

摘要

目前,从高分辨率遥感影像中提取人工地物、自然景象等信息已经成为遥感应用基础研究的热点。其中建筑物提取这一研究方向尤为火热,其受到了越来越多学者的关注。然而,由于影像质量、拍摄天气条件、周边环境等诸多因素的影响,现如今的建筑物提取方法存在一定局限性,也使得建筑物提取结果与实际建筑物形态间存在一定差异。为了高精度提取高分辨率遥感影像建筑物目标,并使其达到实际应用层面,研究提升建筑物轮廓规则度和精准度显得尤为重要。本文将高分辨率遥感影像为主要研究数据源,针对目前建筑物优化方法存在的锯齿、规则化程度低以及与真实建筑物形状不符等问题,提出了一种基于主方向的建筑物轮廓优化方法。本文的主要工作内容如下:

1) 本文首先介绍了遥感图像中建筑物的定义、特征和候选目标的概念,通过分析建筑物的主要特征,引入直角多边形建筑物模型,并将其作为本文建筑物优化候选目标的依据。然后详细描述了经分类法提取的建筑物初始结果的预处理方法。该方法首先根据同一个区域内建筑物面积,剔除初始提取结果中明显的非建筑物图斑,其次提取单个图斑轮廓,并对其进行初步简化和修整,剔除杂乱线段和突兀的节点。通过实验证实,该方法可以初步剔除错误分类,对建筑物轮廓进行初步化简。

2) 通过初步化简的建筑物轮廓依旧存在锯齿和不规则的问题,针对此,本文提出一种基于主方向的建筑物轮廓规则化方法。首先介绍遥感影像中建筑物主方向的研究现状,详细描述了结合外接矩形提取主方向的步骤,然后依据主方向为基准对轮廓线段进行全方位重构,实现建筑物轮廓的平直和规整化。其次,本文构建了建筑物轮廓的复杂度模型,研究基于该模型的自适应阈值在规则化方法中的适用性。最后,分别进行了经验法阈值和自适应优化阈值的建筑物轮廓规则化实验,通过对比分析,表明了利用经验法阈值的建筑物轮廓规则化方法能够在人工干预的情况下得到较好的优化效果;证明了在不同复杂度的建筑物规则化实验中,自适应优化阈值能够应用于本文所提的轮廓规则化优化方法,大幅减少规则化处理的时间成本,实现建筑物轮廓规则化的自动性。

3) 针对规则化结果存在的边缘内缩或外扩的偏移问题,提出了结合高分影像和初始提取结果的建筑物轮廓深度优化轮廓归位方法。该方法首先结合高分遥感影像计算得到高 SSIM 指标区域,用于对初始提取结果的联合补充;其次,依据二值图像的边界特性构建边界特征强度,实现对建筑物轮廓的偏移校正,以达到建筑物轮廓结果的深度优化。实验结果表明,该方法有效提升了建筑物轮廓的精确度和完整度,使得轮廓优化结果更加符合真实的建筑物形态。

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 论文选题的理由和意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 本文研究的主要内容和技術路线	4
1.4 本文组织结构	5
第 2 章 相关知识介绍	7
2.1 道格拉斯-普克抽稀算法	7
2.2 图形轮廓复杂度介绍	8
2.3 结构相似性 (SSIM) 理论及算法	12
2.4 本章小结	15
第 3 章 建筑物优化目标介绍及预处理方法	16
3.1 建筑物定义及特征介绍	16
3.2 建筑物优化的候选目标	19
3.3 建筑物目标预处理方法	21
3.4 本章小结	22
第 4 章 基于主方向的规则化	24
4.1 基于主方向的轮廓规则化重构	24
4.2 结合轮廓复杂度的自适应优化阈值	33
4.3 实验与分析	36
4.4 本章小结	41
第 5 章 建筑物轮廓深度优化	43
5.1 轮廓深度优化方法介绍	43
5.2 实验与分析	47
5.3 本章小结	53
第 6 章 结论与展望	55
6.1 结论	55

第1章 绪论

1.1 论文选题的理由和意义

19 世纪初期银版摄影术的问世，是当今摄影技术的开端。在 19 世纪中期，便有人乘坐热气球从高空对地面摄影。在 20 世纪初飞机诞生以后，人们将摄影技术带上飞机，从飞机上对地面进行拍摄，并将航空摄影图像应用于地图绘制与地形测量等方面，开始了遥感的初步试验与应用，是当今遥感技术的雏形。人类用肉眼观察世界往往受限于距离、光谱等因素，而遥感能够在这两个维度上进行延伸，一是不受距离的限制，遥感平台包括飞机、高塔、火箭、各类人造卫星、航空母舰等，能够从数千、数万公里甚至更远距离观测地球；二是扩大观测的光谱范围，遥感技术不仅能感知可见光范围，还能感知更长或更短波长的电磁波，如近红外、红外、紫外波段等，在一定程度上减少气候的干扰，极大的拓宽人类的视野^[1]。

随着高精度传感器、高性能计算等新技术的发展，结合现代空间技术发展成果，形成了当今的遥感技术体系。遥感技术体系涉及极为广泛的专业领域，从前端的遥感平台与载荷研制、遥感数据传输与接收，到遥感数据处理与产品、遥感定标与真实性检验、遥感数据管理与服务、遥感试验，再到最终的遥感应用^[2]。它能够实现全方位一体化的地球资源信息立体探测。遥感影像数据需求的日益增加与遥感技术体系的发展相互影响与促进，推动遥感影像走向微观和大众化，其中卫星遥感影像数据所具备的高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和高辐射分辨率的“四高”特点^[3]提升了观测数据的实时性、精准性，通过结合地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）等技术，高分辨率遥感影像应用呈现多样化发展的趋势，深入到城市规划、交通运输、能源开发、土地资源管理、环境监测、灾后救援等方面。

当今的高分辨率遥感影像已经达到厘米级^[4]，能清晰的反映地物目标的纹理细节和空间结构特征。高分辨率遥感影像为地物信息的提取提供了可靠的数据来源。衡量一个地区经济社会发展状况的重要标志是建筑物的规模和分布，从高分辨率遥感影像中提取建筑物信息在土地利用调查、城市规划和灾害应急评估等领域具有重要意义^[5]。但由于城镇地表目标复杂以及光照条件、摄影角度等影响，加大了建筑物信息提取的难度。现有建筑物提取结果存在规则化程度低、形状与真实建筑物不符以及轮廓锯齿等现象，因此，在基于建筑物轮廓准确性的条件下，进一步研究建筑物轮廓优化方法，实现建筑物边缘信息的完整提取和规则化，对满足现有应用需求具有重要的研究意义^[6]。

1.2 国内外研究进展

建筑物作为城市中最重要基础设施之一，是人类生活和社会生产的重要载体^[7]，随着城市化进程的加速和信息技术的飞速发展，对建筑物信息的需求越来越高。传统的建筑物信息获取方法需要大量的人力和物力投入，效率低下且容易产生误差。而利用技术手段进行建筑物信息提取则能够在较短时间内获取大量高质量的建筑物信息，并且具有准确性、可靠性、高效性等优势，它不仅提高了信息获取的效率和精度，而且为土地利用调查、城市规划以及灾害应急评估等相关领域的决策提供了更加科学、合理的依据。

1.2.1 高分遥感影像建筑物提取方法研究现状

随着遥感技术的不断进步，自动提取遥感影像中的建筑物已成为一个备受关注的研究领域，吸引了众多学者投入研究和探讨，提出了多种建筑物提取方法^[8-11]。经过总结，这些提取方法被分为两大类：监督分类方法和非监督分类方法。

监督分类^[12]方法需要一定量的样本数据，并对样本进行训练，例如基于决策树、随机森林、支持向量机、马尔科夫随机场等机器学习方法检测建筑物，大大提高分类速度。基于决策树的方法主要是先对影像中不同地物进行分类，利用其光谱、形状和纹理特征进行划分以获得建筑物^[13]，或是结合建筑物的空间上下文关系如阴影、背景等来检测建筑物^[14]。随机森林法^[15,16]是由树形分类器的组合算法形成的一种机器学习方法，从初始样本中重复随机抽取样本子集构建一组分类器，通过投票的方式决定分类结果，并对分类效果和样本特征的重要性进行评估，以提取建筑物。支持向量机法（SVM）^[17-19]的主要策略是通过非线性变换的方式，将输入的样本数据映射至高维数空间中，采用不同的核函数计算以达到最佳的建筑物分类效果。刘海飞等^[20]首先利用影像增强、地物分割等方法对影像进行预处理，结合知识规则将非建筑物区域进行去除，其次基于知识规则与 SVM 进行建筑物信息的精确提取。井然等^[21]通过 SLIC 影像分割算法将不同尺度的影像进行分割，然后利用微调的全卷积神经网络 FCN 抽取建筑物特征，将其输入 SVM 模型训练，从而得到建筑物最终提取结果。马尔科夫随机场法^[22]认为场中某个随机变量，仅在其概率分布中与相邻的随机变量发生关联，与远离它的随机变量无关，通过考虑随机变量间的相关因素，实现目标物的精确分割与提取。李晓东等^[23]将建筑物的空间关系、形状特征等作为先验知识建立空间邻域特征，通过马尔科夫随机场方法，构建亚像素定位模型，获取建筑物目标的提取结果。该类方法对先验知识的依赖程度较高，需要依靠人工设定训练集、训练场，获取先验知识库，从而实现建筑物对象的分类提取，提取精度相对较高，但时间成本高且容易受到样本及机器算力的影响，具有一定的局限性。

非监督分类主要是利用图像统计分类和图像区域分割机制,根据图像包含的多种特征进行分解,得到建筑物区域的分类结果。这类方法主要是基于遥感图像中不同地物的光谱和纹理特征进行分类,人工地物、植被、水体、裸地等地物的光谱和纹理特征可以通过遥感图像数字化处理和分析来提取,并结合建筑物本身的特性识别建筑物区域。Beril 等^[24]提出了一种基于尺度不变特征变换和图割方式检测建筑物的方法,采用 SIFT 关键点检测城市区域和建筑物边缘,构建建筑物模板,在模板和目标图像间利用多子图匹配法提取所有建筑物。Aytekin 等^[25]提出了一种多光谱和全色遥感图像中建筑物提取的方法,利用归一化植被指数和 YIQ 色彩空间理论分别提取自然区域和阴影区域,然后通过均值漂移分割法分割处理人工区域,并且结合形态学操作和主成分分析法削减与建筑物无关的伪影,从而提取建筑物区域。李思聪等^[26]结合纹理重叠模型和图像分割算法对建筑物进行提取,通过 ORT 算法分割提取建筑物及道路、桥梁、裸地等相似纹理的人工地物,使用最大类间方差法(OTSU)对 DSM 灰度影像进行阈值分割,以提取高程影像区域。其次,综合两部分区域,进行建筑物区域的提取。该类方法对先验知识的依赖较低,但分类提取过程中,由于图像的复杂程度较高,会出现同物异谱、异物同谱现象,或者建筑物种类繁多、边界模糊,受到植被、阴影遮挡的干扰等问题,造成建筑物目标的分割错误,目前在复杂建筑物目标的识别方面,其健壮性仍需进一步提高^[27]。

1.2.2 高分遥感影像建筑物优化方法研究现状

遥感影像包含的信息量巨大,建筑物周围环境的复杂性极高,监督分类方法和非监督分类方法均难以完全准确地提取建筑物信息,在遥感影像中提取建筑物轮廓是建筑物提取的关键步骤,而优化建筑物轮廓则可以更好地支持建筑物分析和应用。因此,建筑物提取后的优化越来越被研究者们重视,其中主要的优化方法可以被总结为三类:一是数学形态学法;二是对象特征法;三是辅助信息法。

数学形态学法是利用腐蚀、膨胀、开运算和闭运算及其推导、组合算法,对图像进行形状和结构的分析及处理。如游永发等^[28]利用顶帽变换、阈值分割以及特征约束等技术,可以在建筑物区域边界识别后进一步优化建筑物细节信息的提取,从而在一定程度上减少虚假特征点和冗余特征的出现。高贤君等^[29,30]设计阴影结合 SVM 分类模型的方法来提取建筑物初始结果,后通过形态学处理方法^[31]优化建筑物结果。该类方法将一幅影像中所有的建筑物一起优化,不能全面地考虑不同建筑物的细节差异。

对象特征法是基于建筑物对象的特征如几何特征、拓扑关系等提取优化建筑物轮廓^[32,33]。如张祖勋等^[34]通过人工勾画角点初始位置,利用物方空间几何约束的最小二乘匹配模型求取房屋精确轮廓定位。尹峰等^[35]采用基于模板的角点检测

算法来提取角点,综合考虑角点的位置、角度和显著度等信息,利用空间投票和阈值分割提取建筑物。但这类方法受到人为因素或周边干扰地物等影响因素较多,由于某些角点模糊或缺失,导致提取的建筑物轮廓局部不规则。

辅助信息法是借助辅助信息如 DSM 和 DEM 数据、多时相数据等进行建筑物轮廓的优化。如常京新等^[36]利用两期高分影像获得建筑物提取结果,通过角点匹配,最优边选择的方式优化建筑物轮廓。该方法对建筑物被植被遮挡导致的漏分有修复效果,但对影像数据要求较高。Mousa 等^[37]利用 DSM 数据获取高程信息,采用数据驱动与模型驱动相结合的方式进行建筑物规则化,可以有效解决建筑物漏分,然而该方法过于依赖高程参数。

综上所述,通过众多研究者的不懈努力,遥感影像中建筑物的优化已经取得了长足的进展。然而,仍然存在许多问题需要解决,主要问题如下:

(1) 目前,现有的高分辨率遥感影像建筑物优化方法存在一定的局限性,即优化后可能出现锯齿和不规则现象,从而导致部分建筑物优化出现错误。

(2) 现有的某些建筑物提取方法易受到周围复杂环境的干扰,其提取结果会存在一定的错误分类,一旦初始提取结果存在误分,相应的优化方法无法有效去除干扰区域,则会造成优化结果与预期效果相差甚远。

(3) 建筑物的复杂性和多样性使得优化工作不能完全采用全局信息,采用阈值限制的优化方法应该针对不同建筑物给出不同的优化阈值,单一全局的阈值会影响整体优化效果。

总而言之,高分辨率遥感影像建筑物轮廓优化工作仍存在着错误处理、全局阈值难以匹配等问题。因此,如何开展准确、快速、自动化的建筑物优化工作是亟待研究解决的重要问题。

1.3 本文研究的主要内容和技術路线

分析上述研究现状可知,建筑物提取一直以来都是高分辨率遥感影像人工地物识别的热点方向之一,建筑物优化也愈发受到研究人员的关注,国内外研究者已经取得了一些显著的研究进展,但仍存在锯齿、不规则以及自动化程度低等不足。

本文针对上述问题,主要研究基于主方向的遥感影像建筑物轮廓规则化以及轮廓归位深度优化,总体技术路线如图 1-1 所示,其核心内容主要包括三个方面:

(1) 本文通过介绍建筑物的定义和特征,总结城市建筑物的基本形状,利用直角多边形建筑物模型定义了建筑物优化的候选目标。并且根据建筑物候选目标的特性,设计了建筑物目标的预处理方法。该方法主要针对分类法检测到的建筑物初始提取结果存在的不足,对初始提取结果进行预处理,排除非建筑物的图斑、杂乱线段及突兀的节点,保留建筑物的几何特性,并尽量弱化影响后期处理和分

析的干扰因素。

(2) 本文提出了一种从遥感影像中基于主方向优化建筑物轮廓的方法, 首先, 利用建筑物轮廓的外接矩形与其最长线段相结合提取到主方向, 以主方向为基准, 对预处理后的轮廓线段进行校正, 使其与主方向保持水平或垂直, 并依据相邻线段间的位置关系和拓扑关系如平行、相交等, 结合轮廓全局复杂度和局部复杂度计算自适应参数, 从而对校正后的线段进行接合, 以构建规则化的轮廓。

(3) 本文将结合 SSIM 结构相似性指标, 以遥感影像中单个建筑物为种子区域, 从色度、亮度、结构等 SSIM 指标, 采用区域增长的方式获取与建筑物提取结果结构相似的高 SSIM 指标区域, 然后将规则化的轮廓与高 SSIM 指标区域和初始提取建筑物区域进行综合比对, 构建边界特征强度确定轮廓上每一条边的最佳位置, 从而使轮廓与建筑物边界贴合, 提高建筑物优化精度。

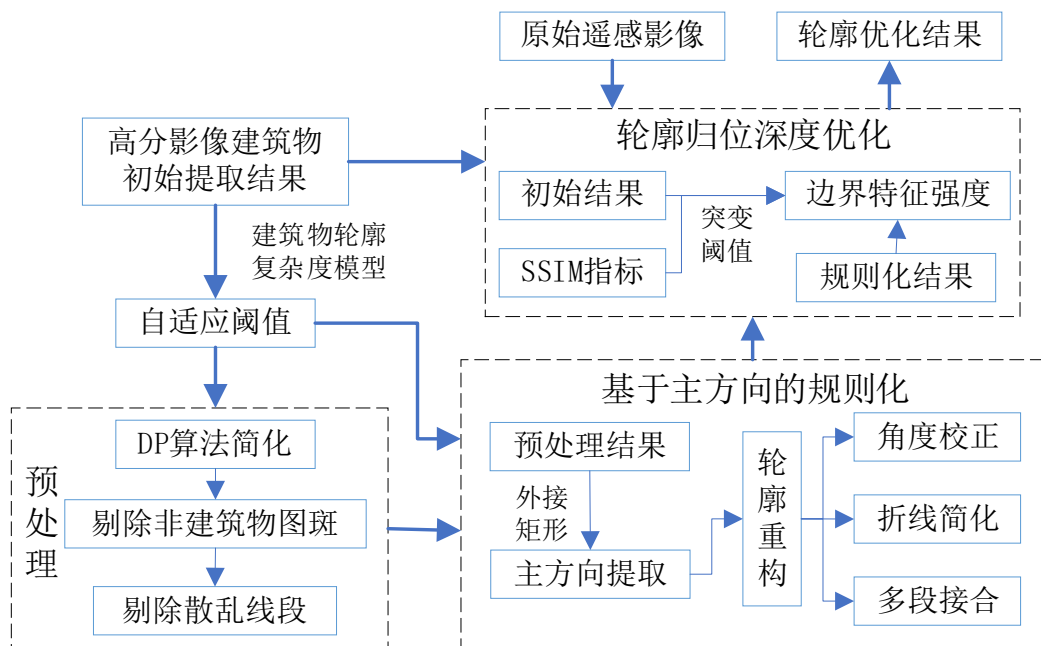


图 1-1 总体技术路线

Figure 1-1 Overall technical route

1.4 本文组织结构

本文共分为五大章节, 论文组织结构如下:

第一章: 绪论。首先阐述了论文选题的理由和意义, 其次详细介绍了高分辨率遥感影像建筑物提取和优化的国内外研究进展, 分析了研究现状中存在的问题, 最后站在解决当前存在问题的角度上, 提出了本文的研究内容, 并设计了总体技术路线。

第二章：相关知识介绍。本章重点介绍了本文所需方法的原理知识以及算法公式的推导过程。首先介绍了第三章将用到的道格拉斯普克抽稀算法，并对其算法的原理及流程进行详细叙述。其次介绍了图形轮廓复杂度的背景及研究意义，并详细描述了第四章所需的全局复杂度和局部复杂度模型的理论知识和相关公式。最后详细描述了结构相似性理论及算法公式。

第三章：建筑物优化目标介绍及预处理方法。本章首先对建筑物的定义及特征包括光谱特征、纹理特征、形状特征分别进行了详细介绍。其次，说明了本文建筑物优化的候选目标，此候选目标是基于直角多边形建筑物模型理论所建立的。最后详细叙述了高分遥感影像的建筑物预处理方法的原理、算法步骤，展示了建筑物目标预处理的实验效果。提出的预处理方法作用于分类法提取的建筑物初始结果，通过剔除非建筑物图斑、获取建筑物轮廓点集、去除冗余点和散乱线段，得到初步预处理结果。

第四章：基于主方向的规则化。在上一章节得到预处理的结果基础之上，本章提出了基于主方向的轮廓规则化重构的初步优化方法和结合轮廓复杂度的自适应优化阈值选定，并对经验法阈值与自适应阈值法的建筑物轮廓规则化分别进行了实验和分析。其中详细介绍了现有建筑物主方向的提取方法，提出了结合外接矩形提取主方向的方法，以及基于主方向进行规则化重构的步骤。

第五章：建筑物轮廓深度优化。在上一章节得到规则化结果的基础之上，本章进一步对轮廓优化进行了探索，分析了规则化结果存在的不足，提出了对应的处理方法。详细介绍了建筑物结构相似区域提取的步骤和边界特征强度的轮廓归位原理，采用建筑物提取及优化的相关评估指标，对深度优化结果进行实验分析，并分析了整个建筑物优化流程的时间复杂度，并且对非矩形建筑物的适用性进行分析。

第六章：结论与展望。对本文主要的结论进行了总结，对于本文在建筑物轮廓优化的主要工作内容、研究方法进行简要阐述，同时，还对于现有方法存在的不足和本文有待改进的方面进行了概括，并在未来需要继续深入探讨和提升的方向提出了展望。

第2章 相关知识介绍

2.1 道格拉斯-普克抽稀算法

在高分辨率遥感影像的目标矢量化处理中，根据需求为了提取重要的数据，常需要对大量冗余的多边形数据点进行压缩，比如精简线段上的连续数据点，或是平滑起伏不平的线段，道格拉斯-普克抽稀算法（Douglas-Peucker algorithm），简称 DP 算法是被广泛使用的算法之一，其原始版本由 Urs Ramer 于 1972 年和 D.Douglas 与 T.Peucker 于 1973 年提出，在提出后受到了众多学者的关注，并且进一步完善了该算法。

从遥感影像中提取的地物初始轮廓边缘包含着噪声，DP 算法能够在很大程度上保留线型数据的必要特征，不仅在边缘处作简要的筛选，降低噪声的影响，而且能够减少数据点的存储量，因而可以缩减大部分多余的数据，从而提取到必要的数据点。算法的思想简而言之，即在曲线上均匀采样点，并通过逼近曲线得到近似的折线形式。DP 算法的优点在于它具有平移和旋转不变性，即给定曲线和逼近程度阈值后，其结果无论如何旋转或平移均保持不变。

DP 算法的具体流程如下：首先，在任意一条由多个数据点构成的曲线的起点和终点处用虚线连接一条直线，然后计算曲线上每个点到直线的距离，并找出最大距离值。接着，设定一个最大距离阈值 DT，并将其与最大距离值进行比较。如果最大距离值小于 DT，则将曲线中间的所有点全部舍去，从而将曲线近似为一条线段。如果最大距离值大于 DT，则保留最大距离值对应的坐标点，并以该点为界，将曲线分为两部分，然后对这两部分采用迭代方法重复上述步骤。在重复的过程中，曲线被重新划分为两部分之后，依旧利用最大距离阈值 DT 判断曲线中间部分是否需要被重新划分或者直接舍去，直到曲线上所有数据点均被合理取舍为止。最后，利用道格拉斯-普克算法对曲线的起止点以及中间点进行了近似逼近，筛选出了压缩程度较高的简化结果。算法的流程如图 2-1 所示：

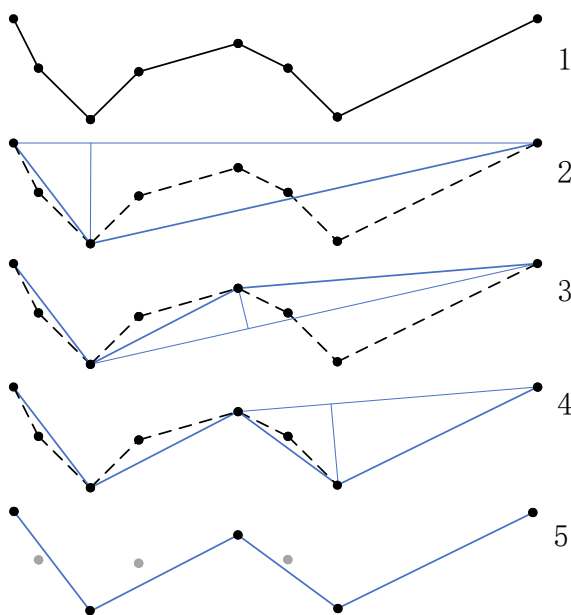


图 2-1 DP 算法流程

Figure 2-1 DP algorithm flow

2.2 图形轮廓复杂度介绍

2.2.1 图形复杂度的基本理论

为了描述图形的复杂性差异，复杂度概念被提出^[38]，并广泛的被应用在许多领域，但迄今为止尚未有一个统一的复杂度度量标准。一般来说，人类将形状视为一个整体，在观察由不同形状构成的物体时，人们会感知到不同程度的复杂性，而其复杂性的差异与人类对图形信息的处理有关，例如处理复杂形状比处理简单形状需要更多的时间和认知努力^[39]。在计算机图形学领域，形状复杂度不仅体现在整体形状上，还涉及到局部特征^[40]，如 Chen Y 等^[41]采用柯尔莫戈洛夫复杂性的相关因素，包括全局距离分布和局部角度分布的熵测量，以及形状随机性的强相关，这三项因素组合检测来量化二维形状复杂度。Su H 等^[42]将尺度信息纳入边界复杂性定义，以图形边界、整体结构和形状对称性三个参数组成模型，并设定与不同属性相关的权重，来度量形状复杂度。Saleem W 等^[43]基于形状的二维视图相似矩阵计算三维图形的复杂度，该方法认为三维形状可由二维平面视图组织构成，通过将三维形状投影至二维平面中，再经多维缩放后，利用其二维平面中的点分散度来计算三维图形的复杂度。Matsumoto T 等^[44]利用能够反映曲面上凹度大小的总绝对曲率指数，作为曲面形状复杂性的量化指标。段先云等^[45]通过形状的各类描述参数，包括面积、周长、形心致密度以及分支块的统一加权组合来表示形状复杂度。上述方法不仅满足了多边形显示和图块设计的需要，而且能够准

确地反映出形状复杂度与图形边界的复杂度之间的密切关系。

2.2.2 图形复杂度算法

近几年，为了实现图形的高效分类、识别、分析和提取，图形复杂度的度量作为复杂性科学中一个开放的重要问题，其理论和计算方法被应用于神经网络分析、地理信息科学、计算机视觉等众多领域。对于一个空间物体的复杂性的直观评价有两个决定性的因素^[46]：物体的整体形状和它边界的（局部）振动。并且，局部振动与物体的整体形状无关。图 2-2 通过一个示例演示了这种效果。

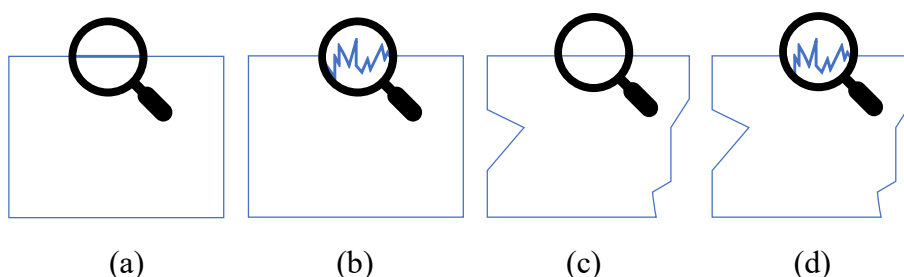


图 2-2 局部振动示例

Figure 2-2 Example of local vibration

从整体角度来看，图 2-2 中二维图形(a)和(b)的整体形状非常简单，均呈现出矩形的形态；相比而言，二维图形(c)和(d)的整体形状复杂得多，但它们边界的振动也不同。从局部角度来看，通过使用放大镜，可以明显观察到局部的差异，二维图形(b)和(d)局部区域有微小起伏，而二维图形(a)和(c)保持平直。

在本节中，区分了复杂度的两种尺度：全局和局部。振动的两种度量：频率和振幅。全局形状和局部振动越复杂，所研究的对象就越复杂，并针对两种不同的尺度进行分别计算其图形复杂度：

（1）全局复杂度

描述空间对象全局复杂性可采用当前较为常用的周长面积比方法计算图形复杂度。对于给定的几何多边形，为了度量图形的复杂度，利用周长面积比法可以在某种程度上更便捷的刻画出来。以周长和面积为尺度，饱满圆润的图形具有较低的复杂度，因此越接近规则图形，其复杂度越低。人工地物的建设往往更倾向于方方正正的形状，度量由方正图形衍生出来的不同形状的复杂度，即测得所要计算复杂度的形状的面积和周长，利用以下公式进行图形全局复杂度的计算：

$$C = 1 - \frac{4\pi S}{L^2} \quad (2-1)$$

式中，建筑物全局复杂度为 C ，建筑物面积为 S ，轮廓周长为 L ，相同面积的建

筑物，若其周长越长，轮廓复杂度越高，反之，复杂度越低。

(2) 局部复杂度

Brinkhoff 提出了一种方法，使用三个尺度来表示振动的频率，振动的振幅和凸包的偏差，以量化多边形数据的复杂性。由此，本文衍生出针对建筑物对象局部复杂度的衡量参数，这些参数不仅用于衡量局部复杂度，同时用于转化为建筑物轮廓优化所需要的相关阈值。局部复杂度参数有以下三种：

1) 振动频率

对于一个多边形而言，其顶点数量越多，可能出现的凹陷数量也就越多。这是因为多边形中的每个顶点都可能成为一个凹陷点。因此，在对多边形进行描述时，需要特别注意这些凹陷部分。如果多边形的顶点和凹陷分别描述了顶点的数量和凹陷点的数量，下面的属性将成立：

$$notch \leq vertice - 3 \quad (2-2)$$

因此，凹陷比例可以归一化至 $[0,1]$ 的区间：

$$nt_{norm} \leq \frac{notch}{vertice - 3} \quad (2-3)$$

多边形具有高凹陷比例时，其边缘方向常常发生变化。在特殊情况下，相邻的每两条边均会存在不同的方向。当出现这种情况时，多边形的凹陷比例通常约为 0.5，这也意味着多边形边缘上存在许多凹陷。凹陷的数量越少，多边形的边缘就越光滑。如果凹陷比例为 0，则该多边形为凸多边形。与凹陷比例的低值相似，高值则表示边缘更加平滑。关于凹陷比例的这些性质说明，它可以作为测量振动频率的前提条件。图 2-3 描述了不同凹陷比例的多边形。

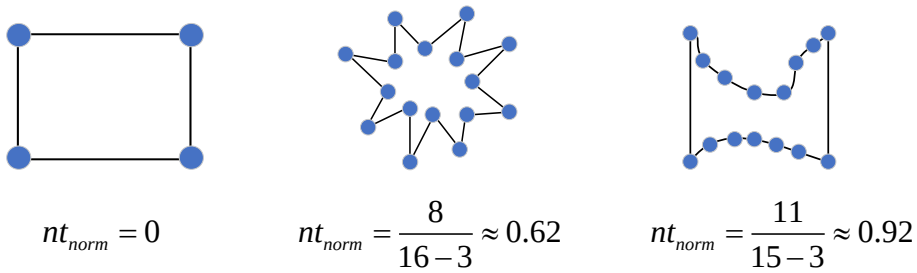


图 2-3 描述了不同振动频率的多边形

Figure 2-3 Polygons describing different vibration frequencies

当凹陷比例约为 0.5 时，多边形振动最高，当凹陷比例为 0 和 1 时振动最低^[47]。为了获得一个低频振动接近 0 而高频振动接近 1 的参数，我们必须变换 nt_{norm} 。因此，振动频率可采用以下公式表达：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/477014001015006151>