

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 12  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年12月 第17卷 第12期(总第200期)

## 目次

### 综述

高斯混合模型、求解算法及视觉应用综述..... 管涛,李玲玲(1461)

### 图像处理和编码

基于曲波变换和色度模型的彩色图像去噪..... 张云强,张培林,王国德,卓洪波(1472)

子矢量排序的渐进不相似度逼近算法..... 李阳,潘志斌,吴鑫鹏(1478)

稀疏梯度先验模型的正则化图像复原..... 刘伟豪,梅林,蔡烜(1485)

高精度亚像素全局运动估计的上采样梯度互相关算法..... 余应淮,王锦荣(1492)

### 图像分析和识别

点到弦距离累加的自适应角点检测..... 王万良,金亦挺,赵燕伟,胡峰俊(1500)

最大子分类间隔准则的核函数优化..... 张静,杨智勇,于红芸,孙晓燕(1509)

核典型相关性鉴别分析..... 陈伟琦,程强(1516)

小波变换和特征加权融合的人脸识别..... 赵焕利,王玉德,张学志,薛乃玉(1522)

具有身份标识的多目标跟踪..... 安国成,肖坦(1528)

### 图像理解和计算机视觉

用于圆锥体位姿测量的曲面标记..... 李蒙,谌德荣,周广铭,蒋玉萍,高翔霄(1534)

## 计算机图形学

基于特征识别的3维人脸动画模型自动构造…………… 徐明, 乔宁博, 文振焜, 曾新, 采振祥(1540)

3D GIS 环境下雨雪天气实时仿真…………… 李欢, 樊红, 冯浩(1548)

## 医学图像处理

结合马尔可夫随机场与模糊 C-均值聚类的脑 MRI 图像分割…………… 余黎煌, 钟华, 张石(1554)

## 遥感图像处理

面向遥感影像镶嵌的 SVR 色彩一致性处理…………… 吴炜, 骆剑承, 李均力, 杨海平, 沈占锋(1561)

遥感影像投影寻踪回归分类模型…………… 张正健, 李祚泳, 秦宁生, 刘志红, 巴桑(1568)

《中国图象图形学报》2012 年第 17 卷总目次…………… (1)

志谢…………… 封2

# 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 12 期

2012 年 12 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-64807995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTXFZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 12 December 2012

## Contents

### Review

Overview of Gaussian mixture models, solving algorithms and visual applications ..... Guan Tao, Li Lingling(1461)

### Image Processing and Coding

Denoising method for color images based on chrominance model and curvelet transform  
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Wang Guode, Zhuo Hongbo(1472)

Improved incremental dissimilarity approximations algorithm using sub-vector sorting ..... Li Yang, Pan Zhibin, Wu Xinpeng(1478)

Regularized image restoration algorithm on sparse gradient prior model ..... Liu Weihao, Mei Lin, Cai Xuan(1485)

High accuracy sub-pixel global motion estimation based on upsampled gradient cross-correlation algorithm  
..... Yu Yinghuai, Wang Jinrong(1492)

### Image Analysis and Recognition

Adaptive corner detection based on chord-to-point distance accumulation  
..... Wang Wanliang, Jin Yiting, Zhao Yanwei, Hu Fengjun(1500)

Kernel optimization approach based on maximum subclass margin criterion  
..... Zhang Jing, Yang Zhiyong, Yu Hongyun, Sun Xiaoyan(1509)

Kernel discriminant analysis based on canonical correlation ..... Chen Weiqi, Cheng Qiang(1516)

Face recognition based on wavelet transform and weighted fusion of face features  
..... Zhao Huanli, Wang Yude, Zhang Xuezhi, Xue Naiyu(1522)

Multi-target tracking algorithms with identification label ..... An Guocheng, Xiao Tan(1528)

### Image Understanding and Computer Vision

Curved surface marker used for cone pose measurement  
..... Li Meng, Chen Derong, Zhou Guangming, Jiang Yuping, Gao Xiangxiao(1534)

### Computer Graphics

The approach to automatically construct animation models based on 3D facial geometry and texture features recognition  
..... Xu Ming, Qiao Ningbo, Wen Zhenkun, Zeng Xin, Cai Zhenxiang(1540)

Real-time snow and rain rendering in 3D GIS environment ..... Li Huan, Fan Hong, Feng Hao(1548)

### Medical Image Processing

Fuzzy C-means clustering algorithm combined with markov random field for brain MR image segmentation  
..... She Lihuang, Zhong Hua, Zhang Shi(1554)

### Remote Sensing Image Processing

Support vector regression color normalization method for image mosaic  
..... Wu Wei, Luo Jiancheng, Li Junli, Yang Haiping, Shen Zhanfeng(1561)

Remote sensing image classification model based on projection pursuit regression ..... Zhang Zhengjian, Li Zuoyong, Qin Ningsheng, Liu Zhihong, Ba Sang(1568)

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)12-1568-07

论文引用格式: 张正健, 李祚泳, 秦宁生, 刘志红, 巴桑. 遥感影像投影寻踪回归分类模型[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(12): 1568-1574.

## 遥感影像投影寻踪回归分类模型

张正健<sup>1</sup>, 李祚泳<sup>2</sup>, 秦宁生<sup>1</sup>, 刘志红<sup>2</sup>, 巴桑<sup>3</sup>

1. 四川省农业气象中心, 成都 610072;

2. 成都信息工程学院资源环境学院, 成都 610225;

3. 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850001

**摘要:** 将投影寻踪回归分析技术引入遥感影像分类中, 详尽叙述遥感影像投影寻踪回归分类模型的建立和实现过程。将广州地区的 TM 影像用于分类实验, 并用混合蛙跳算法来优化投影寻踪回归分类模型中的参数矩阵, 取得了较为理想的分类效果。此外, 还进一步分析了投影中心的设定、调整以及优化算法和岭函数个数对投影寻踪回归模型分类精度的影响。实验结果表明, 该模型易于优化实现, 稳定性强, 模型中岭函数的个数对投影寻踪回归模型分类精度没有显著影响。

**关键词:** 影像分类; 投影寻踪回归; 岭函数; 投影中心; 优化算法

## Remote sensing image classification model based on projection pursuit regression

Zhang Zhengjian<sup>1</sup>, Li Zuoyong<sup>2</sup>, Qin Ningsheng<sup>1</sup>, Liu Zhihong<sup>2</sup>, Ba Sang<sup>3</sup>

1. Agricultural Meteorology Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

3. Institute of Tibetan Plateau Atmosphere and Environmental Research, Lasa 850001, China

**Abstract:** We introduce the projection pursuit regression (PPR) analysis for remote sensing image classification and describe the implementation of the PPR model used in remote sensing image classification. Using a TM image of the Guangzhou area for our classification tests, we get satisfactory classification result, after optimizing the parameters in the projection pursuit regression model by shuffled frog leaping algorithm. Furthermore, we discuss the setting of the projection center as well as the influence of the optimal algorithms and the number of ridge functions on the classification accuracy in the PPR model. The results show that the model is easy to realize and very stable. The number of ridge functions in the projection pursuit regression model has no significant influence on the classification accuracy.

**Key words:** image classification; projection pursuit regression; ridge function; projection center; optimization algorithm

## 0 引言

对遥感影像进行分类是将遥感数据转化为便于使用的地理数据的核心手段之一<sup>[1]</sup>。遥感影像分

类的基础和根本条件是不同的地物对不同波段的电磁辐射具有不同的光谱响应。传统的影像分类方法主要包括最大似然法、最小距离法、平行算法、K-均值聚类法和 ISODATA 法等。此外, 近年来国内外学者也将一些智能化的数学方法用于遥感影像分类,

收稿日期: 2011-08-08; 修回日期: 2012-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179110, 50739002); 科技基础性工作专项基金项目(2011IM011000)

第一作者简介: 张正健(1986—), 男, 成都信息工程学院获环境科学专业硕士学位, 研究方向为遥感图像识别与处理、智能优化算法等。

E-mail: anuist@126.com

如 BP 神经网络、人工免疫网络、RBF 网络、支持向量机和决策树等智能分类算法<sup>[2-7]</sup>,丰富了遥感影像分类的手段。

投影寻踪(PP)是一种集主成分分析、特征提取和数据压缩为一体的综合分析技术。它具有稳健性、抗干扰性和准确度高等优点,尤其适于高维非正态、非线性数据的分析和处理<sup>[8]</sup>。PP 的关键之一是对模型中的参数矩阵作出准确的估计,传统的计算方法是由 Friedman 等人提出的多重平滑回归计算技术(SMART)<sup>[8]</sup>,该方法不仅计算过程繁琐,对参数矩阵的估算精度也有待提高。近年来已有人将智能仿生算法用于 PP 模型参数的优化<sup>[9]</sup>。自 PP 理论提出以来,已在环境科学<sup>[10]</sup>、农业科学<sup>[11]</sup>、水文学<sup>[12]</sup>等领域内得到有效而广泛的应用。不过 PP 在遥感影像分类中的研究却并不多见,文献[13]采用 PP 学习网络建立了一种遥感影像分类模型,并且采用最小二乘法来估计 PP 模型中的投影方向矩阵和权值矩阵,但存在优化效率不高的缺陷。为此,提出一种基于混合蛙跳算法(SFLA)优化的投影寻踪回归(PPR)分类模型,并探讨投影中心、优化算法和岭函数个数对模型分类精度的影响,将构建的模型用于广州地区 TM 影像的分类实验并取得满意的分类精度。

### 1 遥感影像投影寻踪回归分类模型的建立

PP 是用来处理和分析高维数据的一种探索性数据分析方法,其基本思想是<sup>[14]</sup>:利用计算技术,把高维数据通过某种组合,投影到低维(1~2 维)子空间上,寻找出能反映高维数据结构或特征的投影,并在低维空间上对数据结构进行分析,达到研究和分析高维数据的目的。PP 和回归分析相结合则形成投影寻踪回归分析技术。将遥感影像数据集  $\mathbf{x} = \{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p\}$  ( $n$  为像元总数,  $p$  为影像波段数)分为  $K$  个类别的 PPR 分类模型的建模过程如下:

#### 1) 影像数据归一化

为了消除不同数量级的影像数据对计算带来的影响,首先对原始影像进行归一化处理,即

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (1)$$

式中,  $x_{ij}$  表示第  $j$  个波段内第  $i$  个像元的灰度值,  $x_{ij}^*$

表示归一化后的像元值,  $x_{j\max}$  和  $x_{j\min}$  分别表示第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ) 个波段内原始像元的最大值和最小值。

#### 2) 构造综合投影值 $F$

记  $\mathbf{x}$  为  $p$  维随机变量,  $Y = F(\mathbf{x})$  是 1 维随机变量,为了避免线性回归不能反映实际非线性情况的矛盾,PPR 用  $M$  个岭函数  $G_m(Z_m)$  的“和”去逼近回归函数,即

$$F \approx \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(Z_m) = \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(\alpha_m \cdot \mathbf{x}) \quad (2)$$

式中,  $G_m(Z_m)$  为第  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) 个岭函数,  $Z_m = \alpha_m \cdot \mathbf{x} = \alpha_{m1}x_1 + \alpha_{m2}x_2 + \dots + \alpha_{mp}x_p$ , 为岭函数的自变量,它表示  $p$  维向量  $\mathbf{x}$  在  $\alpha_m$  方向上的投影;  $\alpha_m$  也是某方向的  $p$  维单位向量,  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)$  为 PPR 的投影方向矩阵,并满足单位向量条件

$$\sum_{j=1}^p \alpha_{mj}^2 = 1 \quad (3)$$

$M$  为岭函数的个数;  $\beta_m$  为第  $m$  个岭函数对  $F(\mathbf{x})$  贡献的权重系数,记  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M)$ , 则称  $\beta$  为 PPR 的权值矩阵。

事实上,式(2)所示的 PPR 模型可以展开为更加清晰直观的矩阵表示式,即

$$F \approx \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(\alpha_m \cdot \mathbf{x}) = (\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_M) \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1p} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \dots & \alpha_{Mp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix} \quad (4)$$

#### 3) 优化投影方向矩阵和权值矩阵

PPR 模型的关键和难点之一是选择式(2)中的最佳投影方向矩阵  $\alpha$ 、权值矩阵  $\beta$ 、岭函数  $G_m(Z_m)$  和岭函数最优个数  $M$  的适当组合,使模型对训练样本满足最小二乘表示的极小化准则

$$\min Q = \left[ F(\mathbf{x}) - \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(\alpha_m \cdot \mathbf{x}) \right] \quad (5)$$

#### 4) 分类识别

用步骤 3) 优化得出的最佳投影来计算训练样本集中各个类别的实际投影中心  $F_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ;  $K$  为类别总数)和整景影像各像元的综合投影值  $F_{ij}$ ,将  $F_{ij}$  与各个类别的投影中心  $F_k$  进行比较,将其归入最靠近的一个类别。

## 2 基于投影寻踪回归的遥感影像分类实验

### 2.1 遥感数据来源

分类实验所用的遥感影像为广州地区 2009 年 10 月的 TM 影像,分辨率为 30 m,影像大小为 400 像元  $\times$  400 像元,地物的分布较为破碎。参与分类实验的波段包括 TM 的第 2、3、4、5 通道,即数据维数  $p=4$ 。利用 Google Earth 并结合经验知识对影像进行较为准确的目视解译,分类实验将原始影像分为河流、耕地、城市绿地、养殖区、老城镇和新城镇 6 个类别。对每类地物目视选取的样本总数均为 500 个像元,在各类地物的样本中随机选取 100 个数据点作为优化 PPR 分类模型的投影方向矩阵和权值矩阵的训练样本,其余 400 个采样点作为分类影像精度检验的测试样本。

### 2.2 地物投影中心的设定和调整

由于 PPR 模型本质上是对高维数据的一系列多元线性回归之和,故从原始影像像元的灰度值到 PPR 模型的综合投影值可以看做是线性映射。因此可以根据各类地物在所有波段上的像元亮度值之和的大小来设定地物的投影中心。一般情况下,对于原始影像上综合亮度比较高的像元,其投影中心应设置为较大一些;而对于综合亮度较暗的像元,其投影中心应设置为稍小;且不同地物的投影中心应大致等间隔地均匀分布。此外,各类地物的投影中心初步设定好以后,还应根据优化算法得出的实际投影中心和优化目标函数值对设定投影中心进行适当的调整,使得二者较为接近为宜。经过对各类地物训练样本的统计分析和多次试算、调整,分类实验设定河流、养殖区、城市绿地、老城镇、耕地、新城镇 6 类地物的投影中心等如表 1 所示。

表 1 各类地物的投影中心  $F_{k0}$ 、实际投影中心  $F_k$  和分类区间  $F_k'$

Table 1 Setting class center values  $F_{k0}$ , fitting class center values  $F_k$  and classified standards values  $F_k'$

	河流	养殖区	城市绿地	老城镇	耕地	新城镇
设定投影中心 $F_{k0}$	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8
实际投影中心 $F_k$	0.125 6	0.176 8	0.390 8	0.474 4	0.556 0	0.794 2
实际分类区间 $F_k'$	$\leq 0.151 2$	$(0.151 2, 0.283 8]$	$(0.283 8, 0.432 6]$	$(0.432 6, 0.515 2]$	$(0.515 2, 0.675 1]$	$> 0.675 1$

### 2.3 遥感影像投影寻踪回归分类模型参数的优化

#### 2.3.1 混合蛙跳算法

为了更好地优化得到 PPR 模型中的投影方向矩阵  $\alpha$  和权值矩阵  $\beta$ ,采用由 Eusuff 等人提出的混合蛙跳算法。该算法是一种新的基于全局协同搜索的智能仿生优化算法,它结合了文化基因算法 (AM) 和粒子群优化 (PSO) 算法两者的优点,具有概念简单、运算速度快、不易陷入局部极值和易于编程实现等特点<sup>[15]</sup>。其基本思想是:模拟青蛙群体寻找食物时,按族群分类传递信息的过程,将全局的信息交换和局域搜索相结合;同一族群中的局域搜索实现局域中个体间的信息传递,而混合策略则使局域间的信息得以交换,通过不停地局部深度搜索与交叉混合最终寻找到全局最优解, SFLA 算法的具体实现过程详见文献[16]。

#### 2.3.2 优化目标函数及参数优化

在确定 PPR 具体的模型形式(岭函数的个数)

和设定各个地物类别的投影中心之后,可以利用混合蛙跳算法对式(4)中的最佳投影方向矩阵  $\alpha$  和权值矩阵  $\beta$  进行优化,为此需建立优化目标函数

$$\min Q(\alpha, \beta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \left( \frac{1}{D} \sum_{l=1}^D F_{kl} \right) - F_{k0} \right]^2 \quad (6)$$

式中,  $K$  为影像分类类别数 ( $K=6$ );  $D$  为每个类别的训练样本数 ( $D=100$ );  $F_{kl}$  为由式(4)计算得到的第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) 类地物第  $l$  ( $l=1, 2, \dots, D$ ) 个训练样本点的综合投影值;  $F_{k0}$  为设定的第  $k$  类地物的投影中心,根据 6 种地物在遥感影像上的综合亮度值设定的投影中心如表 1 所示。构建目标函数式(6)的依据是每类地物样本的 PPR 综合投影值的均值与设定的该类地物投影中心间的欧氏距离最小。矩阵元素  $\alpha_{uv}$  ( $u=1, \dots, M; v=1, \dots, p$ ) 的取值范围设定为  $\alpha_{uv} \in [-1, 1]$ , 且满足  $\alpha_{u1}^2 + \dots + \alpha_{up}^2 = 1$ ;  $\beta_u$  的取值范围设定为  $\beta_u \in [-5, 5]$ 。

为了优化 PPR 模型式(4)中的参数,将各类地物的 100 个训练样本用式(1)归一化后代入式(4),并在满足优化目标函数式(6)的条件下,用 C++ 编写的 SFLA 算法对 PPR 模型的最佳投影方向矩阵  $\alpha$  和权值矩阵  $\beta$  反复迭代优化。算法的终止条件是运行次数达到设定的最大迭代次数  $T_m$  或者优化目

标函数值达到满意的精度  $Q_{\min}$ 。优化过程中,SFLA 的参数设置如表 2 所示。当程序达到设定的最大迭代次数  $T_m$  时, $\min Q(\alpha, \beta) = 0.00065 < 0.001$ ,停止迭代。得到优化好的 PPR 模型的最佳投影方向矩阵  $\alpha$  和权值矩阵  $\beta$ ,将其代入式(4)即可得到最终的 PPR 模型表达式。

表 2 SFLA 的参数设置  
Table 2 Setting parameters of SFLA

解群体规模 $P$	族群数 $R$	族群内青蛙数 $N$	族群内最大更新次数 $n$	混合迭代次数 $T_m$	随机移动最大步长 $d_{\max}$	设定的最小目标值 $Q_{\min}$
200	20	10	10	400	0.2	0.001

### 2.4 遥感影像投影寻踪回归分类过程

在优化得到确定的并且具有一定精度的 PPR 模型后,可以对整幅遥感影像进行分类处理。首先要计算得出不同地物类别的实际投影中心  $F_k$ ,将河流、养殖区、城市绿地、老城镇、耕地和新城镇每一类地物的 100 个训练样本的归一化值代入优化好的 PPR 模型表达式中,计算得到训练样本中不同地物类别的综合投影值,取每一类地物的 100 个训练样本的平均综合投影值作为该类地物的实际投影中心  $F_k$ ,亦如表 1 所示。从表 1 中设定投影中心和实际投影中心之间的距离可以看出混合蛙跳算法取得了比较理想的优化效果,各类地物样本的平均综合投影值与设定的投影中心均非常接近。由于遥感影像同种地物也具有不完全一致的光谱特性,因此在实际分类过程中,取相邻两类地物实际投影中心的算术平均值作为不同地物的分类区间  $F'_k$ ,也如表 1 所示。

确定好各类地物的分类区间  $F'_k$ 之后,首先对整个实验区的遥感影像用式(1)进行归一化处理,进而计算得到实验影像每个像元的综合投影值  $F_{ij}$ 。再根据表 1 中  $F_{ij}$ 的大小与类别之间的对应关系对如图 1 所示整个实验区影像(TM432 假彩色合成)进行分类,分类结果如图 2 所示。

### 2.5 结果分析

PPR 分类影像的误差矩阵如表 3 所示,其中总体分类精度和 Kappa 系数分别为 89.75% 和 0.877 0。结合分类影像(图 2)和误差矩阵(表 3)可以看出,PPR 模型对 TM 实验影像取得了较为理想的分类效果,能够有效地识别河流、养殖区、城市绿地、老城镇、耕地和新城镇等各类地物。但也在一定程度上存在



图 1 原始遥感影像  
Fig. 1 Original RS image



图 2 PPR 分类影像  
Fig. 2 Image classified by PPR

错分和误分的现象,如河流和养殖区、耕地和城市绿地、老城镇和新城镇等光谱特征相似的地物之间。其

中,被陆地包围的颜色较深的河流被误分为养殖区的概率较大,而颜色较浅的离河流较近的养殖区也容易被错分为河流。城市绿地在原始影像中为暗红色,其容易与长势较好的耕地发生混淆。老城镇在 TM432 合成影像中略显灰色,而新城镇的光谱则具有明显的

亮色调,二者容易发生混淆的地区多为新旧城区的结合处以及使用年限介于二者之间的建筑物。对于影像中没有被定义的养殖区边界和道路等线性地物,其被分为养殖区和老城镇的概率较大。综合而言,将 PPR 用于遥感影像分类是切实可行的。

表 3 分类误差矩阵  
Table 3 Classified error matrix

分类影像	参考影像						总计	用户精度/%
	河流	养殖区	城市绿地	老城镇	耕地	新城镇		
河流	333	62	0	0	0	0	395	84.30
养殖区	67	337	0	10	0	0	414	81.40
城市绿地	0	0	378	0	27	0	405	93.33
老城镇	0	1	0	363	0	30	394	92.13
耕地	0	0	22	1	373	0	396	94.19
新城镇	0	0	0	26	0	370	396	93.43
总计	400	400	400	400	400	400	2 400	
制图精度/%	83.25	84.25	94.50	90.75	93.25	92.50		

### 3 遥感影像投影寻踪回归分类模型影响因素分析

为了进一步分析优化算法和岭函数个数对 PPR 模型分类精度的影响,以成都市的 SPOT 影像分类为例,分别采用不同智能算法优化和含有不同岭函数个数的 PPR 模型对实验影像进行分类,并对分类结果进行比较与分析。通过目视解译,将 SPOT 影像分为水体、农田、道路和房屋 4 个类别。对每类地物同样选取 500 个样点作为 PPR 分类的训练样本和测试样本(其中 100 个样本用于训练,其余 400 个样本用于测试)。

#### 3.1 优化算法对分类精度的影响

在模型形式(都选用含有 3 个岭函数的 PPR 模

型)、设定投影中心、训练样本、测试样本及优化目标函数均完全一致的情况下,分别用常用的粒子群算法(PSO)、免疫进化算法(IEA)、人工鱼群算法(AF)、猴王遗传算法(MKGA)和混合蛙跳算法(SFLA)对 PPR 模型中的最佳投影方向矩阵  $\alpha$  和权值矩阵  $\beta$  进行反复优化,各种优化算法的最大迭代次数、优化最小目标函数值  $\min Q(\alpha, \beta)$  以及优化得出的 PPR 模型的总体分类精度和 Kappa 系数如表 4 所示。可以看出,在 PPR 模型形式和设定投影中心均一致条件下,采用多种智能算法优化得出的最小目标函数值、PPR 模型的总体分类精度和 Kappa 系数相差均不大,从而表明 PPR 分类模型具有易于优化实现和稳定性较高的特点;同时,也表明论文在分类实例中选用 SFLA 算法来对 PPR 模型的参数矩阵进行优化是合理的。

表 4 不同算法优化效果及分类精度的比较

Table 4 Comparisons on optimized effect and classification accuracy in different algorithms

统计项目	SFLA	IEA	AF	MKGA	PSO
最大迭代次数	400	400	400	400	400
$\min Q(\alpha, \beta)$	0.000 015	0.000 017	0.000 016	0.000 015	0.000 016
总体分类精度/%	95.00	94.63	95.06	94.81	94.88
Kappa 系数	0.933 3	0.928 3	0.934 2	0.930 8	0.931 7

### 3.2 岭函数个数对分类精度的影响

进一步分析岭函数个数  $M$  对 PPR 模型的拟合效果和分类精度的影响,同样以成都市的 SPOT 影像分类为例,在训练样本、测试样本保持一致且优化目标函数均为式(6)所示形式的条件下,分别用混合蛙跳算法对含有  $h$  ( $h = 2, 3, \dots, 8$ ) 个岭函数的

PPR 模型进行优化并对实验影像进行分类。含有  $h$  个岭函数的 PPR 分类模型的最小优化目标函数值、总体分类精度和 Kappa 系数如表 5 所示。优化过程中对含有不同岭函数个数的 PPR 模型设定的投影中心均保持一致,混合蛙跳算法的参数设置亦如表 2 所示。

表 5 包含  $h$  个岭函数的 PPR 模型分类结果的比较  
Table 5 Comparisons on classified results of PPR model with  $h$  ridge functions

统计项目	PPR 模型中的岭函数个数 $h$						
	$h = 2$	$h = 3$	$h = 4$	$h = 5$	$h = 6$	$h = 7$	$h = 8$
$\min Q(\alpha, \beta)$	0.000 016	0.000 015	0.000 015	0.000 015	0.000 016	0.000 016	0.000 017
总体分类精度/%	94.94	95.00	94.88	94.75	94.69	94.75	94.69
Kappa 系数	0.932 5	0.933 3	0.931 7	0.930 0	0.929 2	0.930 0	0.929 2

从表 5 可以看出,随着 PPR 模型中岭函数个数  $h$  的增加,用混合蛙跳算法优化得出的最小目标函数值  $\min Q(\alpha, \beta)$  并无明显的变化;同时,PPR 模型的总体分类精度和 Kappa 系数呈缓慢递减的趋势,但总体相差不大。从而可以认为 PPR 模型中岭函数的个数对模型分类精度没有显著的影响,表明 PPR 模型具有较高的稳定性和适应能力。

## 4 结 论

遥感影像 PPR 分类模型保留了能够反映不同地物类型结构差异的信息,在低维特征空间内对像元类别进行划分具有原理清晰、易于实现等优点。TM 影像分类结果表明将 PPR 用于遥感影像分类能够取得较好的识别和分类效果。通过 SPOT 影像分类实验还表明 PPR 分类模型中岭函数个数对优化效果和总体分类精度没有显著的影响,因而模型中岭函数的个数不宜太多;一般情况下,选取 2~4 个岭函数即可。同时采用多种优化算法优化得出的 PPR 模型分类精度亦十分接近,表明 PPR 回归分类模型具有较强的稳定性和适应能力。

将 PPR 用于遥感影像分类的一个难点是当影像维数过高时,需要优化确定的参数矩阵  $\alpha$  和  $\beta$  会变得庞大,从而影响矩阵优化求解的效率和模型的精度。此时可以考虑先对原始影像进行主成分分析将提取出的信息量最大的前几个主成分用于 PPR 的建模和分类,从而使参数矩阵  $\alpha$  和  $\beta$  的优化求解变得容易。

## 参考文献 (References)

- [1] Wilkinsom G G. Results and implications of a study of fifteen years of satellite image classification experiments [J]. IEEE T Geosci Remote Sens, 2005, 43(3):433-440.
- [2] Liu X P, Li X, Peng X J, et al. A remote sensing image classification method based on biological swarm intelligence optimization [J]. Sci China Ser D:Earth Sci, 2007, 37(10):1400-1408. [刘小平,黎夏,彭晓鹏,等.一种基于生物群集智能优化的遥感分类方法[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(10):1400-1408.]
- [3] Hu J C, Wu G P. BP neural network based on principle component analysis in multi-spectral remote sensing images classification [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(3):137-139. [胡剑策,吴国平.基于 K-L 变换的 BP 神经网络遥感图像分类[J].测绘科学,2009,34(3):137-139.]
- [4] Wan L H, Zhang S C, Liu W Y, et al. A RBF classification method of remote sensing image based on genetic algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2006, 13(6):711-714.
- [5] Tan K, Du P J. Hyperspectral remote sensing image classification based on support vector machine [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2008, 27(2):123-128. [谭琨,杜培军.基于支持向量机的高光谱遥感图像分类[J].红外与毫米波学报,2008,27(2):123-128.]
- [6] Yuan L S, Du P J, Zhang H P, et al. CBERS imagery classification based on decision tree and performance analysis [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, (2):92-97. [袁林山,杜培军,张华鹏,等.基于决策树的 CBERS 遥感影像分类及分析评价[J].国土资源遥感,2008,(2):92-97.]
- [7] Luo J C, Zheng J, Pei T, et al. An elliptical basis function net-

- work for classification of remote sensing image [J]. *Journal of image and Graphics*, 2005, 10(6):698-704. [骆剑承, 郑江, 裴韬, 等. 基于EM-EBF模型的遥感影像分类方法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(6):698-704.]
- [8] Friedman J H, Stuetzle W. Projection pursuit regression [J]. *Jour. Amer. Statist. Assoc.*, 1981, 76:817-823.
- [9] Li J, Li S Y, Lin G S. Resource and environment performance assessment and analysis for Guangdong province based on project pursuit method [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2011, 24(1):14-17. [李娟, 李适宇, 林高松. 基于投影寻踪的广东省资源环境绩效评估与分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2011, 24(1):14-17.]
- [10] Li Y C, Zhou S J. Comprehensive assessment of marine ecological indexes based on improved projection pursuit method [J]. *Acta Ecologic Sinica*, 2009, 29(10):5736-5740. [李彦苍, 周书敬. 基于改进投影寻踪的海洋生态环境综合评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(10):5736-5740.]
- [11] Wang B, Zhang Z Y, Wei Y X, et al. Assessment of agricultural basic drought based on projection pursuit [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4):157-162. [王斌, 张展羽, 魏永霞, 等. 基于投影寻踪的农业基本旱情评估[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4):157-162.]
- [12] Chen Y, Ding J, Zhao Y H. Assessment on flood disaster in Sichuan province based on the principle of projection pursuit method [J]. *Shuili Xuebao*, 2010, 41(2):220-225. [陈曜, 丁晶, 赵永红. 基于投影寻踪原理的四川省洪灾评估[J]. *水利学报*, 2010, 41(2):220-225.]
- [13] Yan Y, Li Q Q, Sun J Y. Classification of RS image using projection pursuit learning network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10):876-879. [严勇, 李清泉, 孙久运. 投影寻踪学习网络的遥感影像分类[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2007, 32(10):876-879.]
- [14] Li Z Y, Wang J Y, Jin X C, et al. Evolution algorithm based forecasting model for lake eutrophication using PPR [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(2):1-8. [李祚泳, 汪嘉杨, 金相灿, 等. 基于进化算法的湖泊富营养化投影寻踪回归预测模型[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2007, 39(2):1-8.]
- [15] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of water distribution network design using shuffled frog leaping algorithm [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3):210-225.
- [16] Zhao P J, Liu S Y. Shuffled frog leaping algorithm for solving complex functions [J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(7):2435-2437. [赵鹏军, 刘三阳. 求解复杂函数优化问题的混合蛙跳算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(7):2435-2437.]