

# 基于形变模型的图像分割技术综述<sup>1</sup>

张丽飞 王东峰 时永刚 邹谋炎

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要** 基于形变模型的图像分割技术是近年来兴起的一种新型图像分割方法, 已有相当广泛的研究. 该技术为如何有效地从图像中分割出不规则对象及自然对象指出了一条佳径. 该文简要介绍基于形变模型图像分割技术的基本原理和发展历程. 按技术发展的线索介绍各种典型的形变模型表示形式, 提出各种表示形式的优缺点, 分析基于形变模型的图像分割的各种技术所存在的缺点, 并建议了可能的研究方向.

**关键词** 图像分割, 形变模型, 不规则对象

**中图分类号** TN911.73

## 1 引 言

图像分割技术是一种重要的图像处理技术, 当前大致有两类图像分割技术: 一类是基于图像特征一致性的分割技术; 另一类是基于图像棱边提取和区域按语义综合的分割技术. 第一类技术的分割机理包括利用图像中局部区域灰度、纹理和各种统计特征的一致性以及速度一致性(对视频分割)等等. 本文介绍的基于形变模型的分割技术从本质上说属于这一类.

现实世界中存在大量的观测对象其边界形状很不规则, 例如医学中的肿瘤和心脏, 遥感图像上的特定区域等等. 这些对象的形状不规则性使得传统的图像分割技术面临着很大困难. 基于形变模型的分割技术为有效地从图像中分割出此类对象提供了全新的思路, 它考虑了人类观察图像的心理过程和视觉特性, 是一种自上而下的技术.

基于形变模型的分割技术是基于模型的分割技术, 这里的模型为对象边界的闭曲线(二维)或者闭曲面(三维). 该技术实现图像分割的过程与人类识别对象边界的心理过程相符, 其具体过程如下: 首先, 在图像上给出的一条对应对象边界大概位置的闭曲线(初始模型); 然后曲线在图像信息和曲线本身信息的指引下运动(模型的形变过程); 最终, 曲线运动到正确的对象边界处, 停止运动(模型的收敛). 从力学角度来讲, 形变模型实质上是在内力(曲线本身信息的表示形式)和外力(图像信息的表示形式)的综合作用下运动的曲线或曲面.

形变模型分割技术具有以下优点: 首先, 模型的形变自由度大, 可以逼近形状不规则的曲线; 其次, 可以约束模型具有对象形状的先验特性, 该技术的鲁棒性强; 再者, 抽取的对象边界可以达到亚像素的精度; 最后, 该技术可保证边界曲线的拓扑性.

上述特点使得形变模型分割技术自问世以来, 得到了国内外广泛而深入的研究. 研究的重点是形变模型的设计以及形变过程的数值实现. 限于文章的篇幅, 本文只介绍形变模型的设计. 以下将简要介绍该技术的发展历程, 重点介绍两种基本形变模型及其扩展模型, 指出这些形变模型表示方案所存在的缺点, 并对该技术的未来研究方向做了分析.

## 2 基于形变模型的分割技术的发展历程

自 Kass, Witkin 和 Terzopoulos 发表了文章 Snake: Active contour models<sup>[1]</sup> 后, 基于形变模型的分割技术成为图像分割中最有吸引力和最为成功的一个研究领域, 同时也出现了各种与形变模型等同的术语. 本文使用形变模型和活动围道两种术语.

<sup>1</sup> 2001-10-22 收到, 2002-02-28 改回  
中国科学院科技创新基金资助

基于形变模型分割技术的发展大致可以分为三个阶段：第一阶段为基于参数形变模型<sup>[1-4]</sup>的分割技术；第二阶段为基于几何形变模型<sup>[5-9]</sup>的分割技术；第三阶段为前述两种基本技术的扩展形式。每一发展阶段都有其优点和局限性，大量的研究仍在深入进行。

### 3 第一阶段：参数形变模型

参数形变模型中活动围道具有能量的曲线，其分割过程是活动围道不断运动的过程，最终使得活动围道的内部能量和外部能量的加权和为最小<sup>[10]</sup>，即力的平衡状态。其中内力影响内部能量的变化，使曲线收缩（弹力），防止曲线过渡弯曲（弯曲力）；外力影响外部能量的变化，使曲线向所期望的图像特征运动。能量最小化的参数形变模型是参数形变模型的基本表示形式，对基本形式中的外力进行扩展，就得到性能提高的动力形式参数形变模型。以下将简单介绍两种模型的基本原理，重点介绍动力形式中的各种外力。外力的设计是参数形变模型中最重要的研究热点。

#### 3.1 基本形式（能量最小化形式的参数形变模型）

数学上，可将活动围道表示为一条曲线  $X(s, t) = (x(s, t), y(s, t))$ ，其中  $X$  是曲线上点的二维坐标， $t$  是时间参数， $s$  是弧长参数，围道的总弧长归一化到 1。该曲线在图像的空间域中运动使以下能量泛函：

$$E(X) = S(X) + P(X) \quad (1)$$

最小化。这里  $S(X)$  是内部能量泛函， $P(X)$  是外部能量泛函。内部能量泛函定义为

$$S(X) = \frac{1}{2} \int_0^1 \left[ \alpha(s) \left| \frac{\partial X}{\partial s} \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{\partial^2 X}{\partial s^2} \right|^2 \right] ds \quad (2)$$

外部能量泛函是外部能量函数  $p(x, y)$  沿曲线  $x(s)$  积分的值：

$$P(X) = \int_0^1 p(X(s)) ds \quad (3)$$

设  $I(x, y)$  是一灰度图像，一个可能使活动围道向边界运动的外部能量函数设计为

$$p(x, y) = -w_e |\nabla [G_\sigma(x, y) * I(x, y)]|^2 \quad (4)$$

$w_e$  是一个正的权因子， $G_\sigma(x, y)$  是标准差为  $\sigma$  的二维高斯函数， $\nabla$  是梯度算子， $*$  是 2D 图像卷积算子。用  $G_\sigma * I$  来代替  $I$  可以降低计算梯度的噪声。

由变分原理知，使能量泛函  $E(X)$  最小化的曲线  $X(s)$  满足下述欧拉 (Euler) 方程<sup>[1,10]</sup>：

$$\frac{\partial}{\partial s} \left( \alpha \frac{\partial X}{\partial s} \right) - \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left( \beta \frac{\partial^2 X}{\partial s^2} \right) - \nabla p(X) = 0 \quad (5)$$

(5) 式揭示了变形模板分割技术的物理意义，(5) 式实质是一个力平衡方程：

$$F_{\text{int}}(X) + F_{\text{ext}}(X) = 0 \quad (6)$$

其中内力为以下形式：

$$F_{\text{int}}(X) = \frac{\partial}{\partial s} \left( \alpha \frac{\partial X}{\partial s} \right) - \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left( \beta \frac{\partial^2 X}{\partial s^2} \right) \quad (7)$$

外力为以下形式:

$$F_{\text{ext}}(X) = -\nabla p(X) \quad (8)$$

(8) 式决定的外力称为高斯势力。这表明活动围道能量最小化过程就是在图像信息的外力和曲线本身的内力作用下运动, 达到力平衡状态的过程。

图 1(b) 给出了高斯外力在凹型边界处所形成的外力场。该分割技术存在几个缺点:

(1) 外力只能是势力, 无法人为地添加外力以控制围道的变形。

(2) 在边界附近, 高斯外力迅速减小。

(3) 在图像灰度变化均匀的区域, 高斯外力为零, 不提供任何指引信息。这样在该区域就只有内力作用, 活动围道最终会收缩为一个点。

(4) 高斯外力抗干扰性很差, 微小的噪声就会改变外力方向, 使活动围道的运动偏离正确的运动方向。

(5) 活动围道的收敛范围小。上述缺点 (2), (3) 和 (4) 决定了初始化的活动围道必须在对象边界很近的区域, 否则将不能收敛到正确的对象边界。

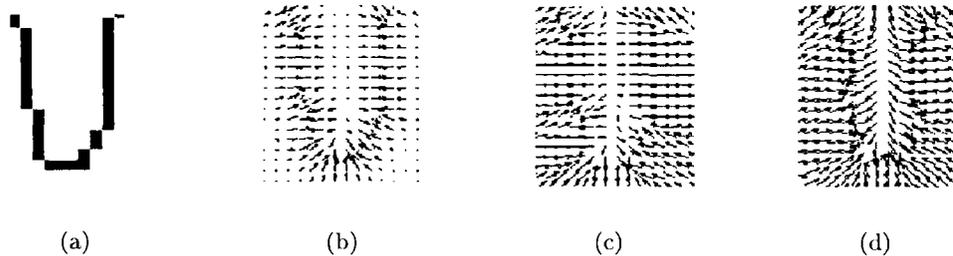


图 1 (a) 为凹形边界灰度图像 (b) 为 (a) 对应的高斯外力场  
(c) 为 (a) 对应的距离势力场 (d) 为 (a) 所对应的 GVF 力场

### 3.2 动力形式的参数形变模型

动力形式是能量最小化形式的一种扩展形式。这种表示方法允许使用除势力以外的其它更多类型的外力。按照牛顿第二定律, 可以推导出活动围道  $X(s, t)$  的动力学方程为如下形式:

$$\gamma \frac{\partial X}{\partial t} = F_{\text{int}}(X) + F_{\text{ext}}(X) \quad (9)$$

这里,  $\gamma$  为阻尼系数, 内力的表达形式见 (7) 式。与能量最小化形式不同, 动力形式中的外力可以是势力也可以不是势力, 也可以是几种不同外力的合力, 因此允许人为地添加一些外力, 来控制活动围道的运动, 这是动力形式参数化形变模型的一个显著优点。设计不同特性的外力是基于参数形变模型分割技术最重要的研究热点。设计这些外力的主要目的是为了扩大活动围道的收敛范围, 增强外力的抗噪能力。以下介绍几种典型的外力。

3.2.1 多分辨率的高斯势力 这种方法首先用较大  $\sigma$  值, 获得大致接近于对象棱边的低分辨率活动围道, 然后用减小的  $\sigma$  值继续迭代变形获得分辨率逐渐加大的活动围道, 直到得到满意的分割结果<sup>[1,11]</sup>。

3.2.2 压力 Cohen<sup>[10]</sup> 在形变模型中, 除了高斯势力外, 又引入了另外一种外力——压力。压力可以扩张或者收缩活动围道, 使得初始活动围道不必在初始化对象的边界附近。

3.2.3 距离势力 距离势力中用距离映射值来定义能量函数<sup>[12]</sup>。这种方法将性能良好的局部棱边检测算子和全局的形变模型结合起来。如果棱边检测算子能正确检验出真正的边界点, 那么形变模型上的点的运动应该是向着与之距离最近的边界点运动。所以, 图像中每一点与最近的边界点之间的距离就可表示成该点的能量。

3.2.4 梯度矢量流 (Gradient Vector Flow, GVF) GVF 方法采用矢量散射方程将边界梯度的外力散射到远离边界的区域<sup>[13,14]</sup>。在灰度均匀区域, GVF 方法仍然有指向边界的外力, 且该外力在边界附近变化缓慢。更为重要的是, 该方法克服了高斯势力和距离势力的形变模型难以收敛到凹形边界的困难。

图 1(d) 给出了梯度矢量流外力在凹型边界处所形成的外力场, 可以看出 GVF 外力特性明显由于高斯外力和距离势力。

3.2.5 动态距离力 与距离势力不同, 动态距离力采用有符号的距离直接定义活动围道上各点的外力值。该距离通过计算活动围道上各点法线方向上与之最近的边界点来得到。表 1 给出了上述各外力的性能比较。图 2 是各外力分割凹型边界所得的结果。

参数化形变模型已经得到了广泛的应用。但是, 它的主要局限性是没有拓扑自适应性, 无法处理活动围道分离或合并的情况。当对象的拓扑性改变时, 参数化形变模型就必须动态地构

表 1 动力形式中各种外力的性能比较

外力形式	收敛范围	凹型边界收敛	灰度变化均匀区域有指引力	计算量	其它局限性
高斯势力	小	否	否	小	方差的选取
压力	较大	可以	有	小	易形成环状, 方向的选取
距离力	较大	否	有	大	
动态距离力	较大	可以	有	大	
梯度矢量流	大	可以	有	较大	

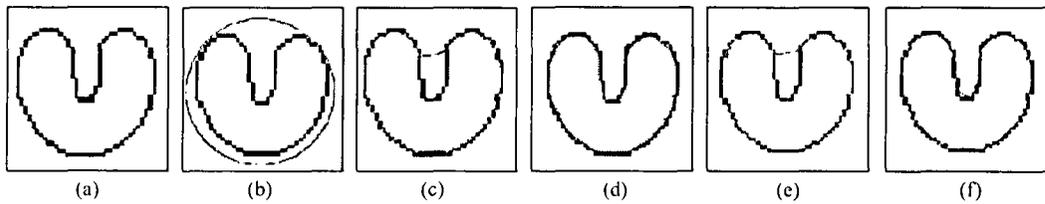


图 2 各种外力分割结果比较 (a) 原图 (b) 初始的活动围道  
(c) 高斯外力分割结果 (d) 压力 + 高斯势力分割结果 (e) 距离势力分割结果 (f) GVF 外力分割结果

造一个新参数来描述这种变化, 这种构造算法是相当复杂的<sup>[15,16]</sup>。第二阶段发展的几何形变模型正是为了有效地解决该模型拓扑自适应差的局限性。

## 4 第二阶段: 几何形变模型

几何形变模型是由 Caselles 等人<sup>[7]</sup>和 Malladi 等人<sup>[6]</sup>提出。该模型将活动围道看成两个区域的分界面, 活动围道的运动过程就是分界面的进化过程, 从数学意义上讲, 是更为严格的一种曲线进化过程。由于曲线进化仅使用曲线的几何量 (法线和曲率), 而不使用参数量 (导数), 因此该模型称为几何形变模型。以下简单介绍该模型的基本理论, 重点介绍模型中的速度函数。速度函数的设计是几何形变模型中最重要的研究热点。

### 4.1 基本理论

几何形变模型提出和求解是基于曲线进化理论<sup>[9,17-19]</sup>和曲线进化的水平截集表示方法 (level set method)<sup>[20,21]</sup>。

4.1.1 曲线进化理论 设进化曲线为  $X(s, t) = [x(s, t), y(s, t)]$ ,  $t$  为时间,  $s$  为任意参数,  $N$  为内单位法线,  $\kappa$  为曲率。曲线的进化方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \beta(s, t)N \\ X(s, 0) &= X_0(s) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$\beta$  为进化速度,  $N$  为法线分量<sup>[9]</sup>.  $\beta$  一般取为曲率  $\kappa$  的函数, 即  $\beta = F(\kappa)$ . 曲线进化理论中最广为研究和使用的是一阶模型, 即  $\beta = \beta_0 - \beta_1 \kappa$ . 这个模型分别代表着常数变形和曲率变形.

4.1.2 水平截集表示方法 Osher 和 Sethian<sup>[20,22,23]</sup> 提出了用水平截集方法表示上述曲线进化方程. 该方法中, 进化的曲线被嵌在比曲线高一维的曲面中. 进化的曲线始终对应进化曲面的零值水平截集. 水平截集就是指具有相同函数值的点的集合. 如图 3 所示.

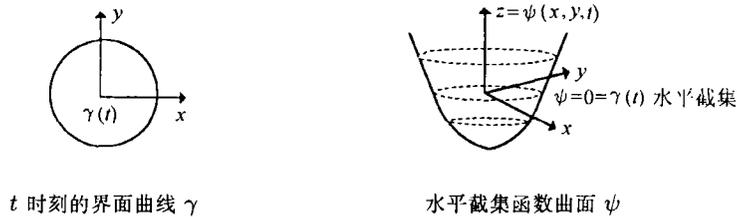


图 3 界面进化的水平截集表示形式

可以得到零水平截集 (即界面曲线) 的进化方程:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = F(\kappa) |\nabla \psi| \quad (13)$$

用水平截集方法表示曲线进化有许多优点. 这种方法的数值计算是稳定的; 可以很自然地处理拓扑变化; 曲线的几何量是很容易计算的; 而且该方法很容易扩展到高维.

#### 4.2 几何形变模型的表示形式

活动围道进化方程的速度项应由图像信息和围道本身的信息决定. 速度项在进化中起着关键作用, 它不但要保证大小和方向合适, 而且要保证进化到对象边界时, 围道能够及时停止运动; 在出现曲线进化越过了对象边界的情况时, 速度项要保证可以返回到对象边界处, 即阻止边界泄漏. 在几何形变模型中, 最重要的任务就是设计速度函数.

Caselles 等人<sup>[5]</sup> 和 Malladi 等人<sup>[6]</sup> 建议了最基本的几何形变模型表示形式:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = c(\kappa + V_0) |\nabla \psi| \quad (14)$$

这里  $V_0$  是常数,  $\kappa$  是曲线的曲率,  $c$  为乘性速度停止项, 其表达形式如下:

$$c = \frac{1}{1 + |\nabla(G_\sigma(x, y) * I(x, y))|} \quad (15)$$

$V_0$  常数项代表常数变形, 其作用是压缩或者膨胀活动围道, 类似于参数形变模型中的压力; 曲率  $\kappa$  代表曲率变形, 其作用是光滑活动围道, 类似于参数形变模型中的弹力.

理想情况下, 当活动围道进化到对象边界时, 乘性速度停止项为零, 围道运动停止在对象边界处. 然而实际情况中, 乘性项在边界附近, 仅是减慢围道的进化速度, 并不能完全停止围道运动, 而一旦围道越过了正确的边界, 围道就不可能返回到正确的边界处.

为了解决 (15) 式速度项的缺点, Caselles 等人<sup>[7,24]</sup> 和 Kichenassamy 等人<sup>[25,26]</sup> 建议了短程活动围道 (Geodesic active contours) 的几何形变模型. 其核心思想是用沿梯度流运动的概念来重新设计 (14) 式的曲率变形速度项. 短程活动围道的具体表达形式如下:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = c(\kappa + V_0) |\nabla \psi| + \nabla c \cdot \nabla \psi \quad (16)$$

该方法在曲率变形速度项中加入了  $\nabla c \cdot N$  项, 该项使得活动围道在越过对象边界时, 可以将围道重新“拉回”边界处。

(16) 式中的速度项仍有可能出现泄漏的情况。Siddiqi 等人<sup>[27]</sup> 建议了用沿梯度流运动的概念, 进一步修改 (16) 式中的常数变形速度项, 修改后的几何形变模型表示形式如下:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \lambda(c\kappa|\nabla \psi| + \nabla c \cdot \nabla \psi) + (c + \frac{1}{2}X \cdot \nabla c)|\nabla \psi| \quad (17)$$

该方法在常数变形速度项加入了  $X \cdot \nabla c/2$  的吸引速度项, 可进一步阻止边界泄漏的情况。

表 2 为上述三种几何形变模型表示形式的特性比较。图 4 给出了短程活动围道和 Siddiqi 等人建议的模型分割图像的例子。图 5 给出了 Siddiqi 等人建议的模型分割多个对象的例子, 从中可以看出几何形变模型的拓扑自适应性。

表 2 三种几何形变模型的表示形式特性比较

表示形式	拓扑自适应性	凹性边界的收敛性	处理边界泄漏的能力
第一种表示形式	强	良好	弱
第二种表示形式	强	良好	较强
第三种表示形式	强	良好	很强

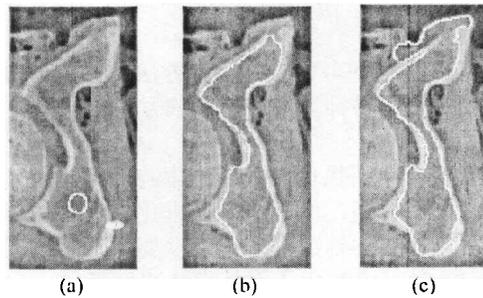


图 4 几何形变模型分割图像的例子

(a) 原图像, 白色圆圈为初始围道 (b)(18) 式的分割结果 (c) (17) 式的分割结果

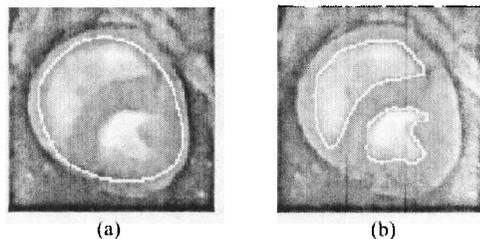


图 5 几何形变模型的拓扑自适应性示例

(a) 原图像, 白色圆圈为初始围道 (b)(18) 式的分割结果

参数形变模型和几何形变模型所面临的主要问题是模型的抗干扰性差和鲁棒性差。这是由于两种模型使用的信息均是局部信息 (例如导数、曲率和法线) 和确定性信息 (例如力场和速度场) 造成的。模型鲁棒性差带来的另一个缺点是分割结果的正确性对初始活动围道位置的依赖性较大, 这在参数形变模型中表现得尤为严重。

为了克服上述形变模型的缺点, 目前形变模型的发展致力于利用各种数学知识, 在上述两种基本形变模型中集成入高层的全局指导信息, 以增强模型的鲁棒性和分割结果的精确性。这一阶段可称为形变模型发展的第三阶段。

## 5 第三阶段: 标准形变模型的扩展形式

如何增强前述基本形变模型的性能是当前形变模型研究的热点。各种形变模型扩展形式主要围绕着高层全局指导信息的使用, 图像多特征信息的集成以及能量函数设计等方面展开。

使用高层指导信息的扩展形式有: Staib 和 Duncan 建议的傅里叶形变模型 (Deformable Fourier models)<sup>[28]</sup>。在该模型中, 用傅里叶变换来参数化变形曲线。低阶和高阶的傅氏系数分别描述了模型的全局特性和局部特性。对多个样本进行训练, 以得到傅氏系数的先验概率分布密度。Pentland 和 Horowitz<sup>[29]</sup>, Nastar 和 Ayache<sup>[30]</sup> 建议的基于模式分析的形变模型 (Deformable models using modal analysis)。该模型在仅保留低阶模式时, 所得到的曲线或曲面仍然可以弯曲, 具有尖角。Terzopoulos 和 Metaxas 建议的可以集成全局和局部形状特征的超二次曲面形变模型<sup>[31]</sup>。该模型认为对象边界的参考形状是超椭圆柱体。Cootes 等人建议的活动形状模型 (ASM) 用来集成先验形状信息<sup>[32,33]</sup>。文献 [34] 中, 认为对象边界的形状为 B 样条, 图像模型为基于区域的模型, 并用区域内部一致性的信息引导活动围道的运动。文献 [35, 36], 认为图像中像素灰度值的分布满足特定的概率分布。文献 [37] 建议训练活动围道, 以学习关于边界多种信息的概率分布。

集成图像多特征信息的扩展形式有: 文献 [38] 建议使用边界, 灰度和纹理信息来引导活动围道的进化。文献 [39] 建议使用灰度和纹理信息引导活动围道的运动。

设计新能量函数的扩展形式有: 文献 [40,41] 分别建议了从 Mumford-Shah 分割泛函推导出的能量泛函, 这两种能量泛函在实现图像分割过程中同时实现图像去噪。

## 6 总结与展望

基于形变模型的分割技术发展到今天, 已经成为图像分割技术中强有力的方法之一, 尤其是在医疗和遥感图像分割中。但目前已报道的分割技术仍然存在以下缺点:

(1) 模型的全局信息或者是通过对样本训练所得, 或者表现为假设模型为某种形状, 这限制了形变模型分割技术的使用。更为有效的全局信息是直接基于图像数据的, 不需要任何预先处理, 例如对象区域内部统计特性一致性的信息。

(2) 如果对象边界不明显, 此时各模型外力均得不到有正确指引信息值。

(3) 不能有效地控制边界的拓扑性。几何形变模型常常出现不正确的拓扑结构。

形变模型进一步的研究方向可以在能量函数、外力和速度函数设计, 有效全局信息的设计, 模型表示, 模型训练和学习, 模型参数的自适应等领域。另一个挑战性的研究方向是设计可以控制拓扑性的形变模型, 即可根据需要, 控制和改变模型的拓扑性。

## 参 考 文 献

- [1] M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos, Snakes: active contour models, *Int'l J. Comp. Vis.*, 1987, 1(4), 321-331.
- [2] A. A. Amini, T. E. Weymouth, R. C. Jain, Using dynamic programming for solving variational problems in vision, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1990, 12(9), 855-867.
- [3] L. D. Cohen, On active contour models and balloons, *CVGIP: Imag. Under.*, 1991, 53(2), 211-218.

- [4] T. McInerney, D. Terzopoulos, A dynamic finite element surface model for segmentation and tracking in multidimensional medical images with application to cardiac 4D image analysis, *Comp. Med. Image Graph.*, 1995, 19(1), 69–83.
- [5] V. Caselles, F. Catte, T. Coll, F. Dibos, A geometric model for active contours, *Numerische Mathematik*, 1993, 66, 1–31.
- [6] R. Malladi, J. A. Sethian, B. C. Vemuri, Shape modeling with front propagation: a level set approach, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1995, 17(2), 158–175.
- [7] V. Caselles, R. Kimmel, G. Sapiro, Geodesic active contours, in *Proc. 5th Int'l Conf. Comp. Vis.*, Cambridge, MA, 1995, 694–699.
- [8] R. T. Whitaker, Volumetric deformable models: active blobs, *Tech. Rep. ECRC-94-25*, European Computer-Industry Research Center GmbH, 1994.
- [9] G. Sapiro, A. Tannenbaum, Affine invariant scale-space, *Int'l J. Comp. Vis.*, 1993, 11(1), 25–44.
- [10] L. D. Cohen, On active contour models and balloons, *CVGIP: Imag. Under.*, 1991, 53(2), 211–218.
- [11] D. Terzopoulos, A. Witkin, M. Kass, Constraints on deformable models: recovering 3D shape and nonrigid motion, *Artificial Intelligence*, 1988, 36(1), 91–123.
- [12] L. D. Cohen, I. Cohen, Finite-element methods for active contour models and balloons for 2-D and 3-D images, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1993, 15(11), 1131–1147.
- [13] C. Xu, J. L. Prince, Generalized gradient vector flow external forces for active contours, *Signal Processing—An International Journal*, 1998, 71(2), 131–139.
- [14] C. Xu, J. L. Prince, Snakes, shapes, and gradient vector flow, *IEEE Trans. on Imag. Proc.*, 1998, 7(3), 359–369.
- [15] R. Durikovic, K. Kaneda, H. Yamashita, Dynamic contour: a texture approach and contour operations, *The Visual Computer*, 1995, 11(6), 277–289.
- [16] T. McInerney, D. Terzopoulos, Topologically adaptable snakes, in *Proc. 5th Int'l Conf. Comp. Vis.*, Cambridge, MA, 1995, 840–845.
- [17] B. B. Kimia, A. R. Tannenbaum, S. W. Zucker, Shapes, shocks, and deformations I: the components of two-dimensional shape and the reaction-diffusion space, *Int'l J. Comp. Vis.*, 1995, 15(3), 189–224.
- [18] R. Kimmel, A. Amir, A. M. Bruckstein, Finding shortest paths on surfaces using level sets propagation, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1995, 17(6), 635–640.
- [19] L. Alvarez, F. Guichard, P. L. Lions, J. M. Morel, Axioms and fundamental equations of image processing, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1993, 123(3), 199–257.
- [20] S. Osher, J. A. Sethian, Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *J. Computational Physics*, 1988, 79(1), 12–49.
- [21] J. A. Sethian, *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Material Science*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2nd ed., 1999, 6–12.
- [22] J. A. Sethian, Curvature and evolution of fronts, *Commun. Math. Phys.*, 1985, 101(4), 487–499.
- [23] J. A. Sethian, A review of recent numerical algorithms for hypersurfaces moving with curvature dependent speed, *J. Differential Geometry*, 1989, 31, 131–161.
- [24] V. Caselles, R. Kimmel, G. Sapiro, Geodesic active contours, *Int'l J. Comp. Vis.*, 1997, 22(1), 61–79.
- [25] A. Yezzi, S. Kichenassamy, A. Kumar, P. Olver, A. Tannenbaum, A geometric snake model for segmentation of medical imagery, *IEEE Trans. on Med. Imag.*, 1997, 16(2), 199–209.
- [26] S. Kichenassamy, A. Kumar, P. Olver, A. Tannenbaum, A. Yezzi, Conformal curvature flows: from phase transitions to active vision, *Arch. Rational Mech. Anal.*, 1996, 134, 275–301.
- [27] K. Siddiqi, Y. B. Lauziere, A. Tannenbaum, W. Zucker, Area and length minimizing flows for shape segmentation, *IEEE Trans. on Imag. Proc.*, 1998, 7(3), 433–443.
- [28] L. H. Staib, J. S. Duncan, Boundary finding with parametrically deformable models, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1992, 14(11), 1061–1075.
- [29] C. Nastar, N. Ayache, Frequency-based nonrigid motion analysis: application to four dimensional medical images, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1996, 18(11), 1067–1079.

- [30] A. Pentland, B. Horowitz, Recovery of nonrigid motion and structure, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1991, 13(7), 730-742.
- [31] D. Terzopoulos, D. Metaxas, Dynamic 3D models with local and global deformations: deformable superquadrics, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1991, 13(7), 703-714.
- [32] T. F. Cootes, A. Hill, C. J. Taylor, J. Haslam, Use of active shape models for locating structures in medical images, *Imag. Vis. Computing J.*, 1994, 12(6), 355-366.
- [33] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, J. Graham, Active shape models—their training and application, *Comp. Vis. Imag. Under.*, 1995, 61(1), 38-59.
- [34] Mario A. T. Figueiredo, Jose M. N., Anil K. Jain, Unsupervised contour representation and estimation using B-splines and a minimum description length criterion, *IEEE Trans. on Imag. Proc.*, 2000, 9(6), 1075-1087.
- [35] C. Chesnaud, P. Refregier, V. Boulet, Statistical region snake-based segmentation adapted to different physical noise models, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1999, 21(11), 1145-1157.
- [36] C. Chesnaud, V. Page, P. Refregier, Improvement in robustness of the statistically independent region snake-based segmentation method of target-shape tracking, *Optics Letters*, 1998, 23(7), 488-490.
- [37] S. Fenster, J. Kender, Sectorized snakes: evaluating learned-energy segmentations, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2001, 33(9), 1028-1034.
- [38] N. Paragios, R. Deriche, Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2000, 22(3), 266-280.
- [39] MS. Horritt, DC. Mason, AJ. Luckman, Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model, *Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(13), 2489-2507.
- [40] A. Tsai, A. Yezzi, and A. Willsky, Curve evolution implementation of the Mumford-Shah functional for image segmentation, denoising, interpolation, and magnification, *IEEE Trans. on Imag. Proc.*, 2001, 10(8), 1169-1184.
- [41] T. Chan, L. Vese, Active contours without edges, *IEEE Trans. on Imag. Proc.*, 2001, 10(2), 266-272.

## A SURVEY OF IMAGE SEGMENTATION TECHNIQUES USING DEFORMABLE MODELS

Zhang Lifei    Wang Dongfeng    Shi Yonggang    Zou Mouyan

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

**Abstract** Image segmentation using deformable models encompasses a class of techniques developed in recent years and has been studied extensively. The techniques offer a novel method for effectively extracting the border of an irregular object in images. This paper introduces briefly the fundamental principle and history of image segmentation techniques. A few typical deformable models are reviewed including a discussion for their advantages and disadvantages. Finally, the limitation and the further possibilities of current segmentation techniques using deformable model are analyzed.

**Key words** Image segmentation, Deformable model, Irregular object

张丽飞: 女, 1975年生, 博士生, 研究方向为图像分割, 图像复原和图像分析。  
王东峰: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为图像配准, 图像分析。  
时永刚: 男, 1970年生, 博士生, 研究方向为图像配准, 图像处理。  
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。