

一种非参数估计的活动围道图像分割方法¹

杨鸿波 时永刚 邹谋炎

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文采用 Parzen 窗非参数估计的活动围道方法进行图像分割, 不必假定图像区域符合特定的概率分布, 大大增加了该算法的应用范围。通过动态调整 Parzen 窗口参数, 更好地利用了图像灰度区域一致的信息, 使之更好地适应图像分割的任务。通过合成图像和真实图像的实验证明此方法具有很好的合理性, 具有很好的分割精度和抗噪性能。

关键词: 非参数概率密度估计, Parzen 窗, 活动围道, 水平截集, 图像分割

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)12-1849-07

Nonparametric Methods for Image Segmentation Using Active Contour

Yang Hong-bo Shi Yong-gang Zou Mou-yan

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract This paper applies Parzen-window nonparametric estimation of active contour methods for image segmentation which can be performed without regarding image regions as any of typical probability distributions, so it expands the application range of the algorithm. In order to use the information of gray value congruence in a particular region, the Parzen-window parameter is alterable in estimating the densities. This will be more suit for practical image segmentation. Many examples of synthetical and real image segmentation prove that the method is rationality, better for curve evolution and has good accuracy and antinoise function.

Key words Nonparametric density estimation, Parzen-window, Active contour, Level set, Image Segmentation

1 引言

图像分割是图像处理重要的研究内容, 它的任务就是将图像分割成不同的区域, 从背景中提取感兴趣的物体。由于实际应用中对于图像中各区域的边界通常没有多少先验知识, 所以要求进行无监督的图像分割。活动围道 (Active contour) 的分割技术为无监督的图像分割提供了全新的思路。活动围道法最早见之于 Terzopoulos 的工作^[1]。之后对活动围道研究最有影响的是 Kass, Witkin 和 Terzopoulos 提出的活动围道模型^[2]。为了解决活动围道中拓扑自适应差的局限性, Caselles 等人^[3]和 Malladi 等人^[4]提出了几何型活动围道方法。

张丽飞^[5]提出了基于 MDL (Minimum Description-Length) 准则的活动围道方法, 该方法假定图像灰度符合高斯分布的随机场, 可以分割复杂背景的图像并且具有较强的拓扑自适应性。由于该方法的假定在某些情况下并不适用, 导致该方法有可能失效, 具体的例子见本文第 4 节。

由于实际的图像灰度分布并不符合某种典型概率分布, 所以采用非参数估计图像区域的概率分布是一种很好的方法。一种有效的非参数估计方法是由 Parzen 在文献 [6] 中提出的 Parzen 窗估计。Kim 等人^[7]提出了对图像区域进行非参数估计的活动围道的分割方法, 取得了很好

¹ 2003-08-11 收到, 2004-01-05 改回

国家自然科学基金 (60072020) 和中国科学院创新基金资助课题

的效果。文献 [7] 采用 Parzen 窗估计的窗口尺寸固定, 并且需要预先设定。而实际上, 每个区域的灰度分布需要采用不同的窗口尺寸来估计。这就导致了文献 [7] 的方法对于某些图像围道进化的失败, 具体的例子见本文的第 4 节。

本文提出了可变窗口尺寸非参数估计的图像分割的算法, 充分利用区域灰度的一致性克服了以上算法的一些缺陷, 通过图像分割的实例说明这是一种适应性很强的无监督图像分割方法。文中第 2 节简单介绍活动围道分割和非参数估计的原理; 第 3 节介绍本文的算法; 第 4 节介绍与以上两种方法的比较以及图像分割的实验结果; 第 5 节是结论。

2 活动围道和非参数估计原理

2.1 活动围道图像分割

活动围道分割技术是基于模型的几何形变分割技术, 这里的模型为分割目标边界的闭曲线(二维)或者闭曲面(三维)。从力学角度来讲, 活动围道实质上是在曲线本身信息和图像信息的综合作用下运动的曲线或曲面。活动围道分割技术是目前对图像进行无监督分割的主要方法。首先在待分割图像中给出一条曲线, 最好包含感兴趣物体。然后在设计好的进化公式下进行迭代计算, 直到迭代收敛, 活动围道不再变化, 我们就得到物体的边界。而驱使围道不断进化的力量可以分为两种: 内力(势)和外力(势)。

设进化围道为 $X(s, t) = [x(s, t), y(s, t)]$, t 为时间, s 为任意参数, N 为外法线的单位矢量, κ 为曲率。依据曲线进化理论, 围道的进化方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \partial X / \partial t &= \beta(s, t) N \\ X(s, 0) &= X_0(s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里, β 为进化速度项。 β 一般取为曲率 κ 的函数, 即 $\beta = F(\kappa)$ 。然后利用水平截集的方法来表示这个围道进化。有关活动围道的分割技术分类和不同的形式可以参考张丽飞^[8]的综述文章, 有关水平截集的介绍可以参考文献 [9-11]。

2.2 Parzen 窗口非参数估计

典型的参数化概率密度一般是单峰分布, 然而许多实际问题的概率密度可能是多峰的。非参数估计能适应的概率密度可以是任意的分布, 而不用人为地假设某种分布形式。所以非参数估计更适应于复杂的图像统计。

一个点 x 落入区域 R 的概率为

$$P = \int_R p(x') dx \quad (2a)$$

如果有一个样本个数为 n , P 是概率密度 $p(x)$ 的 averages 的表述形式, 因此样本中有 k 个点落入区域 R 的概率为

$$P_k = \binom{n}{k} P^k (1-P)^{n-k} \quad (2b)$$

k 的期望值为

$$E(k) = nP \quad (3)$$

因此 $\hat{\theta} = k/n \cong P$ 是概率 P 的很好的估计。这里我们考虑连续的情况, 假定区域 R 很小, 在这个区域里 p 基本不变, 且体积为 V 则

$$\int_R p(x') dx' \cong p(x)V \Rightarrow p(x) = (k/n)/V \quad (4)$$

理论上如果应用无限的样本数, 我们可以得到

$$p_n(x) = (k_n/n)/V_n \rightarrow p(x), \quad n \rightarrow \infty$$

$$\text{如果 } \lim_{n \rightarrow \infty} V_n = 0; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} k_n = \infty; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} k_n/n = 0 \quad (5)$$

其中 V_n 是区域 R_n 的体积, 有 k_n 个样本落入 R_n 中. Parzen 窗概率密度估计方法假设 V_n 是 n 的函数

$$V_n = 1/\sqrt{n} \quad (6)$$

R_n 表示 d -维超立方体的区域, 设 $v(u)$ 为窗函数, h_n 为窗口尺寸参数, 可以得到概率密度的估计值

$$\left. \begin{aligned} h_n^d &= V_n \\ k_n &= \sum_{i=1}^n v[(x - x_i)/h_n] \\ p_n(x) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_n} v[(x - x_i)/h_n] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

有关 Parzen 窗密度估计的原理请参考文献 [6].

3 非参数估计的活动围道方法

在本节我们提出一种调整 Parzen 窗口尺寸的非参数估计的方法, 驱动围道进化, 完成图像分割的任务. 我们建立一个图像模型, 如图 1 所示:

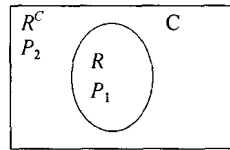


图 1 图像分割模型

图 1 中 C 为活动围道, R, p_1, R^C, p_2 分别为由活动围道分成的两个区域和它们的概率. 活动围道的能量泛函定义为

$$E(C) = \mu L - \ln P(I|C) \quad (8)$$

其中 I 是图像灰度, L 是围道的总长度, C 为活动围道.

$$P(I|C) = \left(\prod_{(x,y) \in R} p(I(x,y)|C) \right) \left(\prod_{(x,y) \in R^C} p(I(x,y)|C) \right) \quad (9)$$

式 (9) 中的第 1 个括弧中为内力项, 第 2 个括弧中为外力项, 二者驱动活动围道进化. 该能量泛函与围道内外区域的统计特征有关, 对初始围道的位置不敏感. 需要指出的是如果活动围道将图像分成的区域数目 $N > 2$, 式 (8), 式 (9) 应该变为

$$E(C) = \mu L - \sum_{i=1}^N \ln P(I_i|C) \quad (8a)$$

$$P(I_i|C) = \left(\prod_{(x,y) \in R_i} p(I(x,y)|C) \right) \left(\prod_{(x,y) \in R_i^C} p(I(x,y)|C) \right) \quad (9a)$$

其中 R_i, R_i^C 分别为第 i 个区域以及它与它最相邻的背景。随着围道的进化, 围道将图像分成不同区域的数目会自动发生变化。这样的处理使算法可以适合同时分割多个物体。有关区域以及它与它最相邻背景的概念可以参考文献 [5]。

式 (8a)、式 (9a) 的全局能量分割泛函表明了图像分割目的是为了分割出各个特性一致区域。利用泛函求导和梯度下降法求解式 (9a) 的最小值。这样可推导出边界上点 V 运动需满足进化方程

$$dV/dt = -b\kappa_{V(R)}N_{V(R_i)} + (\ln p(I_V|R_i) - \ln p(I_V|R_i^C))N_{V(R_i)} \quad (10)$$

$\kappa_{V(R_i)}$ 为 R_i 边界曲线的曲率, $b\kappa_{V(R)}$ 为曲率编码长度总和 [5], 它控制活动围道的光滑度, $N_{V(R_i)}$ 为 R_i 边界在点 V 处的外单位法线。所以整个算法最重要的是确定式 (10) 中的第 2 项。下面给出非参数估计 $p(I_V|R_i)$ 和 $p(I_V|R_i^C)$ 的算法。

式 (6), 式 (7) 给出了 Parzen 窗口的非参数估计的方法, 我们设

$$v(u) = 1/(\sqrt{2\pi}) \exp(-u^2/2) \quad (11)$$

图像的灰度值是一个标量, 所以 $d = 1, h_n = V_n$, 由式 (6), 式 (7) 得到

$$p(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_n} v[(x - x_i)/h_n] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_n} \exp[(x - x_i)^2/h_n^2] \quad (12)$$

推广到图像上, 我们得到图像灰度 $I(x, y)$ 属于区域 R_i 的概率

$$p(I(x, y)|R_i) = \frac{1}{\Omega_i} \sum_{j=1}^{\Omega_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_{in}} \exp[(I(x, y) - I_j(x, y))^2/h_{in}^2] \left. \vphantom{\frac{1}{\Omega_i} \sum_{j=1}^{\Omega_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_{in}} \exp[(I(x, y) - I_j(x, y))^2/h_{in}^2]} \right\} \quad (13)$$

$$h_{in} = \left\{ \frac{1}{\Omega_i} \sum_{j=1}^{\Omega_i} [I_j(x, y) - \mu_i]^2 \right\}^{1/2}$$

其中 Ω_i 是区域 R_i 中像素数目, $I_j(x, y)$ 区域 R_i 中第 j 个像素灰度。同理可以求出 $p(I(x, y)|R_i^C)$ 。 h_{in} 是属于区域 R_i 像素的 Parzen 窗的尺寸, 我们提出 h_{in} 取值为区域 R_i 灰度的方差, 这一点不同于其它的非参数估计的方法, 因为其它的方法一般采用相同的窗口尺寸参数。窗口参数对估计量有很大的影响, 不同区域的灰度的一致性是不同的, 因此相同的窗口尺寸参数不能体现不同区域的灰度一致性的程度。选择区域灰度方差作为窗口尺寸 h_{in} 则可以很好地表现出区域一致的程度。而且窗口尺寸参数可随着围道进化自动调整, 不用预先设定。本方法与有关方法的比较可见下一节。

数值计算采用水平截集方法。式 (10) 对应的水平截集函数进化方程如下所示:

$$d\varphi/dt = -b\kappa_{V(R)}|\nabla\varphi| + (\ln p(I|R_i) - \ln p(I|R_i^C))|\nabla\varphi| \quad (14)$$

$$\varphi(x, y, t_i) = \begin{cases} \min_{x_i, y_i \in C} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, & \{x_i, y_i\} \in R_i^C \\ -\min_{x_i, y_i \in C} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, & \{x_i, y_i\} \in R_i \end{cases} \quad (15)$$

这里的 φ 是距离函数, $\nabla\varphi$ 是距离函数的梯度。 $\varphi(x, y, t_i)$ 是在某一时刻 t_i 水平截集函数, $C(x, y)$ 为活动围道的点, 其中 $(x, y), (x_i, y_i)$ 分别代表图像像素点位置。

4 算法性能比较以及分割实例

目前活动围道方法是图像分割研究中的热点，我们下面将本文方法与文献 [5] 和文献 [7] 的方法进行比较。文献 [5], 文献 [7] 和本文都是无监督活动围道方法，数值计算均采用水平截集函数，所以都具有拓扑适应能力。文献 [5] 采用高斯概率分布模型估计式 (9a) 的值，假定图像像素的灰度在特定的区域内符合高斯分布。文献 [7] 采用固定窗口尺寸参数的非参数估计式 (9a) 的值。我们对一幅图像进行分割从中找出 3 种方法的差别。从图 2 看出，文献 [5] 的方法采用高斯估计得到的最终围道包围的区域最小。但是实际上球的体积比这个最终结果要大一些。文献 [7] 的方法中最终围道包围的区域最大，但其中甚至包括了一些最暗的区域和一些球体边缘的噪声点。本文的方法最终围道包围的区域介于二者之间，忽略了球体边缘的一部分噪声，并且保留了属于球体的比较阴暗部分。由于球体的边缘很模糊，亮度较低的像素点的取舍比较困难，所以我们认为 3 者的结果都是可以接受的。通过这个实验我们可以得到一个有意义结论：本文的方法不用假定图像区域的灰度符合某种特定分布，而且由于采用调整窗口尺寸的非参数估计，所以可以准确表达出图像不同区域的灰度一致性的不同程度。

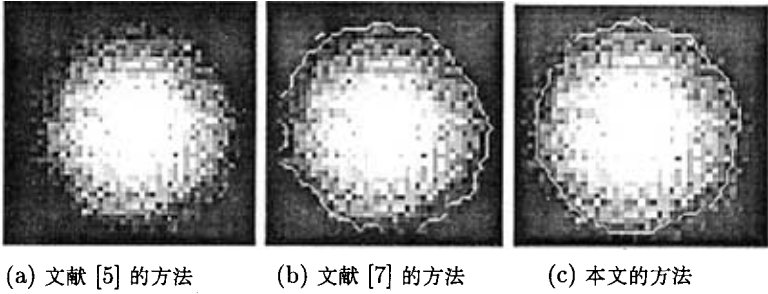


图 2 3 种方法的比较

文献 [5] 由于假设图像区域灰度符合高斯分布，所以对于一些实际图像进行分割的时候会造成算法的失效。我们可以通过下面的图像例子进行分析。图 3(a) 是原始图像和初始围道位置，图中的黑线代表初始活动围道。图 3(a) 的原始图像包含两类区域：背景和形状不同的 4 个物体。这两个区域的均值相同，如果采用文献 [5] 的高斯估计的方法，初始围道区域内的均值的方差小于围道外的方差，这样根据计算，围道的点属于围道内的概率小于属于围道外的概率，活动围道不断收缩，所以最终围道消失，无法完成分割任务。而文献 [7] 的方法和本文的方法由于采用非参数估计，所以都会得到比较好的分割结果。图 3(b) 就是本文方法分割的结果，图中的黑线代表最终的活动围道位置。可见假设图像区域灰度符合某种分布（如高斯，泊松等分布）不符合实际的情况，会限制算法应用的范围。

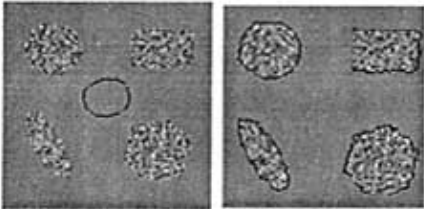
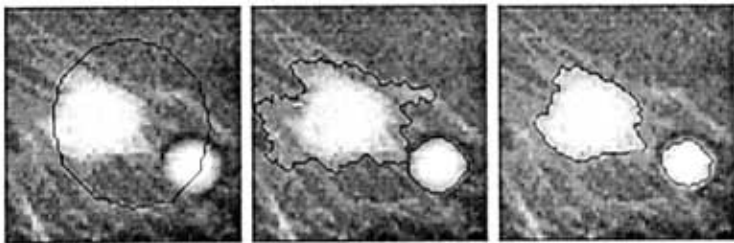


图 3 两区域的均值相同的图像及分割结果

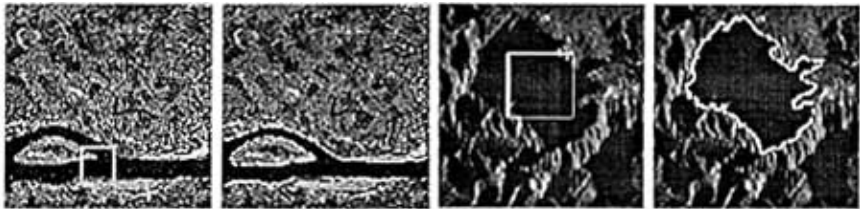
文献 [7] 的方法由于非参数估计过程中采用的窗口尺寸参数相同，没有考虑不同区域对灰度一致性的不同要求。所以文献 [7] 的方法在处理一些图像分割的任务时不能得到有意义的结果。我们可以从下面的例子中看到这一点。图 4 是包含两个物体的图像及分割结果，图中的黑线代表活动围道位置。图 4(a) 是原始图像及初始围道，可以看出图像中包含两个物体。图 4(b) 是文献 [7] 方法的分割结果，我们看到活动围道没有分割出两个物体，而且包含一些亮度较低的像素点，这样的分割结果认为是不太成功的。图 4(c) 图是本文的分割结果，结果区分出两个物体，找到了有意义的边界。本幅图像的噪声比较强，两个物体间存在一些噪声点，而文献 [7] 采用相同的窗口尺寸参数估计某个像素属于区域内外的概率，没有很好地考虑区域内外一致性不同，导致错分。本文的方法取区域内的灰度方差作为窗口尺寸参数，来估计某个像素属于区域内的概率，这就充分考虑了待分割区域与背景不同的一致性，使活动围道围成的区域的灰度一致性更好，这样成功地分割出两个物体，同时也说明了本文的方法具有很好的抗噪性。



(a) 原始图像及初始围道 (b) 文献 [7] 的分割结果 (c) 本文方法的分割结果

图 4 包含两个物体的图像及分割结果

图 5 是两幅遥感图像分割的例子，图中的白线代表活动围道位置：



(a) 原始图像及初始化围道 (b) 分割结果 (c) 原始图像及初始化围道 (d) 分割结果

图 5 两幅遥感图像的分割例子

通过实际图像分割例子证明本文提出的方法在拓扑适应性、抗噪性和分割的精确性、稳定性方面都得到了很好的结果。

5 结论

本文提出了调整窗口尺寸参数的非参数估计的活动围道图像分割方法，取得了较好的效果。通过与其他方法的比较说明了本文方法具有很好的合理性，可以应用于实际的图像分割。我们通过研究认为活动围道图像分割最重要的在于找到待分割图像区域一致性特征，一致性不仅包含灰度值，还可以包含其它的图像信息，例如图像的频率特性等等。此外已报道的各种围道包括本文还不能很好地进行纹理图像的分割，主要原因就在于一般纹理图像具有非平移性，描述其统计特征还有困难。这应该是图像分析和图像分割的一个研究方向。

参 考 文 献

- [1] Terzopoulos D. On matching deformable models to images. Technical Report 60, Schlumberger Palo Alto research, 1986. Reprinted in Topical Meeting on Machine Vision, Technical Digest Series, 1987, Vol.12: 160-167.
- [2] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models. *Int'l J. Comp. Vis.*, 1987, 1(4): 321-331.
- [3] Caselles V, Catte F, Coll T, Dibos F. A geometric model for active contours. *Numerische Mathematik*, 1993, 66(1): 1-31.
- [4] Malladi R, Sethian J A, Vemuri B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach. *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1995, PAMI-17(2): 158-175.
- [5] 张丽飞. 基于最小描述长度准则的活动围道方法及相关技术: [博士论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2002, 年 11 月.
- [6] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *Annals of Mathematical Statist.* 1962, 33(3): 1065-1076.
- [7] Kim Junmo, Fisher III W, Yezzi A, Jr., Cetin M, Willsky A S. Nonparametric methods for image segmentation using information theory and curve evolution. *IEEE Conf. on Image Processing*, Rochester, NY, Sept. 2002, Vol.3: 797-800.
- [8] 张丽飞, 王东峰, 时永刚, 邹谋炎. 基于形变模型的图像分割技术综述. *电子与信息学报*, 2003, 25(3): 395-403.
- [9] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J. Computational Physics*, 1988, 79(1): 12-49.
- [10] Sethian J A. Curvature and evolution of fronts. *Commun. Math. Phys.*, 1985, 101(4): 487-499.
- [11] Sethian J A. A review of recent numerical algorithms for hypersurfaces moving with curvature dependent speed. *J. Differential Geometry*, 1990, 31(1): 131-161.

杨鸿波: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为图像分割、和无线宽带通信技术.

时永刚: 男, 1970 年生, 博士生, 研究方向为信号和图像处理, 目前主要从事多模态图像配准地研究工作.

邹谋炎: 男, 1941 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号处理、图像处理理论和算法, 无线宽带通信技术.