

数学形态学方法在图像分割中的实现

甘松

安顺学院

DOI:10.32629/er.v9i4.7001

[摘要] 图像分割是计算机视觉与图像处理领域的核心任务之一，其精度直接影响后续目标识别与特征提取的效果。数学形态学作为一种基于集合论的非线性图像处理工具，凭借其其对图像几何结构的精确描述能力，在分割任务中展现出独特优势。本文系统梳理了腐蚀、膨胀、开闭运算等基本形态学算子的理论基础及结构元素的设计方法，重点分析了形态学梯度边缘检测、分水岭变换以及形态学重建三类分割方法的实现原理与适用场景。在此基础上，设计了针对医学图像与遥感图像的对比实验，采用交并比、像素精度等指标对各方法性能进行定量评估。实验结果表明，形态学方法在结构清晰的目标分割中具有较高精度，但面对噪声干扰时稳定性有所下降。针对上述不足，本文进一步探讨了多尺度结构元素与自适应策略的改进方向，为实际应用提供参考。

[关键词] 数学形态学；图像分割；分水岭算法；形态学梯度；结构元素

中图分类号：TP391.4 **文献标识码：**A

The Realization of Mathematical Morphology Method in Image Segmentation

Song Gan

Anshun University

Abstract: Image segmentation is one of the core tasks in the field of computer vision and image processing, and its accuracy directly affects the effect of subsequent target recognition and feature extraction. As a nonlinear image processing tool based on set theory, mathematical morphology shows unique advantages in segmentation tasks by virtue of its ability to accurately describe the geometric structure of images. In this paper, the theoretical basis of basic morphological operators such as corrosion, expansion, opening and closing operations and the design methods of structural elements are systematically sorted out. The implementation principles and applicable scenarios of three segmentation methods, such as morphological gradient edge detection, watershed transformation and morphological reconstruction, are emphatically analyzed. On this basis, a comparative experiment between medical images and remote sensing images is designed, and the performance of each method is quantitatively evaluated by using the indexes such as intersection over union and pixel accuracy. The experimental results show that the morphological method has high accuracy in target segmentation with clear structure, but the stability decreases in the face of noise interference. In view of the above shortcomings, this paper further discusses the improvement direction of multi-scale structural elements and adaptive strategies, and provides reference for practical applications.

Keywords: mathematical morphology ; image segmentation ; watershed algorithm ; morphological gradient ; structural elements

引言

图像分割旨在将图像划分为若干具有特定语义或几何意义的区域，是医疗影像分析、遥感目标提取、工业缺陷检测等应用的前置环节。现有分割方法大致可分为阈值法、边缘检测法、区域生长法及近年兴起的深度学习方法，各有其适用范围与局限性。数学形态学由 Matheron 与 Serra 于 20 世纪 60 年代提出，以结构元素为探针对图像的几何形态进行“探测”与“提取”，其运算规则简洁、物理意义直观，

尤其在处理二值图像及灰度图像的形状信息时具有较强的可解释性与可控性。相较于基于统计或学习的方法，形态学方法对先验数据依赖较少，在小样本或规则结构目标场景下仍能取得稳定效果，因此在工程实践中保持着持续的应用价值。

1 数学形态学基础理论

1.1 基本形态学运算

数学形态学的核心运算包括腐蚀、膨胀及在此基础上派生的开运算与闭运算。腐蚀运算定义为结构元素在图像上逐

点滑动，仅当结构元素完全包含于前景区域时该点才被保留，其数学表达为 $(A \ominus B)(x,y) = \min(s,t) \in B\{A(x+s,y+t)\}$ ，其效果是收缩目标边界、消除小于结构元素的细节；膨胀则与之相反，对前景区域进行扩张，表达为 $(A \oplus B)(x,y) = \max(s,t) \in B\{A(x-s,y-t)\}$ ，能够填充目标内部小孔洞并连接临近断裂区域。将腐蚀与膨胀级联组合，可得开运算（先腐蚀后膨胀）与闭运算（先膨胀后腐蚀）：开运算能在整体轮廓基本不变的前提下平滑边界并断开细窄连接；闭运算则倾向于弥合前景区域内的细小缝隙，保留整体形状的同时填补孔洞。四种运算共同构成形态学分析的基本工具集，其几何意义清晰，参数可控，为后续复杂分割算法提供了坚实的运算基础。

1.2 结构元素的选取与设计

结构元素是形态学运算的核心参数，其形状与尺寸直接决定运算对图像结构的响应特性。常用结构元素包括圆形、方形、菱形、线形等，圆形结构元素各向同性，适用于对方向无偏好的目标区域；线形结构元素则对特定方向的条纹或边缘具有较强的选择响应能力。在尺寸选择上，结构元素过小会导致形态学效果不明显，过大则可能破坏目标的原有形态，通常需根据目标特征的空间尺度进行匹配估计^[1]。对于形状不规则或多尺度的复杂目标，可采用多个不同尺寸或形状的结构元素分级处理，或通过自适应方式根据局部图像统计特征动态生成结构元素。结构元素的合理设计是形态学方法取得良好分割效果的关键前提，在实际工程中往往需要结合领域知识与实验调参共同确定。

2 基于数学形态学的图像分割方法

2.1 形态学梯度与边缘检测分割

形态学梯度通过计算图像膨胀结果与腐蚀结果之差来度量像素邻域内的灰度变化幅度，标准形态学梯度定义为 $G(A) = (A \oplus B) - (A \ominus B)$ ，其响应在目标边界处最强，在均质区域内趋近于零，因而天然适合用于边缘提取与轮廓分割。从物理意义上看，膨胀使前景向外扩张，腐蚀使其向内收缩，两者之差恰好捕捉了边界两侧的灰度跳变，本质上等价于一种基于极值差分的非线性梯度估计。与基于一阶或二阶微分算子的传统梯度方法（如 Sobel、Canny）相比，形态学梯度不依赖线性卷积，对椒盐噪声等脉冲干扰具有更强的鲁棒性，且通过改变结构元素的形状和尺寸可灵活调控边缘响应的方向偏好与空间范围。在实际分割流程中，通常先对梯度幅值图像进行全局或自适应阈值化，将其转化为二值边缘图，再借助形态学细化或骨架提取算法将边缘压缩为单像素宽度，最终结合连通性分析完成封闭区域划分。更精细的应用中，可将梯度分解为内梯度 $(A \ominus B) - A$ 与外梯度 $A - (A \oplus B)$ ，分别描述边界向内或向外的过渡特征：内梯度偏向目标内侧，外梯度偏向背景一侧，二者组合可用于构建具有方向信息的

边界描述，有助于后续的区域归属判断^[2]。对于灰度对比度较低的图像，还可先进行形态学顶帽与黑帽变换以增强局部对比，再计算梯度，从而改善弱边缘区域的检测效果。整体而言，形态学梯度边缘检测方法流程简洁、参数意义直观，在工业检测、医学图像轮廓提取等对边界连续性要求较高的场景中有广泛应用。

2.2 分水岭分割算法

分水岭算法是形态学图像分割中最具代表性的方法之一，其核心思想源于地形学中的水流汇聚模型：将图像灰度值（通常为梯度幅值图）类比为地形高程，从局部极小值处模拟“注水”过程，不同盆地的水面在相遇时筑起分水岭线，即目标之间的分割边界。算法实现通常采用优先队列驱动的浸没策略：按灰度由低到高对所有像素排序，依次将各像素归入邻近的已标记盆地，当来自不同盆地的扩张波面相遇时，在该位置记录分水岭线并停止合并，直至所有像素完成归属，分割即告完成。这一机制保证了输出边界的封闭性与完整性，理论上可将图像无遗漏地划分为若干不重叠区域，是其相较于梯度阈值法的核心优势。然而，当梯度图存在大量局部极小值时（常见于噪声图像或纹理丰富区域），算法会为每个极小值生成独立的盆地，产生严重的过分割现象，使分割结果碎片化，实用性大幅下降。为解决这一问题，标记控制分水岭策略被广泛采用：先通过形态学重建的h-极小值抑制、区域极小值滤除或人工交互等手段，将梯度图中的局部极小值精简至语义有意义的少数位置作为标记，再以这些标记为种子点驱动注水过程，从而将盆地数量约束在预期分割目标数附近。此外，对原始图像施加形态学开重建或高斯平滑以消除梯度图的伪极值，也是降低过分割率的常用预处理手段。在医学图像细胞分割、工业零件轮廓提取等目标数量相对固定的场景中，结合先验知识设计标记方案的分水岭算法能够取得精度与鲁棒性兼顾的分割结果，至今仍是形态学分割工程实践中的主流选择之一。

2.3 形态学重建与区域分割

形态学重建是一种以“标记图像”在“掩模图像”约束下进行迭代传播的运算，其过程可描述为在掩模边界限制下对标记图像反复施加膨胀，直至收敛，数学上表示为 $RB(n)(A) = RB(n-1)(A) \oplus B \wedge A$ 。该方法的核心特点在于能够依据连通性而非纯粹的灰度对比来恢复目标区域，因此对孔洞填充、极值抑制及连通区域提取等任务具有显著优势。在图像分割应用中，形态学重建常用于消除与图像边界不相连的亮区或暗区，提取特定标记所对应的完整连通目标，或在分水岭预处理阶段平滑梯度图、消除虚假极小值。与简单的开闭运算相比，形态学重建能够在去除干扰的同时完整保留目标的原始形状，不会因结构元素的几何约束而截断细长结

构，因此在医学图像血管分割、遥感图像道路提取等场景中有广泛应用^[3]。

3 实验设计与结果分析

3.1 实验数据与评价指标

实验采用两类典型图像数据：一类为医学 CT 图像，选取腹部器官分割数据集，图像分辨率为 512×512 ，灰度范围经归一化处理；另一类为遥感光学图像，选取包含建筑物与植被的城区场景，空间分辨率约 0.5 米，包含多种典型目标形态。为确保评估的客观性，所有图像均配备人工标注的真值掩码。定量评价指标选取交并比 (IoU)、像素精度 (PA) 与 F1 分数三项，其中 IoU 对分割边界的精度最为敏感，PA 反映整体像素级正确率，F1 则综合考量查准率与查全率的平衡。此外，还引入边界 F 分数 (BF score) 专门评估分割轮廓与真值边界的贴合程度，以更全面地衡量形态学方法在边缘定位方面的实际表现。

3.2 不同形态学分割方法的对比实验

实验分别对形态学梯度法、标记控制分水岭算法及基于形态学重建的区域分割方法在上述两类数据集上进行测试，结构元素统一采用半径为 3 像素的圆形盘，阈值参数通过验证集调优确定。在医学图像场景中，形态学重建方法在器官边界清晰的切片上取得最高 IoU (约 0.83)，分水岭算法次之，梯度法因边界局部断裂导致区域闭合不完整，IoU 偏低；在遥感图像场景中，分水岭算法凭借对密集目标的良好区分能力表现突出，但在低对比度区域仍存在欠分割问题^[4]。整体来看，三种方法各有侧重：梯度法适合对比度高、边界连续的目标；分水岭算法对密集分布的多目标场景更具优势；形态学重建方法在形状完整性要求较高的任务中表现最为稳定。

3.3 方法改进与优化讨论

实验中暴露的主要问题集中在两方面：一是噪声敏感性，图像中的随机噪声会在梯度图上产生大量伪极值，导致分水岭过分割或梯度法边缘断裂；二是单一结构元素对多尺度目标的适应性不足，固定尺寸的结构元素难以同时兼顾大目标的整体轮廓与小目标的细节结构。针对前者，可在分割前引入形态学开运算或高斯-形态学联合滤波对梯度图进行平滑预处理，抑制伪极值生成；针对后者，可设计多尺度结构元

素金字塔，在不同分辨率层次上分别执行形态学运算并融合结果，兼顾全局与局部^[5]。此外，将形态学方法与图卷积或条件随机场相结合，以深度特征指导结构元素的自适应生成，是当前较有前景的研究方向，有望在保留形态学方法可解释性的同时进一步提升复杂场景下的分割精度。

4 结论

本文围绕数学形态学方法在图像分割中的应用展开系统研究。在理论层面，梳理了腐蚀、膨胀、开闭运算的数学定义与几何意义，阐明了结构元素设计对运算结果的决定性影响；在方法层面，分析了形态学梯度、分水岭变换与形态学重建三类分割方法的原理与适用边界；在实验层面，通过医学图像与遥感图像的对比测试，定量验证了各方法的性能差异，并针对噪声敏感与多尺度适应不足两个核心问题提出了多尺度结构元素与深度学习融合的改进思路。总体而言，数学形态学方法以其原理清晰、参数可控、计算高效的特点，在特定场景下仍具有不可替代的工程价值，而与现代数据驱动方法的有机结合，将是推动其进一步发展的重要路径。

[参考文献]

- [1]唐泉,王硕.基于阈值分割和数学形态学的噪声图像边缘检测方法[J].山东师范大学学报(自然科学版),2025,40(1):64-70.
- [2]何安良,程兴保,廖龙长,等.耦合 H-minima 与数学形态学的分水岭遥感图像分割方法[J].东华理工大学学报(自然科学版),2020(004):043.
- [3]章鼎.数学形态学在图像处理与计算机视觉中的创新应用[J].信息记录材料,2024,25(6):89-91.
- [4]刘训星,张海民.基于数学形态学的路面裂纹图像分割方法[J].辽东学院学报:自然科学版,2023,30(2):130-135.
- [5]樊甫江,时国栋,吴升清,等.基于数学形态学的表面原子熔融相的 STM 图像识别算法[J].原子与分子物理学报,2021,38(6):6.

作者简介:

甘松 (1984.11-), 男, 土家族, 贵州沿河, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 数字图像处理。