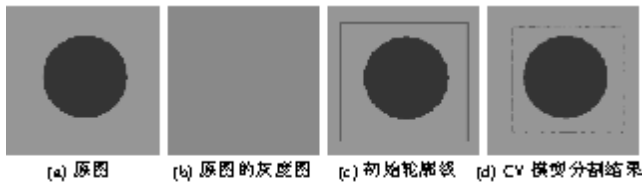


图 1 CV 分割彩图示例

2 基于 HSI 空间彩色差的快速水平集模型建立

首先对传统的、基于灰度的快速水平集分割算法^[5]实现改进,得到基于 CV 的快速水平集分割模型,为引入 HSI 空间彩色差概念奠定基础。然后将 HSI 空间中的彩色差引入改进后的快速水平集分割算法中,得出一种基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割方法。

2.1 基于 CV 的快速水平集分割法

Shi 等人在文献[5]中提出一种快速实时的水平集分割法,极大提高了分割速度。但其速度项是建立在阈值和梯度上的,从而影响了该算法的使用。为使该算法具有普遍适用性,本文在此基础上进行改进,建立一种新的基于 CV 的速度项,如下:

$$F(x, y) = |I(x, y) - c_{out}| - |I(x, y) - c_{in}| \quad (3)$$

其中: c_{out} 和 c_{in} 分别为轮廓线外部和内部的平均灰度值, $I(x, y)$ 为点 (x, y) 处的灰度值。式中的两项分别是当前点灰度值与轮廓线外部区域和内部区域的平均灰度值之差。以此速度项为曲线演化动力的快速水平集称为基于 CV 的快速水平集分割算法,可以描述如下:

水平集函数被离散化为四个整数:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 3 & \text{if } x \text{ is an exterior point} \\ 1 & \text{if } x \in L_{out} \\ -1 & \text{if } x \in L_{in} \\ -3 & \text{if } x \text{ is an interior point} \end{cases} \quad (4)$$

其中,水平集值为负的区域是轮廓线内部区域,记为 Ω_{in} ,水平集为正的区是轮廓线外部区域,记为 Ω_{out} 。水平集值为-3的区域可以称为内部区域(interior points),值为+3的区域可称为外部区域(exterior points)。内部链表和外部链表可定义如下:

$$L_{in} = \{x | x \in \Omega_{in} \text{ and } \exists y \in N(x) \text{ such that } y \in \Omega_{out}\}$$

$$L_{out} = \{x | x \in \Omega_{out} \text{ and } \exists y \in N(x) \text{ such that } y \in \Omega_{in}\}$$

其中, $N(x)$ 为点 x 的上下左右四邻域点。通过交换内部链表和外部链表中的元素来实现曲线的演化。链表元素的交换由 switch_in 和 switch_out 两步操作完成。Switch_in 操作将链表 L_{out} 中的点 x 交换到链表 L_{in} 中,同时将不再属于内部链表 L_{in} 的元素删除,交换到内部区域,该操作使曲线向外扩张;反之 switch_out 操作将链表 L_{in} 中的点 x 交换到链表 L_{out} 中,该操作使曲线向内收缩。

两个链表中的元素是否进行交换由速度项 F 的正负号决定。对 L_{out} 中的点,当 F 大于0时执行 switch_in 操作,该点被交换到轮廓线内部;对 L_{in} 中的点,当 F 小于0时执行 switch_out 操作,该点被交换到轮廓线外部。基于 CV 的快速水平集分割法无须求解偏微分方程,无须重新初始化符号距离函数,仅对宽为2的窄带区域中像素点进行计算,因此分割速度有很大提高。

2.2 基于 HSI 空间彩色差的快速水平集

为有效分割彩色图像,进一步将 HSI 空间中的彩色差引入基于 CV 的快速水平集中。HSI 颜色空间是比较符合人眼视觉的一种颜色空间, H 表示色调(hue), S 表示饱和度(saturation), I 表示亮度(intensity)。记 HSI 空间中的两个彩色值分别为 $V_1 = (H_1, S_1, I_1)^T$ 和 $V_2 = (H_2, S_2, I_2)^T$,彩色差^[8]定义为

$$\Delta_{HSI}(V_1, V_2) = \sqrt{(\Delta_I)^2 + (\Delta_C)^2} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta_I &= |I_1 - I_2| \\ \Delta_C &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2S_1S_2\cos\theta} \\ \theta &= \begin{cases} |H_1 - H_2| & \text{if } |H_1 - H_2| \leq \pi \\ 2\pi - |H_1 - H_2| & \text{if } |H_1 - H_2| > \pi \end{cases} \end{aligned}$$

将式(5)中的灰度差用彩色差代替,得到基于 HSI 彩色差的快速水平集模型速度项:

$$F(x, y) = \nabla_{HSI}(V(x, y), V_{out}) - \nabla_{HSI}(V(x, y), V_{in}) \quad (6)$$

其中, $V(x, y)$ 为点 (x, y) 处的彩色值, V_{out} 和 V_{in} 分别为轮廓线外部区域和内部区域的平均彩色值。彩色水平集分割模型比较充分地利用了图像的信息,综合考虑了图像的色调、饱和度及强度,因此可以获得更好的分割效果。

本文建立的基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割具体算法流程如下:

- a) 设定初始化轮廓线、初始化水平集函数及 L_{in} 和 L_{out} 链表。
- b) 分别计算轮廓线内部和外部区域在 RGB 空间中每一个通道的平均值。然后将此 RGB 值转换为 HSI 值。遍历链表 L_{out} 中的点,求该点的 HSI 值。代入式(6)求该点的速度项 F ,若 F 大于0,执行 switch_in 操作。再次遍历链表 L_{out} 中的点,删除不再属于该链表的点。
- c) 分别计算轮廓线内部和外部区域在 RGB 空间中每一个通道的平均值。然后将此 RGB 值转换为 HSI 值。遍历链表 L_{in} 中的点,求该点的 HSI 值。代入式(6)求该点的速度项 F ,若 F 小于0,执行 switch_out 操作。再次遍历链表 L_{in} 中的点,删除不再属于该链表的点。
- d) 反复执行 b) 和 c) 直到满足迭代终止条件为止。迭代终止条件可以有以下两种:
 - (a) 人工设定迭代次数;

(b)满足链表 L_{out} 中任意点的速度项 F 小于0且链表 L_{in} 中任意点的速度项 F 大于0。

3 实验结果与分析

分别用传统的水平集分割与本文建立的基于 HSI 彩色差的快速水平集分割进行实验比对。

图 2 是一幅人工图,目标与背景区域的灰度、饱和度均相同,只有色调不同。传统水平集分割法仅利用图像的灰度信息,而该图目标和背景灰度相同,因此传统方法无法识别目标和背景,导致分割失败。本文提出的彩色快速水平集曲线演化动力项不仅包括灰度信息,还包含色调及饱和度信息。图 2 中目标和背景的色调不同,因此用本文算法能成功分割出目标,如图 2(b)所示。

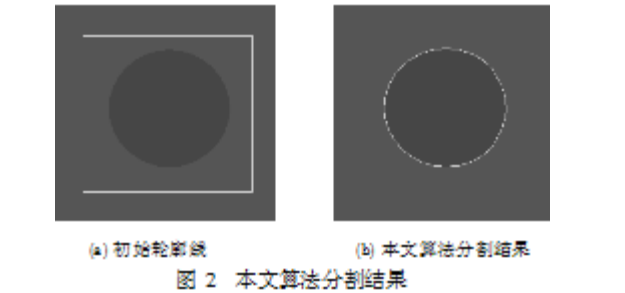


图 3 中分割目标猴子的色彩信息较多,但传统水平集是按照灰度图进行分割的,此种情况下,目标的灰度均值较大,所以把左下角灰度较大的部分错误分割为目标,把目标区域中灰度值较小的部分区域误分割为背景区域。本文的算法充分考虑了图像的色彩信息,目标和背景的色彩区分性较大,因此能取得较理想的分割效果,如图 3(d)所示。

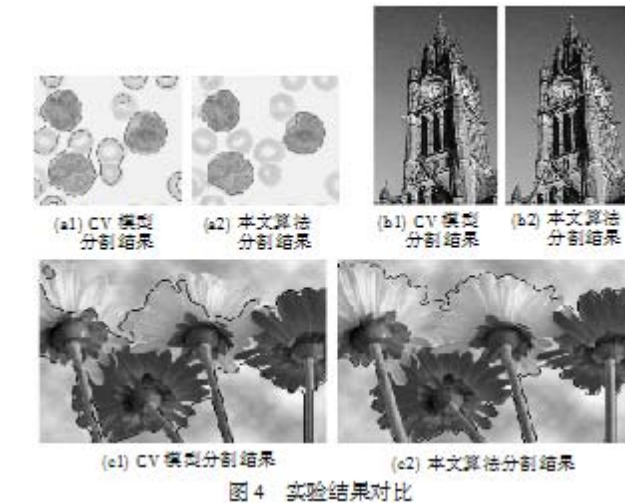


图 4 中第 1 组,若用传统水平集分割,目标和背景的一部分区域灰度值较为接近,所以分割的目标都包含了背景的一部分。用本文算法分割时,目标颜色比较鲜明,很容易与背景区分开,所以能正确分割。图 4 中第 2 组,背景的颜色与建筑物颜色有较大差异,背景中深蓝色区域的灰度值与建筑物的部分

区域灰度值较为接近。传统水平集靠灰度信息驱动,因此难以成功分割出目标,而本文算法可成功区分出目标与背景,将目标完整分割出来。图 4 中第 3 组,用传统水平集分割时,目标的一部分区域灰度值与背景更为接近,因此被误分割为背景。用本文算法分割时,目标和背景可以很好地区分开,从而获得较好的分割效果。

表 1 中列出了传统水平集与本文算法的分割时间对比情况。其中第一列为分割的图片及其大小,第二列是传统水平集 CV 分割模型分割迭代次数及其所耗时间,第三列是本文算法分割时迭代次数及所耗时间。不难看到,本文提出的基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割法与传统水平集方法相比速度有很大提高。

表 1 传统水平集与本文算法分割时间对比

图像及其大小	传统水平集	本文算法
	迭代次数/耗时	迭代次数/耗时
图 2,160 × 120	100 次/5.7s	100 次/0.32s
图 3,128 × 128	100 次/5.08s	100 次/0.29s
图 4(a),246 × 160	150 次/15.6s	150 次/1.12s
图 4(b),267 × 456	40 次/24.8s	100 次/1.68s
图 4(c),250 × 187	20 次/20.8s	100 次/0.94s

4 结束语

本文提出一种基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割方法。该方法采用快速水平集并对其速度项进行改进,与传统水平集方法相比在分割速度上有很大提高。将 HSI 空间中彩色差引入本文算法中,使得该算法在识别目标时可以综合考虑灰度、色调、饱和度信息。新算法更适合分割色彩信息丰富的彩色图像。实验表明,本文的彩色水平集算法可以更好地分割彩色图像,并且比传统水平集分割速度更快。

参考文献:

[1] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-49.

[2] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.

[3] XU Jing, WU Jian, FENG Ye, et al. A level set method for color image segmentation based on Bayesian classifier [C]//Proc of International Conference on Computer Science and Software Engineering. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 886-890.

[4] WANG Hai-jun, LIU Ming, MA Wen-lai. Color image segmentation based on geometric active contour model [C]//Proc of International Conference on Machine Vision and Human-machine Interface. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 6-9.

[5] SHI Yong-gang, KARL W C. A real-time algorithm for the approximate of level-set-based curve evolution [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2008, 17(5): 645-656.

[6] BERNARD O, FRIBOULET D, THEVENAZ P, et al. Variational B-Spline level-set: a linear filtering approach for fast deformable model evolution [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2009, 18(6): 1179-1191.

[7] 林开颜, 吴军辉, 徐立鸿. 彩色图像分割方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(1): 1-10.

[8] KOSCHAN A, ABIDI M. 彩色数字图像处理 [M]. 章毓晋, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009: 69-70.