

模糊不确定性建模分析及应用

贺 辉 余先川 胡 丹 著



科学出版社

模糊不确定性建模分析及应用

贺 辉 余先川 胡 丹 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以模糊不确定性建模与土地覆盖分类应用为主题,分为算法理论和应用两部分。第一部分主要介绍模糊集系统理论方法,包括一型模糊集、二型模糊集,重点是面向模式识别的区间二型模糊集的构建、相异性度量和降型方法等;区间值数据建模理论主要分析了特定的区间值数据模型的建立方法和距离度量以及在此基础上进行的聚类分析模型和算法。第二部分论述不同的前沿模糊不确定性模型在土地覆盖分类中的应用技术路线及效果分析等。

本书可供影像处理、模式识别和地学信息工程等领域的高等院校教师和研究生参考,也可供相关领域的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模糊不确定性建模分析及应用/贺辉,余先川,胡丹著. —北京:科学出版社,2016.8

ISBN 978-7-03-049638-6

I. ①模… II. ①贺… ②余… ③胡… III. ①模糊系统—不确定系统—系统建模—研究 IV. ①N945.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201533 号

责任编辑:任 静 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:9 1/4 彩插:6

字数:174 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

信息，特别是不确定性信息的表达和处理是当今信息时代的一个重要课题。信息的不确定性有多种形式，诸如随机不确定性、模糊不确定性、分辨率不确定性、未知性等。在随机不确定性方面的研究已得到较多的成果与应用，而对于模糊不确定性的理论和处理方法还处于逐步认识和探讨阶段。本书针对模糊不确定性这一议题，结合其在土地覆盖分类中的应用展开论述。

草原的范围并不总是确定的，而是向森林或沙漠区域逐渐移动；土壤单元的边界、植被类型的划分也常常是模糊的，这就是模糊不确定性。概括地说，遥感数据模糊不确定性主要取决于数据边界判别、数据的复杂性、遥感成像技术水平和遥感影像解释等方面。非此即彼的分类模型对遥感影像土地覆盖分类过程中常常表现出不适应性，因为其无法描述待分类影像数据固有的不确定性，即类内的非均匀性和类间的模糊不确定性，使得遥感影像分类结果存在模糊不确定性。随着空间分辨率的提高，影像信息的多样性和干扰的复杂性给影像的分类带来了更大的挑战，现有的标准影像处理方法往往缺乏对此类不确定性的考虑，从而制约了遥感更广泛的应用，亟需在充分认识影像数据特点的基础上，研究合适的模糊不确定性建模方法，从而提高分类结果的可靠性和精度。

基于模糊集理论的模糊逻辑系统是非线性稳定系统很好的建模工具，具有良好的非线性逼近能力^[1-3]。它能结合专家知识、语言变量以及人类的逻辑思维进行推理，被证实是处理复杂系统中模糊不确定性的一个非常好的工具，同时也成为优良的分类方法，广泛应用于模式识别问题。不过总有些美中不足，我们需要找到合理的方法来同时刻画同类型地物个体光谱的一定变化性及不同类别地物边界的模糊不确定性。区间值数据模型用来描述观测数据的可变性和模糊性，适合用以刻画遥感影像的类内非均质性；而二型模糊集更强的不确定性控制能力使得其适合用来刻画遥感影像类别的高阶模糊不确定性。因此，面向遥感影像分类，基于区间值数据和二型模糊集，开展遥感影像分类相关不确定性建模和处理分析方法研究具有重要的理论意义和应用价值。

本书从多光谱遥感影像数据自身和类别间相互关系的不确定性出发，探索有效的面向分类的遥感影像不确定性建模方法，一方面构建面向遥感影像土地覆盖分类的区间值数据模型，以刻画地物在遥感影像数据上呈现的不确定性（模糊性和多解性），从影像信息表达源头提高光谱近似或混叠的不同类别地物的区分度和光谱异质的同类别地物的包容性；另一方面将二型模糊集引入到多光谱遥感影像模糊分类器的设计

中,以刻画遥感影像类别存在的高阶模糊不确定性,在此基础上提出各种自适应的模糊聚类算法。多组遥感影像土地覆盖无监督分类实验结果表明,本书提出的这一系列不确定性建模和模糊聚类方法能明显改善遥感影像的分类效果和提高分类精度,是对遥感影像土地覆盖自动分类的一次有益探索,同时也丰富了模糊不确定性建模理论。

本书研究工作得到了国家高技术研究发展计划项目“高空间分辨率影像目标自动识别”(2007AA12Z156)、国家自然科学基金面上项目(61071103、41272359)、北京师范大学自主科研重点基金“基于非线性光谱解混的高光谱遥感影像超分辨率重建”、教育部博士点基金“高光谱遥感影像的光谱解混与超分辨重建的研究”(20120003110032)以及广东省自然科学基金博士启动项目“土地覆盖分类的模糊不确定性建模研究”(2014A030310415)的资助。

本书参编作者还包括周伟(第4章、8章)、代莎(第4章)、安卫杰(第4章)。

感谢北京师范大学、北京师范大学珠海分校、北京师范大学“空间多源信息融合与分析校级重点实验室”对本书编写的支持。感谢国家自然科学基金委员会和广东省自然科学基金委员会的资助。感谢北京师范大学彭望禄教授、曾文艺教授对本书研究工作的指导和帮助。感谢北京师范大学何武的技术支持。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者指正。

目 录

前言

第 1 章	导论	1
1.1	模糊不确定性建模理论概述	1
1.2	模糊不确定性建模理论及其应用发展历程	2
1.3	本书的结构与章节安排	4

第一部分 模糊不确定性建模算法理论基础

第 2 章	模糊系统理论基础	9
2.1	概述	9
2.2	一型模糊集	9
2.2.1	隶属函数及 α -截集	10
2.2.2	模糊等价关系	11
2.3	二型模糊集理论	12
2.3.1	二型模糊集理论的提出	12
2.3.2	二型模糊集定义及其 FOU	13
2.3.3	二型模糊集的 α 平面表示	14
2.3.4	区间二型模糊集	15
2.3.5	面向模式识别的区间二型模糊集的构建	17
2.3.6	二型模糊集的距离度量	23
2.4	二型模糊逻辑系统	24
2.4.1	二型模糊降型	25
2.4.2	去模糊化	29
2.5	本章小结	29
第 3 章	区间值数据建模理论	30
3.1	概述	30
3.2	区间值数据定义	31
3.3	区间值数据建模	32
3.4	区间值数据集的相异度量	32
3.4.1	区间值向量距离度量	33

3.4.2	其他的区间值数据关系度量概念	35
3.5	本章小结	37
第4章	模糊不确定性模型及典型算法	38
4.1	概述	38
4.2	一型模糊聚类模型	38
4.2.1	点原型聚类模型	39
4.2.2	非点原型聚类模型	43
4.3	面向对象的无监督分类算法	44
4.4	模糊C均值聚类(FCM)的关键影响因子分析	46
4.4.1	模糊指数 m 的不确定性及对聚类结果的影响	46
4.4.2	不同距离定义对FCM结果的影响	47
4.5	二型模糊聚类模型	51
4.6	分层混合模糊-神经网络模型	52
4.6.1	分层混合模糊-神经网络模型概述	52
4.6.2	分层混合模糊-神经网络训练算法	53
4.7	区间值数据集的模糊划分	60
4.8	模糊聚类有效性评价	61
4.9	本章小结	63
第二部分 模糊不确定性建模算法在土地覆盖分类中的应用		
第5章	土地覆盖分类模糊不确定性的来源及研究现状	67
5.1	遥感数据的模糊不确定性	67
5.2	传统处理方法	69
5.2.1	基于像素的方法	70
5.2.2	面向对象的分类方法	70
5.2.3	模糊分类方法	73
5.3	基于模糊不确定建模理论的新方法	73
5.4	本章小结	75
第6章	区间值数据建模与遥感影像土地覆盖模糊分类	76
6.1	概述	76
6.2	遥感影像区间信息表达建模及其相异性度量	77
6.3	区间伸缩因子的构造	79
6.4	自适应区间值模糊C-均值算法	80
6.4.1	初始化隶属度矩阵的优化	80

6.4.2	自适应区间值模糊 C-均值算法描述	80
6.5	遥感影像土地覆盖分类实验	82
6.5.1	技术路线	82
6.5.2	实验设计和数据描述	82
6.5.3	实验结果及分析	84
6.6	本章小结	88
第 7 章	像斑综合特征区间建模与遥感影像土地覆盖无监督分类	89
7.1	概述	89
7.2	影像分割及像斑综合特征区间建模	89
7.3	像斑综合特征区间向量的相异性度量	91
7.4	实验设计	92
7.4.1	实验数据描述	92
7.4.2	面向对象的自适应模糊无监督分类算法	94
7.4.3	实验流程	95
7.5	结果及分析	96
7.6	本章小结	99
第 8 章	区间二型模糊 C 均值聚类与遥感影像土地覆盖自动分类	100
8.1	概述	100
8.2	区间二型模糊集的中心	101
8.2.1	区间二型模糊集中心的定义	101
8.2.2	区间二型模糊集中心的计算	102
8.3	遥感影像自动分类实验	103
8.3.1	基于模糊指数构建面向遥感影像土地覆盖分类的区间二型模糊集	103
8.3.2	基于模糊指数不确定性的区间二型模糊 C 均值算法	103
8.3.3	数据的选取	104
8.3.4	实验结果及分析	105
8.4	本章小结	108
第 9 章	自适应区间二型模糊聚类与遥感影像土地覆盖自动分类	109
9.1	概述	109
9.2	基于模糊距离度量的区间二型隶属度函数构建	110
9.3	自适应快速降型和去模糊	111
9.4	自适应区间二型模糊聚类算法	112
9.5	遥感影像土地覆盖分类实验	113

9.5.1	实验数据	114
9.5.2	实验及结果分析	116
9.6	本章小结	118
第 10 章	模糊不确定性建模方法适应性分析及模型综合	119
10.1	概述	119
10.2	模糊不确定性建模方法适应性分析比较	119
10.2.1	实验数据选取	119
10.2.2	实验结果及评价分析	120
10.3	综合区间模糊分类模型构建及影像聚类分析	125
10.3.1	模型建立和算法描述	125
10.3.2	基于综合区间模糊分类模型的影像聚类结果及分析	126
10.4	本章小结	127
参考文献		128
彩图		

第1章 导 论

1.1 模糊不确定性建模理论概述

现实中，我们接触到的各种各样的信息更多的时候是不确定的，如遥感影像数据具有固有的不确定性，即我们常说的“同物异谱”、“同谱异物”现象。所谓确定性，是指事物必然的、有规律的及清晰、明确的属性，而不确定是指事物或然的、无序的和模糊、近似的属性。信息的不确定性一般包括概率不确定性、模糊不确定性和分辨力不确定性。而模糊不确定性问题是影像分类识别等领域不可避免的问题，如何更好地认识和把握这种不确定性是我们必须解决的问题。

模糊理论和区间值数据理论等正是为处理这些模糊不确定性问题提出的有效的数学工具。模糊理论处理模糊不确定性充分考虑到了事物的中间过渡状态，克服了非此即彼的二值逻辑。而区间值数据是一种可反映观测数据的可变性和不确定性的符号数据，利用区间值思想对数据的模糊不确定性建模可以更好地刻画数据的本质特征。

模糊理论是指应用了模糊集合的基本概念或隶属度函数的理论，主要有以下五个分支。

(1) 模糊数学：用模糊集合取代经典集合，从而扩展了经典数学中集合的概念。在经典集合理论中，一个元素对于一个集合，要么属于，要么不属于，即经典集合理论只能描述“非此即彼”的现象，而模糊集合论是研究和处理模糊性现象的理论。这里所谓的模糊性，主要是指客观事物的差异在中介过渡时所呈现的“亦此亦彼”的性质。例如高与矮、冷与热、多与少、大与小、亮与暗、粗与细、长与短等。这些对立的概念之间都没有泾渭分明的界限。模糊集合用隶属程度来描述这种差异的中介过渡，使它可以用精确的数学语言来描述自然和社会现象中存在的模糊性。可以说，模糊集合论是模糊理论提出和发展的基础。

(2) 模糊逻辑与人工智能：引入了经典逻辑学中的近似推理，且在模糊信息和近似推理的基础上发展出专家系统。专家系统是人工智能中较活跃的一个分支，它是在模糊语言的基础上，利用模糊推理方法，把由自然语言描述的专门知识与经验转化为计算机程序，从而可以使计算机根据专家提供的特殊领域的知识、经验进行推理和判断，模拟专家做决定的过程，解决那些需要由专家决定的复杂问题，提出专业水平的解决方法或决策。

(3) 模糊系统：是一种基于知识或基于规则的系统，核心是由所谓的 IF-THEN 规则所组成的知识库。一个 IF-THEN 规则就是一个用隶属函数对用自然语言所描述的某些句子所做的 IF-THEN 形式的陈述。模糊系统就是通过组合 IF-THEN 规则构造。

(4) 不确定性信息和理论：是概率论、可信性理论、信赖性理论的统称。在信息时代，人们会接触到各种各样的信息。这些信息有时是确定的，但更多的时候是不确定的。确定是指事物有规律的、必然的、清晰的和精确的属性，不确定是指事物无序的、或然的、模糊的和近似的属性。怎样去认识和把握不确定性是我们需要解决的问题。模糊理论正是处理这些不确定性问题的一个有效的数学工具，例如，模糊随机理论、双重模糊理论和模糊粗糙理论等。其中模糊粗糙集理论与概率论、模糊数学和证据理论等其他处理不确定或不精确问题的理论有很强的互补性，因此，研究粗糙集理论和其他理论的关系也是粗糙集理论研究的重点之一。

(5) 模糊决策：是模糊集合论和决策理论相结合的产物，是指在模糊环境下进行决策的数学理论和方法。模糊决策的研究始于 19 世纪 70 年代，涉及的领域很广，至今还没有明确的范围。常用的模糊决策方法有模糊排序、模糊寻优和模糊对策等。严格地说，现实生活中的决策大多数是模糊决策。例如，企业招聘过程中的很多指标性概念就是模糊的，如应聘者的能力、工作态度、性格等，因此模糊决策是决策过程中一种很有实用价值的数学工具。

以上这五个分支相互之间联系紧密，所涉及的领域之间往往互相重叠。例如，模糊识别过程中就涉及不确定性的相关理论和方法。

1.2 模糊不确定性建模理论及其应用发展历程

1965 年，美国加州大学伯克利分校电气工程系的 Zadeh 教授在《信息和控制》杂志上发表了一篇描述模糊集合理论的论文《模糊集合》^[4]。这篇开创性的论文把“模糊”作为一种数学概念引入科学领域，是创立模糊理论这个新学科的最著名的杰作，是模糊理论诞生的标志。目前，模糊理论已经成为一个包含了多种研究课题的广阔领域，并且在自动化控制、信号处理、人工智能和通信等领域都有广泛的应用。

1968 年，Zadeh 提出模糊算法的概念，对模糊理论进行完善。

1970 年，Bellman 和 Zadeh 提出模糊决策理论。

1971 年，Zadeh 提出模糊排序算法。

1973 年，Zadeh 建立模糊控制的基础理论，提出模糊 IF-THEN 规则。

1975 年，Mamdani 和 Assilian 创立了模糊控制器的基本框架，并将模糊控制器用于蒸汽机控制。

1978年, Holmblad 和 Ostergaard 为整个工业过程开发出第一个模糊控制器——模糊水泥窑控制器。

1978年,《模糊集与系统》(International Journal of Fuzzy Sets and System)杂志创刊。

1980年, Sugeno 开创了日本首次模糊应用——一家富士(Fuji)电子水净化工厂的控制系统。

1984年,第一个有关模糊逻辑的国际会议在夏威夷召开(第一届模糊信息处理国际会议),成立了国际模糊系统学会。

1992年,第一届IEEE模糊系统国际会议(IEEE International Conference on Fuzzy System, FUZZ-IEEE)召开。

1993年, IEEE 创办了国际性模糊逻辑专业杂志《模糊系统》(Fuzzy Systems)季刊。

另外, 2002年8月11日李洪兴教授领导的北京师范大学科研团队采用变论域自适应模糊控制理论成功实现了全球首例四级倒立摆实物系统控制。随后, 其领导的大连理工大学科研团队于2010年6月18日在世界上首次实现了空间四级倒立摆实物控制。

自20世纪90年代模糊理论在日本取得巨大成功以后, 很多曾对模糊理论持批评态度的欧美学者转变了观念, 给予模糊理论的发展以极大的重视。迄今为止, 模糊理论发展迅猛, 对模糊理论一些基本问题的研究已经取得了可喜的进步。

虽然传统的一型模糊理论和方法已经在自然科学和社会科学各领域的应用中取得了引人注目的成就, 但由于一型模糊集合本身在描述模糊不确定性方面的缺陷, 使得模糊方法与传统的经典方法相比并没有体现出明显的优势。二型模糊集合理论的提出有效地弥补了一型模糊集合的这一缺陷。由于二型模糊集合的隶属度函数是三维的, 它可以直接掌控和描述多重不确定性信息, 使其在处理复杂非线性问题上具有一定优势。针对一型模糊集其隶属度函数是确定的, 不具有柔性, 很难满足图像的多方面边缘检测要求, 及传统 PalKing 算法采用单一阈值对图像进行增强难以满足灰度变化丰富且含大量信息的彩色遥感图像处理的要求, 汪林林等^[5]提出了一种新的基于区间二型模糊集的彩色遥感图像边缘检测方法。实验结果表明, 它能较好地检测出彩色遥感图像边缘, 因此是一种实用有效的彩色遥感图像边缘检测方法。

另一方面, 问题的复杂性、不确定性以及人类思维的模糊性的不断涌现, 使得人们很难客观地对问题作出评判和决策。例如, “青年人”是一模糊概念, 人们很难在标志年龄的数轴上用一个数值来划分它, 然而在处理实际问题时, 人又总是习惯将青年人的年龄限制成一个区间, 以便给出划分和决策, 从而区间值数据建模理论应运而生, 并越来越多地应用于综合决策、气象分析、数字图像处理等领域。

1.3 本书的结构与章节安排

本书在深入研究模糊不确定性建模理论的基础上,力图通过引入区间思想,设计面向多光谱遥感影像土地覆盖分类的信息不确定性表达模型,以刻画遥感影像目标类内固有的不确定性,即同类目标像元灰度值在一定范围内变化的特性,从而从遥感影像特征信息表达源头抑制影像数据不确定性对分类的不利影响。进而在模糊分类理论框架下,构建合适的类别不确定性描述模型以刻画遥感影像类别间的高阶模糊不确定性,遥感影像某个像元可以属于多个类别也可以不属于任何类别,分类不应是一个非此即彼的硬划分过程,也不应是一个按照确定隶属度值的类别划分过程,而应是在对某个像元属于某个类别隶属度的不确定性建模基础上实施的模糊划分过程。同时寻求合适的具有多波段特点的影像特征区间相异性度量方法和解决二型模糊集的快速降型问题,探索高效、可靠的中高分辨率多光谱影像自动分类策略。

后续各章的具体安排如下:

第2章将全面阐述模糊理论,特别是二型模糊逻辑系统的特点及在分类中的应用及二型模糊集描述和控制遥感影像模糊属性的能力。

第3章将概述区间值数据模型及相关性质和相异性度量等区间值数据模糊建模理论。

第4章将介绍模糊不确定性经典算法,这是本书研究应用工作的重要基础。

第5章将描述本书应用研究目标遥感数据的不确定性及其分类识别的常规方法和主要不足。

第6章将基于原影像数据为观测样本均值的假设设计了以原影像数据为区间中值的区间值数据模型,并提出了一种区间最大相异性度量方法。在此基础上,引入自适应区间宽度伸缩因子,提出了自适应区间模糊C均值聚类算法。实验结果验证了模糊聚类方法明显优于经典的ISODATA算法,而基于区间值数据建模的自适应模糊聚类结果明显优于传统模糊C-均值聚类方法。

第7章将设计一种基于高分辨率影像对象(像斑)统计特征的区间模型,在此基础上提出一种多维区间最大相异性度量方法和面向对象的自适应模糊无监督分类方法,进而进行遥感影像的自动模糊分类,通过3组实验验证了算法的有效性和相比于原有面向对象无监督分类方法的优势。

第8章将基于模糊化参数的不确定性构建了面向遥感影像土地覆盖分类的二型模糊集,提出了二型模糊聚类的通用模型,在此基础上进行多组基于区间模糊C均值聚类的遥感影像自动分类实验,结果验证了二型模糊集刻画影像类间高阶模糊不确定性的优越能力,同时二型模糊分类算法可以获得比一型模糊C均值聚类算法更优的结果。

第 9 章将提出一种基于样本集模糊距离度量的区间二型模糊集构建方法，并提出一种基于自适应探求等价一型代表集的高效降型方法，在此基础上提出了自适应区间二型模糊聚类算法。分类结果优于第 8 章区间二型 FCM (KM-IT2FCM) 和已有文献提出的简易降型方法，且时间复杂度大大降低。

第 10 章将对本研究所探索提出的不确定性建模和模糊分类方法做出系统的比较、适应性评价和通过适当的模型扩展构建综合区间分类模型。

第一部分 模糊不确定性建模算法理论基础

模糊集的提出旨在描述观测样本间若即若离的模糊关系，即在分类时允许类别重叠，隶属度函数可变时即为二型模糊集，而区间值数据作为符号数据分析的重要研究内容，其本质在于刻画观测数据自身的可变性和不确定性。从遥感影像土地覆盖分类意义上看，两者可分别描述分类不确定性的两个方面：类间模糊不确定性和类内可变性。通过对影像模式集设计恰当的二型模糊集可以描述和控制类间混叠的模糊不确定性，而通过对影像数据构建合适的区间值信息表达模型可以刻画类内样本的可变性和不完整性。

另一方面，区间值数据和二型模糊集是非常规数据和集合，都迫切需要适宜的处理分析方法。其中距离度量是影响基于区间值数据模型的影像模糊分类结果的关键因素之一，在这一部分，我们也将对各种距离定义的适应度做比较和分析，这是本书第 6 章、第 7 章和第 10 章面向影像土地覆盖分类提出的区间值数据模型相异性度量定义的理论依据；而二型模糊系统应用到遥感影像土地覆盖分类中需要解决两个难点：二型模糊集的构建和降型，本书将在第 8 和第 9 章对此进行更深入的探讨和研究。

