

现代测绘理论与技术丛书

基于能量最小化原理的 地图要素移位算法研究

刘远刚 郭庆胜 蔡永香 马潇雅 著



刘远刚

Research on Cartographic
Displacement Algorithms Based on
Energy Minimization Principles

 测绘出版社

现代测绘理论与技术丛书

基于能量最小化原理的地图要素 移位算法研究

Research on Cartographic Displacement Algorithms
Based on Energy Minimization Principles

刘远刚 郭庆胜 蔡永香 马潇雅 著

测绘出版社

·北京·

©刘远刚 2019

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书在约束德洛奈三角网辅助地图数据模型的支持下,针对以 snakes 和 beams 为代表的能量最小化移位算法的参数设置、算法与地图综合约束的关联等问题展开深入研究,提出了若干改进方法,给出了数字环境下地图要素自动移位相对完善的解决方案,并以建筑物与道路两类典型地图要素的移位问题为例,验证了所提模型和算法的有效性和优越性。

本书适合于地理学、测绘科学与技术等领域从事地理信息自动化、智能化处理方法研究的广大研究人员和技术工作者阅读参考,也可作为高校相关专业研究生、本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于能量最小化原理的地图要素移位算法研究/刘远刚等著. —北京:测绘出版社,2019.7

(现代测绘理论与技术丛书)

ISBN 978-7-5030-4220-1

I. ①基… II. ①刘… III. ①地图制图学—算法—研究 IV. ①P28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 071504 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李 伟	责任校对	石书贤
出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543965(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasm.com		
印 刷	北京建筑工业印刷厂	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	7.125	字 数	126 千字		
版 次	2019 年 7 月第 1 版	印 次	2019 年 7 月第 1 次印刷		
印 数	001-600	定 价	38.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4220-1

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

随着计算机技术的飞速发展和地理信息系统 (geographic information system, GIS) 在地图制图领域中的广泛应用, 对数字环境下地图综合自动化的需要越来越紧迫。地图自动综合是地图学与地理信息系统领域的一个难题。一些复杂地图综合算子, 如移位、典型化等的自动化程度仍然较低。尽管国内外学者对地图综合移位算法进行了长期不懈的探索, 但目前仍存在诸多问题没得到有效解决, 突出表现为以下几个方面: ①移位是多种制图综合规则约束下的最优化问题, 但现有算法对各类制图综合规则的考虑还不够充分; ②已有移位算法中的各数学模型、参数条件与地图综合规则约束之间的对应关系还有待进一步研究; ③地图目标(群)的空间关系与空间结构一致性的保持仍然是移位操作的难点。针对以上问题, 本书从地图综合中图形空间冲突解决的实际需求出发, 分析了地图目标间邻近冲突产生的机理和移位操作的本质特征, 围绕 beams 和 snakes 能量最小化移位算法, 对地图中道路和建筑物等要素的空间冲突识别和移位展开深入研究, 通过模型和算法的改进, 提高地图自动综合中移位操作的自动化和智能化水平, 为数字环境下的地图自动综合提供有效的技术手段。本书主要研究内容如下:

(1) 从地图综合移位操作的基本概念出发, 分析了地图目标之间图形空间冲突的产生机理。在归纳和总结面向移位算子的地图综合约束条件的基础上, 给出了一种移位算法概念框架, 并阐述了能量最小化移位算法的基本原理和数学模型, 奠定了本书研究的理论基础。

(2) 通过对单纯数据结构 (simplicial data structure, SDS) 地图数据模型的扩展, 构建了一种包含点、线和面三类地图要素的约束德洛奈三角网 (constrained Delaunay triangulation, CDT) 地图数据模型。模型中明确定义了地图目标之间的空间邻近关系, 并且实现了各类地图目标(群)间空间邻近搜索、骨架线提取、空间邻近冲突识别等算法, 从而为移位算法中邻近冲突的识别及其空间上下文的描述、地图目标(群)空间关系与空间结构一致性的保持提供辅助数据模型。

(3) 提出了一种顾及道路要素等级属性和道路弯曲图形特征的 snakes 模型形状参数设置方法。基于 snakes 的能量最小化移位算法的移位效果一定程度上受控于模型形状参数 (弹性参数 α 和刚性参数 β), 但目前仍缺乏量化的参数设置方法。针对该问题, 以道路网的移位为例, 建立了 snakes 模型形状参数分别与道路等级属性和道路内部各段弯曲曲率之间的量化关系, 从而更好地顾及了道路的等级属性特征和图形特征, 增强了 snakes 模型中形状参数设置的适应性和可控性。

(4)对 beams 能量最小化移位算法提出了三个方面的改进。①在降低参数复杂度的情况下,提出了一种 beams 模型材料参数自动设置方法,从而提高了算法的自动化水平;②通过对移位过大的目标施加吸引力,增强了算法对地图目标位置精度的控制作用;③采用了一种新的迭代策略,将每一次迭代的中间结果作为新的输入调用下一次的迭代过程,从而将模型中的“内能”重置为 0,提高了算法解决冲突的能力。

(5)将改进后 beams 移位算法与辅助地图数据模型相结合,针对建筑物群和道路网两类典型地图要素的移位问题,分别设计了两种空间辅助结构支持下的移位算法:①邻近图支持下的建筑物群移位算法;②增强型道路网支持下的道路要素移位算法。在建筑物群移位算法中,基于 CDT 骨架线构建了表达建筑物群空间分布特征的邻近图,并利用局部建筑物分组信息对邻近图进行调整,从而能从全局和局部两个层次保持建筑物群的空间关系和空间分布特征;在道路要素移位算法中,进一步拓展了空间辅助结构对移位操作的支持作用,构建了一种增强型道路网,使发生移位的道路路段与其附近的建筑物或邻近的其他路段建立关联,同时提出了一种以冲突点为中心的移位操作区划分方法,从而保证移位变形能够在比较合适的范围内得到充分传播,更好地保持道路与其邻近地图目标的空间关系与空间分布特征。

(6)基于 GIS 二次开发组件 ArcGIS Engine,实现了书中提出的模型和算法,并选用多套典型的道路网与建筑物群地图要素数据验证了所实现算法的有效性和优越性。

本书出版得到了国家自然科学基金(41701537,41871378)、湖北省科技创新群体项目(2016CFA024)、地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2016-Z-4-1,SKLGIE2017-M-4-6)的资助。本书第 1 章和第 2 章主要由郭庆胜、刘远刚、蔡永香执笔,第 3 章至第 5 章主要由刘远刚、蔡永香、马潇雅执笔,第 6 章总结部分和全书统稿工作由刘远刚完成。在本书的内容研究、写作与出版的过程中,得到了武汉大学、长江大学的老师们、同学们、同事们的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢!

由于笔者的水平和时间有限,书中难免存在不足之处,望读者不吝赐教!

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 研究背景与意义	1
§ 1.2 国内外移位算法相关研究进展	3
§ 1.3 研究目标与内容	8
第 2 章 相关理论基础	10
§ 2.1 地图综合基本概念	10
§ 2.2 移位基本概念	13
§ 2.3 移位相关地图综合约束	18
§ 2.4 移位算法概念框架	21
§ 2.5 能量最小化移位算法的基本原理	22
第 3 章 地图目标(群)间空间邻近关系与邻近冲突的识别算法研究	31
§ 3.1 空间邻近关系与邻近冲突	31
§ 3.2 基于广义 Voronoi 图与 CDT 的 k 阶邻近关系定义	33
§ 3.3 基于 CDT 的邻近搜索与冲突探测	36
§ 3.4 CDT 骨架线的提取与邻近关系、邻近冲突的识别	42
第 4 章 基于 snakes 的道路网移位算法及其参数设置方法研究	53
§ 4.1 Snakes 移位算法及其形状参数设置问题	53
§ 4.2 顾及道路等级属性与图形特征的形状参数的设置方法	54
§ 4.3 实验与讨论	56
第 5 章 空间辅助结构支持下的 beams 移位算法研究与改进	67
§ 5.1 Beams 移位算法概述	67
§ 5.2 Beams 移位算法的改进	68
§ 5.3 邻近图支持下的建筑物群 beams 移位算法	72
§ 5.4 增强型道路网支持下的道路要素 beams 移位算法	85

第 6 章 总结与展望	97
§ 6.1 研究内容总结	97
§ 6.2 创新点	98
§ 6.3 展 望	99
参考文献	100

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Background and significance	1
§ 1.2	Research progress of displacement algorithms at home and abroad	3
§ 1.3	Research objectives and contents	8
Chapter 2	Relevant theoretical basis	10
§ 2.1	Basic concepts of map generalization	10
§ 2.2	Basic concepts of displacement	13
§ 2.3	Relevant constraints of displacement	18
§ 2.4	Conceptual framework of displacement algorithms	21
§ 2.5	Basic principles of energy minimization displacement algorithms	22
Chapter 3	Recognition of spatial proximity relations and proximity conflicts between map objects (groups)	31
§ 3.1	Spatial proximity relations and proximity conflicts	31
§ 3.2	Definition of k -order proximity relations based on general Voronoi graph and CDT	33
§ 3.3	Adjacent search and conflict detection based on CDT	36
§ 3.4	Extraction of CDT skeleton lines and identification of proximity relations and conflicts	42
Chapter 4	Road network displacement algorithm based on snakes and its parameter setting method	53
§ 4.1	Snakes displacement algorithm and its shape parameter setting problem	53
§ 4.2	Method for shape parameters setting considering road grade attributes and graphic features	54
§ 4.3	Experiments and discussions	56

Chapter 5	Research and improvement of beams displacement algorithm supported by auxiliary structures	67
§ 5.1	Summary of beams displacement algorithm	67
§ 5.2	Improvement of beams displacement algorithm	68
§ 5.3	Beams displacement algorithm for building groups supported by proximity graph	72
§ 5.4	Beams displacement algorithm of road feature supported by enhanced road network	85
Chapter 6	Summary and Prospect	97
§ 6.1	Summary of the work	97
§ 6.2	Innovations of the work	98
§ 6.3	Prospects	99
References		100

图学核心和难点问题之一的地图综合也必然朝着定量化、自动化和智能化方向发展。由于数字环境下的地图自动综合极其复杂,从20世纪60年代以来,始终受到地图学界的重视和关注,已成为现代地图学中最具挑战性和创新性的研究领域(王家耀等,2011)。而且,随着“数字地球”“智慧城市”等概念的提出与兴起,为了适应新形势下地图学的发展,同时为了提高地理信息的服务能力,对地图自动综合的研究变得越来越紧迫。

要实现数字地图的自动综合,必须将传统综合过程定量化、模型化、算法化、智能化、协调化和系统化(王家耀等,2011)。半个多世纪以来,世界各地专家学者在这些需求的驱动下,试图将传统手工制图中的地图综合操作转换为数字环境下的程序代码和软件工具,提出了众多概念框架、数据模型、算子和算法,取得了可喜的成果(AGENT CONS., 2001a, 2001b, 2001c, 2001d, 2001e, 2001f;武芳等,2008;王家耀等,2011;毋河海,2012)。尤其是对地图综合各种算子算法的研究取得了较大的进展,在一些主流的GIS商用软件中,也实现了部分相应的软件模块(Esri,2012)。尽管如此,现实情况离人们所期待的地图自动综合的愿景还有很大的差距。一方面,目前仍然没有提出具有良好数学基础的地图综合理论与方法框架,缺乏从总体上将各种算子、算法集成在一起综合解决实际问题的方法论和策略;另一方面,对一些复杂算子,如移位、典型化等的研究还不够深入,这类操作的自动化程度还比较低,成为制约地图综合自动化的瓶颈问题。因此,现有的地图综合模型和算法还不足以满足地图自动综合的需要,仍然需要持续不断地研究。

1.1.2 研究意义

目前,移位是数字地图综合中自动化程度较低的算子之一(焦健等,2005),其主要任务是解决地图中目标之间的邻近冲突,在解决冲突的过程中特别强调地图目标(群)的空间关系和空间分布的保持,而地图目标空间关系的一致性维护是自动综合中的一个难点(杜晓初,2005;蔡永香,2007)。在地图要素符号化的过程中,地图符号轮廓往往大于地物实际尺寸,导致毗邻的地物在地图上的占位面积不足。随着比例尺的缩小,这种矛盾愈演愈烈,使得相邻地图目标之间不可避免地产生相互压盖,从而导致地图图形难以辨识,原有的空间关系变得模糊,甚至错误。此时,必须采用移位、舍弃、压盖、合并等手段对这些图形冲突加以处理,以增强地图的清晰性和可读性。在这些操作中,移位是用于解决地图目标之间邻近冲突的首选,可解决大部分的地图图形冲突。作为一种空间上下文相关算子,移位需要同时考虑多种约束(AGENT CONS., 2001b),其中最重要的就是地图目标之间空间关系一致性的保持。而地图目标空间关系的表达是一个极复杂和模糊的概念,它具体包括拓扑关系、方向关系和邻近关系等,并且这些复杂的空间关系还相互联系和制约,所以移位操作是一个特别复杂的问题(武芳等,2008)。在目前地图综合

理论与方法框架仍不成熟的条件下,将移位这种复杂的综合算子视为一种最优化问题,然后用最优化逼近的方法进行求解是个不错的选择(毋河海,2000;Harrie,1999)。国内外学者已提出了众多最优化移位算法(Burghardt et al,1997;Ware et al,1998;Harrie,1999;Bader,2001;Ware et al,2003)。本书对其中的能量最小化算法做进一步的研究并提出若干改进,试图给出数字环境下地图要素自动移位相对完善的解决方案,从而为更好地解决移位难题提供有效技术手段。同时,也为地图自动综合中同类问题的解决,乃至地图综合自动化水平的提高,提供有益思路。

§ 1.2 国内外移位算法相关研究进展

国内外对于移位算法的研究已有较长历史,并取得了大量成果,大致可分为顺序算法和最优化算法两类(Bader,2001;郭庆胜等,2007;武芳等,2008)。前者采用几何计算方式,对存在冲突的地图目标逐个进行移位,试图依次解决每个冲突,缺少对移位过程的有效控制和移位结果全局评价机制;后者将移位问题看成是函数最优化或组合最优化问题,对所有地图目标的几何形状、空间关系和空间分布特征进行总体评价,试图从全局角度出发同时解决所有冲突。本节分别对两类算法进行简要回顾,并归纳和分析各类算法的优点和不足,从而明确进一步研究的方向。

1.2.1 顺序算法

早在20世纪70年代,德国汉诺威大学学者就开始了移位算法的研究,Lichtner(1979)提出的移位向量方程是当时最具代表性的研究成果之一,该方程专用于计算与道路产生邻近冲突的建筑物的移位向量。Nickerson(1988)在移位向量方程基础上,提出了一种道路要素移位算法。该算法中采用缓冲区进行冲突探测,根据冲突处道路路段的交叉情况对冲突分门别类地进行移位处理,并采用了一种三角平滑函数实现道路内部的形状保持。在之后的几年间,该算法一直被认为是处理道路移位最好的算法,尤其适合平行线目标的移位(武芳等,1992),但该算法不能解决涉及两条以上线目标的冲突问题,且难以保持道路的几何形状。Mackaness(1994)提出了比率射线算法,该算法采用聚类分析方法确定冲突的点状目标群的几何中心,然后以聚类中心向外发散的方式对周围点目标进行移位。该算法适用性有限,仅仅适合点群目标的移位。类似的顺序算法还有很多,这些早期的顺序移位算法确立了移位算法几何学基础(Volkert,1978;Christ,1979)。

20世纪90年代初期,地图综合领域开始特别注重辅助数据结构的应用,尤其是对移位这类空间上下文相关的操作,需要考虑地图目标群的空间关系和空间分

布特征,各种辅助数据结构和数据模型的引入正是为了满足这一需求。其中,基于栅格数据结构、基于沃罗诺伊图(Voronoi diagram)和基于约束德洛奈三角网(constrained Delaunay triangulation, CDT)的研究成果尤为显著。在基于栅格数据结构方面,Jäger(1990,1991)提出了“移位山”的概念,这种模型以类似数字高程模型(digital elevation model, DEM)的形式表达了地图上各处的移位大小和方向;Li等(1992,1996,1997)提出了基于数学形态学的移位算法,该方法对大比例尺地图中的符号化冲突问题有较好的效果。有代表性的还有费立凡(2004)提出的基于栅格-矢量混合数据结构的移位算法,该算法针对大比例尺地形图中因道路符号的夸大而引起的道路与建筑物的图形冲突问题,设计了一种栅格-矢量混合数据结构,利用栅格数据结构快速探测冲突,在矢量数据结构中,从人类制图员的视觉感受出发,用平移和受控变形等几何手段来解决图形冲突。总的来说,采用栅格结构的移位算法能够较容易地探测空间冲突,但移位算法精度与栅格数据的分辨率密切相关,对计算机内存有较高的要求,而且矢量数据与栅格数据之间转换开销较大(费立凡,2004)。与之相比,基于CDT和Voronoi图的数据结构更适合矢量地图数据的处理。Jones等(1995)借助CDT对街道和建筑物进行综合,设计了单纯数据结构(simplicial data structure, SDS)数据模型,实现了包括移位在内的多种地图综合算子;Peng等(1995)基于CDT构建了“移位安全区”,用于保证移位过程中不产生拓扑错误;Ruas(1998)用建筑物的中心点构建CDT,形成了包含建筑物之间邻近关系和建筑物群空间分布特征的结构网,从而为移位操作提供结构化信息。艾廷华(2004)利用CDT实现了基于场论分析的建筑物群的移位算法,借助了物理学场论中的“等势线”模型来表达建筑物群在街道拓宽后产生移位的现象,在他们最近的研究中还引入了建筑物之间局部斥力的概念,从而能够处理更复杂的冲突情况(周启等,2013; Ai et al, 2015)。一直到最近,还有学者提出了基于Voronoi图的移位算法(Basaraner, 2011),该算法中首先利用建筑物的Voronoi区域和缓冲区的叠加形成移位操作区,然后采用多因素综合评价方法确定移位目标。这些研究表明,对于移位这种空间上下文相关的算子而言,冲突的识别和空间上下文环境信息的提取是算法中不可或缺的一环。

1.2.2 最优化算法

20世纪90年代中后期,学界对地图自动综合产生了一个共识:地图综合是一个具有“不良定义(ill-defined)”的复杂问题,甚至认为是计算机无法解答的“NP-完全”问题(Müller et al, 1995; 毋河海, 2012)。面对这样一个地图学与GIS领域的重大难题,各国学者纷纷在地图自动综合的问题中引入最优化求解方法,尤其是在移位算法中大量借鉴了数学、物理、工程科学和人工智能领域的相关最优化方法。

借鉴地图注记自动配置方法的思路,英国学者提出了一系列组合最优化算法(Ware et al, 1998, 2002, 2003; Wilson et al, 2003)。在这类算法中,地图目标的移位是通过一种试探方式实现的。首先,采用一种移位模板定义每个地图目标可能的移动位置,通过组合排列的方式得到整幅地图的所有可能状态的集合,这个集合构成了一个离散的移位求解空间,然后可基于一些启发式搜索算法从中找到最优解或可行解。在人工智能领域这类算法有很多,例如,模拟退火、禁忌搜索、遗传算法等。以 Jones 领导的研究团队,先后采用这一思路,实现了基于模拟退火的移位算法(Ware et al, 1998, 2003)、基于遗传算法的移位算法(Wilson et al, 2003)、基于禁忌搜索的移位算法(Ware et al, 2002),对建筑物群的移位问题进行了试验性研究。类似的研究还有(Lonergan et al, 2001; Mackaness et al, 2001)等。然而,这类方法仅仅以地图目标之间的间隔距离是否达到图上最小距离阈值作为结果评判的唯一标准,难以保持地图目标的形状和空间分布特征。同时,此类算法的效率也是个问题,随着移位目标数量和试探候选位置的增加,算法搜索的时间也会成几何倍数增加。因此,从实际应用的角度来看,这种算法的效果和效率都不够理想。为了改进,必须将更多更高层次的制图约束考虑进来,但这势必会进一步增加算法的复杂度。

与组合最优化算法相比,函数最优化算法要更复杂一些。后者将在物理、数学、工程科学领域已经得到广泛应用的各种模型和方法用于模拟地图综合中的移位问题,从而构造出考虑多种地图综合约束的移位数学方程式。例如,能量最小化方法、最小二乘法、有限元分析方法等(Burghardt et al, 1997; Harrie, 1999; Højholt, 2000; Bader, 2001)。

Harrie 等基于最小二乘法,提出了一系列算法用于实现地图综合中的各种算子的自动化,包括简化、移位、聚合、典型化等。有些算法中地图综合问题被转换为如何找到各种内、外约束控制下的最优解问题(Harrie, 1999, 2001, 2003; Harrie et al, 2002; Sester, 2005)。其中内部约束用于保持地图目标的几何特征,外部约束用于迫使地图目标相互之间达到最小距离要求。算法中相关约束都被表示为关于地图目标几何坐标的线性方程式。然后,将它们聚集起来,形成一个矩阵方程。这样移位问题就被转换成一个解线性方程组的纯数学问题,最后,采用最小二乘法解这个线性方程。该方法中各种地图综合约束被形式化为对应的数学方程式,但如何将各种“不良定义”的地图综合约束条件转换为数学语言表达的方程式仍十分困难。

Springs 模型可能是最早提出的一种针对移位问题的能量最小化方法。该模型将各种与线性要素相关的制图约束比拟成不同类型的弹簧(Bobrich, 1996, 2001),用“外能”表示触发目标移位的各种冲突,“内能”表达弹簧内部的弹性势能。然后,采用下降单纯形法(downhill simplex method, DSM)求出弹簧上“内

能”与“外能”达到平衡时的最佳状态。

采用材料力学和有限元分析方法 (finite element method, FEM), Højholt (2000) 将移位模拟成一种在弹性平板上的连续变形过程。在该模型中, 地图空间被 CDT 划分为离散的三角形弹性板块, 并赋予它们不同的刚性和边界条件, 用以模拟与不同地图目标相关的制图综合约束条件。然后, 采用有限元分析方法从整体上对移位及其后续传播问题进行求解, 其结果能够较好地保持地图目标(群)的空间关系与空间分布特征。我国学者毛建华等(2003)将这种算法用于解决地图目标(群)空间关系一致性的维护问题, 取得了比较好的应用效果, 同时也提出了一些改进。但由于模型中采用三角形弹性面板的变形来模拟地图平面上目标的移位, 当移位距离较大时, 会产生三角形穿越问题, 导致算法异常。

Burghardt 等(1997)提出了一种基于 snakes 模型的线性要素移位算法。Snakes 是一种在计算机视觉模式识别中广泛应用的经典模型。模型中的一个 snake 就是一条能量最小化样条线, 它的运动受到内、外力作用的控制, 其中内力与外力分别来源于冲突触发的移位驱动力和线要素对保持自身形状要求的内聚力。因此, 该方法十分适合线状要素的移位, 但仍需进一步考虑如何在模型中引入更多的制图约束(Bader et al, 2000)。

Bader(2001)在其博士论文中首次明确了能量最小化移位算法的概念, 对基于 snakes 移位算法和基于有限元分析的移位算法(Højholt, 2000)做了总结性的研究, 把它们都纳入能量最小化移位算法的范畴, 第一次非常系统地阐述了能量最小化算法的原理与数学基础。同时, 借鉴材料力学相关原理提出了另一种的能量最小化模型——beams 模型。该模型不仅继承了 snakes 模型的优点, 而且具有更符合地图平面的二维特性。模型中将道路网看成弹性梁结构, 每一条线状目标都看成由多段细长的弹性杆件通过铰链串连而成的弹性杆件链状结构。在这样的假设条件下, 可对该模型运用材料力学思想进行目标受力分析, 并用能量最小化原理求得目标移位的最优解。为了将 beams 模型应用到建筑物群的移位, Bader(2001)还设计了一种辅助结构——球墨铸铁桁架模型。该模型以建筑物的中心点为结点构建一种类似最小生成树(minimum spanning tree, MST)的结构, 得到了一组需要移位的建筑物的基本框架, 该框架维持了这组建筑物的拓扑邻近关系。这样可将建筑物群的移位问题转换为其对应的球墨铸铁桁架模型的各结点的移位问题。相关研究比较全面地给出了能量最小化移位算法的理论和框架, 为进一步的技术实现和应用打下了基础。在相当长的时期里, 能量最小化算法依然是解决复杂移位问题的最有效的手段之一, 尤其是对线状目标(群)的移位(Bader et al, 2000; 武芳等, 2005; 侯璇等, 2005; Thom, 2006; 吴小芳等, 2008; 吕秀琴, 2008; 刘远刚等, 2014; Liu et al, 2014; Sun et al, 2016)。

1.2.3 研究进展评述与存在问题分析

通过对前人研究的回顾,可以看出国内外学者对地图综合移位算法进行了长期不懈的探索,取得了突出的成绩。但是,目前仍存在诸多问题没得到有效解决,主要表现为以下几个方面:

(1)移位是多种制图综合约束下的最优化问题,但现有算法对各类制图综合约束的考虑还不够充分。国内外学者普遍认为地图自动综合中的移位是一种多重条件约束下的最优化问题,至少需要考虑地图表达的清晰易读性、地图目标几何形状的相似性、空间关系与空间分布结构的一致性、地理位置的精确性几个方面的约束条件(Bader,2001)。顺序算法以计算冲突目标的移位方向和大小为主要目的,没有更深入地考虑地图目标空间关系和空间分布特征在移位过程中的保持问题。组合最优化算法采用了比较成熟的模拟退火算法、遗传算法等启发式算法,通过移位空间的离散化,回避了移位操作中的复杂空间认知和推理问题,但算法仅仅以满足地图目标之间最小间隔和地图目标位置精度要求为目的,忽略了地图目标之间空间关系和地图目标群空间分布结构一致性的保持,其结果难以达到地图感受规律和地图制图规范的要求。函数最优化算法从全局考虑移位操作的最优化问题,交叉融合各学科算法思想(如 springs、snakes 和 beams 等),能有效地控制冲突的传播,但还难以较好地将各种地图综合约束条件与模型中的各种参数进行关联,也没有充分考虑对产生移位的地图目标位置精度的约束作用。

(2)最优化算法比顺序算法更适合移位问题,但最优化算法中各数学模型、参数条件与地图综合约束之间的对应关系还有待进一步研究。移位是一种多重条件约束下的最优化问题,在现有的算法中,最优化算法与早期的顺序算法相比更适合用于解决比较复杂的移位问题。顺序算法没有提供一种将各种约束条件综合考虑的有效机制和控制策略,难以实现移位传播,当情况比较复杂时,很难保证得到可行解。最优化算法从策略层面给出了移位的总体控制机制,借鉴了数学、物理、工程科学、人工智能等领域的多种理论与方法(如最小二乘法、有限元分析法、能量最小化原理、材料力学方法及各种智能算法等),以最优化技术实现了移位的过程控制,具有更成熟的理论和方法基础,可从全局角度求解最佳或可行的移位解。但是,各种最优化算法的相关数学模型、参数都来源于其他专业领域,没有与地图综合约束形成最佳的匹配,因此给实际应用带来不便。如何在各种最优化模型中注入更多的地图制图或地图综合约束,仍是个值得研究的问题。

(3)地图目标(群)的空间关系与空间结构一致性的保持是移位操作的重点和难点,而普通的地图或 GIS 数据结构无法对此类约束的满足提供足够的支持。作为一种空间上下文相关的地图综合算子,移位应该特别注重地图目标(群)的空间关系与空间结构一致性的保持。为此,首先需要解决的问题就是地图目标(群)空

间关系与空间分布结构的识别与定量化表达。而数字环境下计算机并不能像人一样直接识别和记忆地图中空间目标之间的空间关系和空间目标(群)的分布结构,必须通过大量的分析和计算才能得到此类信息;其次,如何将这些信息转换为能够被计算机理解的制图综合约束和规则,并作用于移位算法,也是比较难解决的问题。因此,有必要建立相应的辅助数据结构,如栅格数据结构、三角网数据结构等,以帮助解决移位过程中空间关系的识别与维护,以及实现空间冲突的识别与描述等问题。

§ 1.3 研究目标与内容

1.3.1 研究目标

地图目标的移位是地图综合过程中用于解决图形冲突的重要手段。目前,这种操作的自动化程度仍然较低。早期基于几何运算的移位算法仅仅考虑如何将存在冲突的地图目标移开,未能很好地保持地图目标群的空间形态和空间关系,基于全局最优化的移位算法(如能量最小化算法)能够从全局出发,以一种整体的视野解决冲突问题,但在实际应用中尚需进一步完善。另外,地图图形冲突的探测和冲突附近地图目标的空间上下文环境的识别与维护等问题在以往的研究中也未得到足够的重视,而它们恰恰是移位算法在实际应用中不可回避的基本问题。

本书从地图综合中图形冲突解决的实际需求出发,分析地图目标间邻近冲突产生的机理和移位操作的本质特征,剖析现有移位算法的不足,结合 beams、snakes 能量最小化算法,对地图中道路和建筑物等要素的空间冲突识别和移位展开深入研究,通过模型和算法的研究与改进,提高地图自动综合中移位操作的自动化和智能化水平,为数字环境下的地图自动综合提供有效的技术手段。

1.3.2 研究内容

为达到以上研究目标,本书对如下内容开展了研究:

(1) 地图综合中图形冲突产生机理与移位操作基本问题剖析。从地图综合中移位操作的基本概念出发,分析地图目标之间图形冲突的产生机理,回答“什么是移位?”“为什么要移位?”“怎样移位?”等基本问题。在归纳和总结面向移位算子的地图综合约束条件的基础上,建立移位算法概念框架,为进一步的方法研究和技术实现提供理论基础。

(2) 基于约束 Delaunay 三角网(CDT)的空间邻近关系和邻近冲突识别算法研究。地图目标群的空间关系与空间结构一致性的保持是移位操作的重点和难点。基于 CDT 设计并实现一种明确定义邻近关系和具有较强邻近搜索能力的辅助地

图数据模型,在此模型基础上提供骨架线提取、邻近图构建和邻近冲突识别等多种辅助算法,从而为移位算法中空间关系的识别、表达和维护,以及邻近冲突的识别与分析提供数据模型和辅助工具。

(3)能量最小化移位算法研究与改进。移位是一种多重条件约束下的最优化问题,因此最优化算法比顺序算法更适合移位问题。尤其是能量最小化算法,借鉴物理学相关领域的能量最小化原理,以“外能”代表地图目标之间的邻近冲突,以“内能”定义由地图目标移位而导致的形状和结构变化,以一种整体的视野解决冲突问题,具有比较成熟的理论基础。本书将对能量最小化移位算法做进一步的研究,针对以往研究中对各种地图综合约束考虑不充分的问题,分别以 snakes 和 beams 算法为例,从算法参数的设置和辅助结构的建立与应用两个方面做出改进,从而增强相关模型、参数与地图综合约束之间的关联,提高算法对各类移位问题的适应性和有效性。

(4)算法实验验证。道路网与建筑物(居民地)要素是地图上最常见的两类人文要素。地图综合中,经常需要采用移位对这两类要素相关的邻近冲突进行处理。一般根据图形特征的不同,分别对道路和建筑物采用变形和平移两种不同的移位方式。与这两种要素相关的移位问题具有重要的实践意义和代表性。因此,本书以道路和建筑物要素为例,对移位操作中的典型问题展开实验研究,验证所提模型和算法的有效性和优越性。

1.3.3 研究范围限定

地图综合中移位处理一般用于符号化过程中解决地图符号图形之间的邻近冲突。本书研究仅限于移位所涉及的图形冲突的识别和解决等问题。对移位前的地图数据综合(或模型综合),如线的简化、要素的选取等,暂不讨论。同时由于研究时间和写作篇幅限制,对移位后的结果质量的综合评价和进一步处理不做深入研究。另一方面,用于图形冲突解决的其他算子还有多种,如选取、删除、典型化、合并等,在实际应用中,这些算子需要和移位算子协同使用,才能很好地解决各类冲突。关于综合算子的协同问题属于更高层次的地图综合策略问题,也超出本书研究范围。为此,假设本书研究与实验中所涉及地图数据是已经过合适的综合处理的,其中的图形冲突是适合采用移位算子解决的。