

MUBIAO LUNKUODE
TIQU FANGFAJI YINGYONG

UTER

目标轮廓的提取方法及应用

娄联堂 著
甘肃人民出版社

姜联堂 著

目标管理的提职方法及应用

甘肃人民出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

目标轮廓的提取方法及应用 / 娄联堂著. —兰州: 甘肃人民出版社, 2006. 11
ISBN 7-226-03501-4

I. 目... II. 娄... III. 电子技术—应用—图像处理—高等学校—数学参考资料 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 126620 号

责任编辑: 宋学娟

封面设计: 王林强

目标轮廓的提取方法及应用

娄联堂 著

甘肃人民出版社出版发行

(730000 兰州市南滨河东路 520 号)

甘肃方正纸业有限责任公司印刷

开本 850 毫米 × 1168 毫米 1/32 印张 6 插页 2 字数 148 千

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 400

ISBN 7-226-03501-4 定价: 16.00 元

前 言

图像分割是图像处理、计算机视觉、模式识别中的核心问题，并对它们的发展有非常大的影响。目标轮廓提取是图像分割重要研究内容，在图像识别与图像分析中占有重要地位，已广范应用于军事、医学图像分析等许多领域，取得了令人瞩目的研究成果。

本书是在综合国内外相关文献及作者近年来的研究成果的基础上，经过反复酝酿而写成的。本书旨在把目标轮廓提取的理论、方法和应用系统地介绍给读者，尤其是近年来出现的新理论和新方法。全书分为四大部分，共 7 章。第一部分（第 1-3 章）对目标轮廓提取方法作了概述，重点介绍了基于偏微分方程的目标轮廓提取方法。第二部分（第 4 章）介绍了基于量子力学粒子运动规律的目标轮廓提取方法。第三部分（第 5 章）介绍了具有仿射不变性的目标轮廓提取方法。第四部分（第 6-7 章）介绍了目标轮廓提取方法在舰船打击效果评估及三维医学图像分割中的应用。第 8 章对全书作了总结，并指出了目标轮廓提取理论与方法研究领域可能的研究方向。

本书的完成得到了华中科技大学丁明跃教授和本书编辑的大力帮助，Aaron Fenster 教授提供了部分医学图像，作者愿借此机会对他们表示衷心的感谢。

本书涉及的研究工作还得到了湖北省自然科学基金项目（编号 2004ABA016）及湖北省教育厅科学技术研究项目（编号：2004D004）的资助。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中错误及不妥之处在所难免，恳请各方面专家提出批评、指正。

内容简介

本书介绍了目标轮廓提取方法及应用问题。首先讨论了基于偏微分方程目标轮廓提取方法，如主动轮廓模型、目标轮廓能量全局最小主动轮廓模型、拓扑自适性 Snake 模型，以及水平集分割方法等，指出了各自的优缺点。在此基础上，研究了一种基于最小作用曲面及图像二分法的封闭轮廓提取方法。通过对经典力学与量子力学中粒子运动规律的分析 and 类比，将量子力学中关于粒子运动规律引入目标轮廓提取，提出了量子轮廓模型概念，讨论了量子轮廓模型中有分枝目标轮廓的提取、轮廓曲线的收敛性及轮廓曲线光滑性等问题。讨论了仿射变换参数的规范化问题，给出了形殊点的一个无穷类以及它们的极限性质；研究了一种基于轮廓曲线能量和遗传算法的仿射变换参数求解方法。最后，将具有仿射不变性的目标轮廓自动提取方法应用于舰船打击效果评估，将目标轮廓提取方法应用于三维医学图像分割。

本书可供从事图像信息处理和分析的工程技术人员、高等学校师生参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 目标轮廓提取方法文献综述	(7)
1.3 主要研究内容	(16)
第二章 基于偏微分方程的目标轮廓提取理论与方法	(19)
2.1 引言	(19)
2.2 主动轮廓模型	(20)
2.3 梯度向量场可变形模型	(22)
2.4 目标轮廓能量全局最小主动轮廓模型	(26)
2.5 拓扑自适应 Snake 模型	(28)
2.6 水平集分割方法	(32)
2.7 参数主动轮廓模型与几何主动轮廓模型之间的 关系	(33)
2.8 本章小节	(38)
第三章 基于最小作用曲面及图像二分法的封闭轮廓 提取方法	(39)
3.1 引言	(39)
3.2 基于最小作用曲面的封闭轮廓提取方法	(40)
3.3 基于最小作用曲面及图像二分法的封闭轮廓提 取方法	(42)
3.4 实验结果与分析	(47)
3.5 本章小节	(53)
第四章 基于量子力学粒子运动规律的目标轮廓提取方法	(54)
4.1 引言	(54)

4.2	量子轮廓模型	(55)
4.3	基于量子力学粒子运动规律的目标轮廓提取方法	(67)
4.4	算法性能评价	(71)
4.5	实验结果与分析	(76)
4.6	本章小节	(90)
第五章	具有仿射不变性目标轮廓提取方法	(92)
5.1	引言	(92)
5.2	仿射变换参数规范化处理	(93)
5.3	利用形殊线求解变换参数	(94)
5.4	基于轮廓曲线能量和遗传算法的仿射变换参数 求解方法	(100)
5.5	本章小节	(111)
第六章	基于目标轮廓与专家知识库的舰船打击效果 评估	(113)
6.1	引言	(113)
6.2	舰船打击效果评估的两种模式	(120)
6.3	舰船打击效果评估知识库	(122)
6.4	目标轮廓及打击部位的提取	(125)
6.5	舰船打击效果评估数学模型	(127)
6.6	本章小节	(132)
第七章	三维医学超声图像颈动脉血管斑块分类系统	(133)
7.1	系统设计	(134)
7.2	三维医学图像分割	(136)
7.3	颈动脉血管斑块特征提取及分类	(149)
7.4	本章小结	(156)
第八章	前景与展望	(158)
参考文献		(160)
附录	量子轮廓模型轮廓曲线跟踪收敛性证明	(182)

第一章 绪 论

1.1 研究背景

自20世纪60年代图像处理与机器视觉成为一门独立的工程学科以来,特别是随着计算机技术的普及,图像处理与机器视觉有了很大的发展。但是,这个领域无论是在理论上还是在应用上均没有取得人们预期的进展和成果^{[1][2][3]}。这门学科所面临的窘境是:一些对于普通的人来说很容易的问题,但计算机处理起来却相当困难。例如,人的视觉系统能够自动对图像进行分割,识别图像中的背景和目标。然而,图像的自动分割仍然是计算机视觉中最具挑战性的问题之一,制约着图像处理与机器视觉学科的发展与应用。人的视觉系统对图像进行自动分割是一个由大脑和视觉系统共同完成的复杂过程。它不单是一个简单的逻辑推理过程,人的情感因素也起着重要作用,其中存在许多未解之迷^[4]。人的视觉系统对图像进行成功分割必须满足两个条件:一是被分割图像所需的信息包含在被分割图像中;二是人的视觉系统本身具有区分图像的能力。如色盲患者可能无法正确区分不同彩色的图像。同样,无论我们的算法多么先进,也不可能分割所有的图像,因为有些图像,如噪声很大的图像,噪声会淹没图像中的目标,这类图像本身不含有分割图像所必须的信息,是不可分割的。实际上,许多图像分割方法,如门限分割法和区域生长方法,均是以这一假定作为基础的,没有利用目标的先验知识;另一方面,在现实生活中,人在对图像进行自动分割时,常常需要利用目标的先验

知识。因此,为了改善图像的分割质量,在分割算法中,必须引入图像或目标模型(确定性模型或统计模型)。这就是所谓的基于模型的图像分割方法。

图像分割是一个困难而又必须面对的问题。它是图像分析的第一步,同时也是图像识别与图像理解的重要组成部分。在计算机视觉中,图像分割结果决定了后续分析与识别的结果。对于各种常用的图像分割方法进行分析发现,分割图像的基本依据和条件有以下三个方面^[5]:

- 1) 同一分割区域具有相同或相似的性质,如灰度相近、纹理相似等;
- 2) 相邻区域之间对选定的某种性质判据而言,存在显著差异;
- 3) 每一分割区域边界应是完整的,并具有位置准确性。

图像分割方法可以分为三大类:一类是基于图像全局知识(如图像直方图)的分割方法;一类是基于边缘的图像分割方法;第三类是基于区域的图像分割方法。在第一类分割方法中,灰度门限法是最简单也是最有效的分割方法。基于边缘的分割方法在边缘检测算子获得边缘图像的基础上,完成对图像的分割。常用的方法包括边缘图像门限法^[6]、边缘松弛法^{[7][8]}、边界跟踪^{[9][10]}、图搜索法检测边界^{[11][12]}、动态规划检测边界^{[11][13][14]}、Hough变换法^{[15][16][17]}等。基于边缘检测算子的边缘检测方法所得到的边缘是不连续的,实际上只是一些无序的点。然后,再由这些点组成物体的轮廓,进而确定目标的区域。采用基于边缘方法所检测出的目标区域并不能够保证是完整的。因为由无序的、残缺不全的、受噪声影响的点重建目标轮廓本身就是一个尚未完全解决的难题。基于像素细化与曲线拟合已经走到了头^[3],边缘检测未能解决图像分割全部问题。Hough变换和模板匹配也可用于分割图像,提取目标轮廓。但是这些方法需要知道所要检测目标的形状等先验信息,在一些实际过程,这种假设不一定能够满足。因此,其应用受到一定限

制。基于区域的分割方法有很多，如区域合并与分裂^{[8][9][18]}、Watershed分割^{[19][20][21]}等。

利用目标轮廓提取方法对图像进行分割也是一种有效途径。目标轮廓提取利用高层信息进行图像分割。在这些方法中，基于偏微分方程的目标轮廓提取方法，如 snakes 或 active contour models，水平集分割方法（level set methods）等，尤其引人注目。主动轮廓模型由用户所选择的目标轮廓点得到目标的一条封闭的初始轮廓曲线，并将目标轮廓提取转化为一个在图像中寻找满足一定条件（如曲线光滑等）下的能量最小函数曲线问题。

目标轮廓提取方法和理论不仅是当前计算机视觉的一大研究热点，有重要的理论意义，同时，又可以应用于图像分析与图像理解等不同领域，如医学图像分析、图像匹配制导等。医学图像分割及基于图像理解的典型目标打击效果评估是本书目标轮廓提取方法的两个工程应用背景。

（1）医学图像分割

近几十年来，随着计算机技术和成像技术的普及与提高，医学图像处理得到了迅速发展，为临床提供了更多、更全面的诊断与治疗信息。根据医学图像所提供信息内涵的不同，可将图像分为两大类：一类是解剖结构图像，如CT、MRI、B超等；另一类是功能图像，如SPECT（Single Photon Emission Computed Tomography）、PET（Positron Emission Tomography）等。这两类图像由于成像原理不同各有其优缺点^{[22][23]}。文献[24]比较了分别用²⁰¹Tl SPECT及MRI检测颈部淋巴瘤的敏感性（sensitivity）与特异性（specificity），结果表明MRI有较高敏感性与特异性，分别为92%和92%，而²⁰¹Tl SPECT的高敏感性与特异性仅为71%和71%，文献[25]也得到了相同的结论，但功能图像提供的器官功能代谢信息是解剖图像所不能替代的。

医学图像分析被广泛应用于医学研究、临床诊断与治疗过程

中。例如，它们可以用于病变部位的检查、定位、大小测量以及疾病的判别。从医学图像中可以得到许多人体内部的有用信息，这些信息以前常常需要通过创伤性外科手术才能得到。现在已经有许多医学图像分析系统投入临床或科学研究中，如国产SJ7-ETV-3内窥镜图像显示系统。这类系统只能用于临床观测，缺乏图像分析功能；美国的RJ20-视野2000病理图像分析系统可以进行DNA分析、骨髓细胞分析、肿瘤普查及肾小球分析，也可以定量计算目标面积、周长、个数等。

由于目前图像分割技术的局限性，医学图像的自动分割仍是一个尚未解决的问题；另一方面，由专家手工进行医学图像分割也存在分割不精确、可重复性差以及所需时间长等缺点。因此，人机交互式的半自动图像分割成为当前医学图像分割的一种常用方法。

（2）基于图像理解的打击效果评估

基于图像理解的打击效果评估是在对目标实施打击后利用各种成像传感器（如光学照相机，雷达等）对打击目标进行观察得到打击后的图像，结合其他目标信息（如打击前的目标图像，与目标有关的地理位置、几何外形、目标特性等信息），利用计算机提取目标特征（如目标轮廓）和打击部位，通过对打击部位的分析进行打击效果评估。因此，要完成基于图像理解的打击效果评估，最关键也是首先必须解决的问题是目标轮廓的提取及打击部位的正确定位。也就是要让计算机自动或半自动确定“击中了目标的什么部位”？根据受打击目标的相关信息判断所打击的部位是否是要害部位，最终给出打击效果的综合评估。如果不能精确提取目标轮廓，对打击部位进行正确定位，就很难实现打击效果的正确评估。打击效果评估中的目标轮廓提取具有以下两个特点：

第一，打击效果评估中的目标轮廓提取实质上是基于图像理解的目标轮廓提取，属于高层次上的轮廓提取。不仅要求能够提

取目标轮廓，而且要让计算机理解什么是目标，打击部位对于目标的重要性。要做到这一点，就要知道打击目标的一些先验信息。事实上，在对一个目标实施打击之前，人们需要对目标进行周密侦察，获得该目标的各种情报资料，并通过对这些情报进行认真分析、处理后得到目标的先验信息。例如，在水面舰船的打击效果评估中，可以通过各种渠道得到这些舰船受打击前的图像（图1.1）及与这些舰船有关的其他图片数据（图1.2）及文字资料，这些先验知识对精确提取目标轮廓及对打击效果进行评估是非常重要的。

第二，基于图像理解的典型目标打击效果自动评估对于计算机自动提取目标轮廓提出了新的要求：根据目标轮廓的先验信息自动提取目标轮廓，理解要打击的目标。现代战争是高科技的信息化战争，进行目标打击效果评估是现代战争的重要特点和标志，也是现代战争的组成部分。在现代战争中，准确进行打击效果评估，不仅能给战役指挥员正确决策与指挥提供可靠依据，而且能够最大限度地优化火力，提高战役资源的利用效率，避免贻误战机或造成战役资源的浪费。但是，由于所使用传感器的不同，一个目标在不同图像中可能呈现出不同特征，打击效果的人工评估将是一件非常困难且费时的事情，且对判图员的训练是一个长期的、昂贵的过程，一个优秀的卫星图片判图员往往需要几年的培训时间，且判图的效率很低；另一方面，在现代战争中，为节约战争成本和减小国际外交压力，在每一次打击之后，常常需要对打击效果进行评估以决定是否需要进行再次打击。因此，在打击以后，常常需要利用侦察卫星、各型战略战术侦察机、地面战术侦察部队和谍报人员对打击目标进行详细侦察得到大量目标毁伤照片再对打击目标进行综合评估，人工判图方式处理这些图片需要很长的时间，无法满足快速反应与决策的需要。因此，基于图像理解的典型目标打击效果的自动评估就成为今后打击效果评估

的一种重要方式。

综合上述，打击效果评估中的目标轮廓提取要求计算机能够根据所给目标的先验信息自动提取目标轮廓，在此基础上正确理解目标。

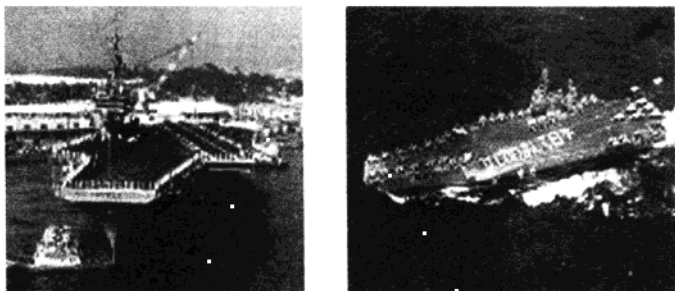
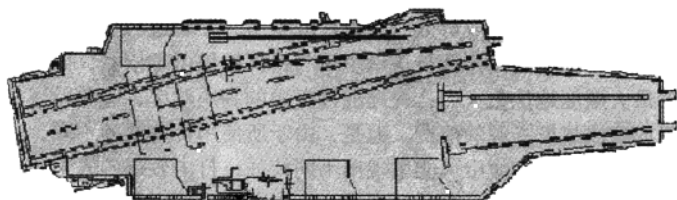
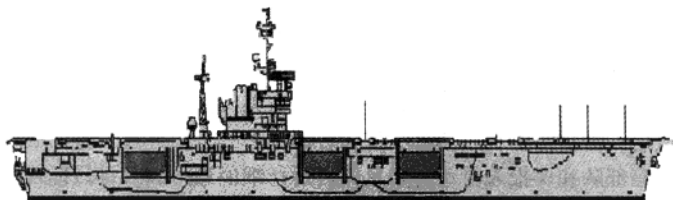


图1.1 某型号航母



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图 1.2 某型号航空母舰剖面图

1.2 目标轮廓提取方法文献综述

20 世纪 70 年代后期, Marr 提出了计算机视觉理论^[26], 他将人类视觉任务分为由低到高的三个阶段, 第一阶段的主要功能是把一些有关平面影像的重要信息清楚表现出来, 主要处理边缘、线条、角点、零交叉点等; 第二阶段主要处理二维半的信息, 如曲面的方向、曲面方向及深度的不连续性等; 第三阶段, 三维立体模型。这种分层计算理论对计算机视觉领域产生了深远的影响, 他认为计算机视觉领域底层的任务只能依赖于从图像本身获得的信息进行, 不能使用高层信息。以 Marr 的计算机视觉理论为基础, 人们提出了许多图像分割方法, 如经典的边缘检测算子和图像分割算法等。但是, Marr 的这种严格的顺序研究方法将视觉任务分成几个独立的阶段, 在使任务变得简单的同时, 也将底层的误差传播到了高层, 并且没有修正的机会。从而直接导致这些理论和算法难以在实际中得到应用。使计算机视觉和图像处理在很长时间处于一个非常难堪的境地^{[1][2][3]}。因为在许多图像理解任务中, 底层的正确处理依赖于高层知识, 完全不依赖于高层信息的计算机视觉的图像处理方法和理论无法满足实际应用的需要。为了解决这一问题, 人们提出了依赖于高层信息的图像分割的新理论。其中最引人注目、最富有代表性的是 Kass 等人^{[27][28]}提出的基于目标轮廓曲线能量泛函的 Snake 模型 (或主动轮廓模型)。文献[29]回顾了近 10 多年来主动轮廓模型的研究、发展及应用, 并指出了未来主要的研究发展方向。

1.2.1 Mumford-Shah 能量泛函模型

Mumford 和 Shah 的一篇开创性文章^[30]第一次将能量泛函引入到目标轮廓提取中, 使复杂的图像分割问题转化为简洁的数学问题, 即求能量泛函的最小值。Mumford-Shah 能量泛函包括三项: 数据保真度、目标以外区域的平滑程度及边界长度惩罚, 它将图

像光滑（去噪）与边缘检测（图像锐化）统一在一个公式中。但是，在 Mumford-Shah 能量泛函公式中，用于分割的二元连续函数的 $u(x, y)$ 及表示目标的点集 B 都需要通过 Mumford-Shah 能量泛函的优化得到。当能量曲面是非凸时，缺少有效的优化方法，与其他优化问题一样，容易陷入局部极值。有学者对 Mumford-Shah 能量泛函模型加以改进，得到了不同的模型及求解方法。文献[31]用一个二元连续函数 $v(x, y)$ 来代替目标点集 B ，得到了一种新的能量泛函；Ambrosio^[32]、Shah^[33]等人用变分的方法求解能量泛函的最小值；Shah^[34]将目标轮廓曲线的曲率引入能量泛函中得到弹性能量，既可以得到较为光滑的轮廓曲线，同时通过对轮廓曲线角点的惩罚又能保持轮廓曲线的一部分细节（如角点等）；Tsai 等^[35]用 Osher 和 Sethian^{[36][37]}提出的水平集方法（level set method）来求解 Mumford-Shah 主动轮廓模型（Mumford-Shah active contour model）。文献[38]提出了一种新的最小化 Mumford-Shah 能量泛函的 Newton-type 算法，用于目标轮廓形状的优化问题。Mumford-Shah 能量泛函模型在图像处理的其他方面，如图像去噪^{[35][39][40]}，也有着广泛应用。

1.2.2 主动轮廓模型

1987 年 Kass, Witkin 以及 Terzopoulos^{[27][28]}提出了称为 Snake 的主动轮廓模型。Snake 是内力约束和外力引导的能量极小化样条，它可以充分利用高层信息（轮廓曲线的光滑性等）。Snake 模型是经典力学中粒子运动的最小作用原理在目标轮廓提取中的应用^[41]。由最小作用原理和变分法可得到类似于牛顿定律的偏微分方程，即力的平衡式。其中，内力对 Snake 的形状所产生约束，克服由于噪声等对于轮廓所造成的影响；而外力，即图像力，则将其拖向有着显著图像特征的边缘。通过这种内力和外力的共同作用，当这些力达到平衡时，就可将 Snake 固定在目标轮廓。这就是为什么称 Snake 模型又被称之为“主动”轮廓模型的原因。

Snake 模型与先检测边缘点再将它们连接成边缘的方法不同,轮廓的连通性及角点均影响能量泛函。因此,Snake 模型可以通过优化能量泛函得到一个局部最优的轮廓曲线。Snake 模型最吸引人之处在于它对于一系列应用广泛的视觉问题给出了一个统一的理论框架。在近十几年来中,已经被越来越多的研究者成功地应用于计算机视觉的多个领域,如边缘提取、图像分割和分类、运动跟踪、3D 重建、立体视觉匹配等^[42]。Snake 模型在国内的研究虽然起步较晚,但发展却很快。文献[43][44]将几何主动轮廓模型(geometric active contours models)用于人脸轮廓提取与跟踪;文献[45]利用 B 样条曲线表示主动轮廓,导出了 B 样条曲线控制点的运动模型,从而使得活动轮廓能自动地跟踪运动目标的边缘,实现运动目标的动态分割;文献[46]在活动轮廓模型的基础上,引入了新的与图像统计信息、梯度信息有关的加权外部能量,得到了一种自适应图像分割方法;文献[47]将图像分割的 Life wire 算法与主动轮廓模型结合,得到了一种新的分割算法。

主动轮廓模型可分为参数主动轮廓模型^{[27][28][48][49]}(parametric active contours models)和几何主动轮廓模型^{[50][51][52][53]}。在几何主动轮廓模型中,目标轮廓是用距离函数(二元函数)的水平集^{[54][55][56]}来表示,并按照与能量泛函对应的欧拉方程(The Euler's Equation)进行演化,目标轮廓的演化则是通过水平集来实现的^[57]。对于参数主动轮廓模型,在与能量泛函对应的 Lagrange 方程中,目标轮廓曲线是采用曲线的参数方程来表示^{[27][28][58]},应用非常广泛^[59]。但是,传统的 Snake 模型在提取目标边界时存在许多问题^[60],如易陷入局部极值、受初始轮廓点影响大,不能收敛到凹边界等。为了解决这些问题,人们试图将一些物理的和非物理的概念引入到目标轮廓提取中^{[49][60][61][62][63]}。例如,参数主动轮廓模型通过图像的势函数,如梯度及梯度的函数等,或者是通过施加一种力,如压力、弹性力等,将轮廓曲线拉向目标的边界。然而,这种方法对

于凹边界无能为力，容易收敛到局部极小值。因此，为了获得正确的轮廓边缘，要求初始轮廓曲线靠近目标轮廓。为克服传统 Snake 模型所遇到的这一问题，文献[63]引入一种新的外力—梯度向量场 (gradient vector flow, GVF)，在一定程度上解决了凹边界问题。几何主动轮廓模型和水平集方法就是为解决参数主动轮廓模型的凹边界及拓扑变化问题而提出来的^{[50][51]}。它们在高一维空间上，即曲面的演化基础上来进行边界提取，因此计算的复杂性也大大提高。

另外，根据目标轮廓提取中使用图像信息的不同，人们又可将模型分为：基于区域的模型和基于边缘的模型。前者通过图像力把图像分割成一些性质近似或相同区域得到目标的轮廓。图像中的像素被分成三类：目标内部、所有目标的外部及目标边界。水平集分割方法及文献[64][65]提出的方法均属于基于区域的方法；基于边缘的方法用一个连续函数来近似图像的密度函数，目标边界通过密度函数的导数提取，目标轮廓上的点的梯度一般是局部极大值，大多数主动轮廓模型是基于边缘的方法。

1.2.3 目标轮廓提取统计方法

按照模型所使用的知识，轮廓模型又可分为基于物理（或几何的）的轮廓模型和基于统计的轮廓模型。常见的模型，如能量最小化模型等，均是基于物理（或几何的）的轮廓模型。基于统计的轮廓模型可以充分利用图像或者目标的统计信息。文献[66]把经典的 Snake 模型^[27]扩展为可以处理形状统计信息的主动形状模型 (active shape models)。文献[67]把经典的 Snake 模型^[27]扩展为可以处理轮廓统计信息的主动轮廓模型 (active contour models)，它们均利用图像的统计信息完成目标跟踪及目标识别等任务；文献[68]引入有向无圈图 (Directed Acyclic Graph) 来描述 deformable models，用仿射标架和仿射算法来表示统计信息；文献[69]利用 SAR 图像的统计信息，用统计主动轮廓模型进行分割；文献[70]