doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.019

基于 SVM 的灌区无人机影像渠系提取

张宏鸣[1]　任　强[1]　韩文霆[2]　杨江涛[3]　杨勤科[4]　张　炯[5]

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北大学城市与环境学院, 西安 710069;
5. 南加州大学神经影像学和信息学研究所, 洛杉矶 CA 90033)

摘要: 灌区渠系制图配合现代节水灌溉技术,对合理配水、安全输水有着重大影响。但目前普遍使用的灌区遥感影像分辨率不高,给渠系提取与制图带来一定的困难。本文将无人机采集的高精度正射影像、高程、坡度数据相结合作为数据源,提取出具有显著描述能力的渠系特征来构建训练样本集,基于支持向量机的分类方法对目标渠系进行分割提取,再通过后处理对提取结果进行去噪、连接和优化,实现了无人机高分辨率多数据源的渠系提取。结果表明,该渠系提取方法可以识别提取灌区中的支渠、斗渠和部分农渠,渠系连续性良好,与手绘渠系对比,精度最高可达 89.35%。其中提取误差主要由级别较低的渠系中渠床淤泥沉积导致影像、地形特征不明显造成。

关键词: 渠系提取; 支持向量机; 断线连接; 多源数据; 超像素分割

中图分类号: S157; TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)02-0141-08

Extraction of Irrigation Networks of UAV Orthophotos Based on SVM Classification Method

ZHANG Hongming[1]　REN Qiang[1]　HAN Wenting[2]　YANG Jiangtao[3]　YANG Qinke[4]　ZHANG Jiong[5]

(1. *College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
4. *College of Urban and Envionmental Science, Northwest University, Xi'an* 710069, *China*
5. *Institute of Neuroimaging and Informatics, University of Southern California, Los Angeles CA* 90033, *USA*)

Abstract: Irrigation district canal system with modern water-saving irrigation technology has a significant impact on rational distribution of water and the safety of water supply. However, the resolution of the commonly used remote sensing image of irrigation area is not high, which brings difficulties to the extraction and mapping of the drainage system. The high-precision ortho-image, elevation and slope data collected by UAVs were taken together as data sources. Features with strong canal discriminative ability were obtained from them to construct a training set. The classification system was trained via the support vector machine to segment canals from images. Then, the extraction results were denoised, connected and optimized, and the canal extraction of UAV high resolution multi-source data was realized. The results showed that the canal extraction method can identify the branch canal in the irrigation area. Meanwhile, competitive performance was achieved in the continuity of the canal, the bucket and the part of canal system. The precision was up to 89.35%. The extraction error was mainly caused by the deposition of canopy mud in the lower canal system which made the terrain features not easy to be recognized. In conclusion, the method proposed provided a new solution for the extraction of irrigation and drainage canal and can be applied to the actual agricultural production.

Key words: canal extraction; support vector machine; canal connection; multi-source data; super pixel division

收稿日期: 2017-11-12　修回日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771315、41301283、41371274)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)和欧盟地平线 2020 研究与创新计划项目(GA:635750)

作者简介: 张宏鸣(1979—),男,副教授,博士,主要从事空间大数据管理与区域土壤侵蚀评价研究,E-mail: zhm@nwsuaf.edu.cn

0 引言

渠系作为最常见的输配水工程设施,根据形成原因,可分为人工渠系和自然渠系。针对不同渠系,采用的提取方法也不尽相同[1]。针对自然渠系,研究者提出从数字高程模型(Digital elevation model, DEM)中提取自然渠系轮廓[2],提取方法主要包括移动窗口算法[3]和全局法。

灌区灌排渠系属于人工渠系,呈线状分布,多为人为有计划的挖掘[4]。针对线状地物,如道路的提取已有大量研究,SAATI 等[5]采用 Network Snake 模型实现道路提取。但灌区渠系与农田道路交叉分布,该类方法较难对二者进行有效区分。传统分类方法多使用单一 DEM 作为数据源[6],如 RAPINEL 等[7]采用面向对象的分析方法提取灌区渠系,但水体、植被的存在对结果影响较大。CAZORZI 等[8]利用平滑后的 DEM 与原始 DEM 得到相对地形模型,设置一定阈值来获取渠系轮廓信息,但该方法会产生额外的地形冗余信息。SAH 等[9]基于 DEM 提出了一种通过汇流累积提取渠道轮廓的方法,所得到的原始水系序列对应的栅格数据(Raw stream order raster, RSOR)比使用常规的阈值法更接近真实地貌,但渠系连续性较差。SCHWANGHART 等[10]根据水文原理,使得 DEM 边缘的排水连通性得到保障,但结果中仍存在一定的误差。BROERSON 等[11]基于原始点云数据对平面和工程景观中的水道进行分类,进而识别水道。而该方法有效性受限于研究区的地表特征(如植被覆盖)。韩文霆等[12]使用基于面向对象的特征组合分类分层方法提取灌区渠系,该方法提取结果中易出现中断及无法区分农田道路等问题。张宏鸣等[13]基于 DEM 采用改进的霍夫变换方法对灌区渠系进行提取,并且在特征较为明显的大范围区域取得了良好的渠系网络提取效果,但受数据源和噪声点的影响,提取精度有限。前人研究过程常使用 DEM 或地形特征方法,数据源单一,方法较为传统,自动化程度低。

随着人工智能的发展,使通过机器学习的方法进行训练从而获得高精度分类成为可能。近年,基于支持向量机(Support vector machines, SVM)的分类检测方法在特征提取和目标识别等方面得到了广泛的应用[14-15]。农田沟渠与线状道路具有一定的相似性,均属于线状延伸结构。因此,本文尝试采用基于 SVM 的分类检测算法进行灌排渠系的识别提取。

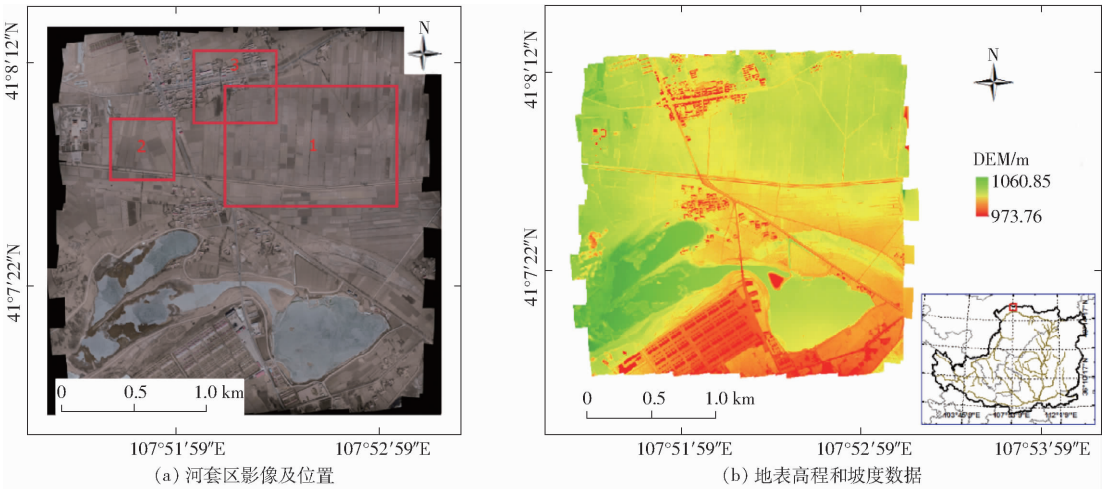
本文在前期研究的基础上[13,16],避免使用单一数据源所带来的缺点,将无人机正射影像、DEM 及坡度信息相结合来构建训练数据,基于 SVM 训练分类得到渠系和非渠系结果,并采用连通区域法和凸包化方法优化结果,最后进行噪点剔除和渠系断线连接。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究区位于内蒙古自治区西部临河区海丰县,黄土高原北部,属黄河上游的河套灌区,地面开阔平坦,灌区内灌排系统纵横。年平均降水量 155 mm,因降水量低,使得灌区灌溉占主导地位,每年约有 5.2×10^9 m^3 黄河水灌溉农田[17]。为减小实验区地表覆盖物的影响,本研究使用 AF1000 型无人机于 2016 年 3 月份对河套灌区(图 1a)冻土期进行数据采集,使用 AgisoftPhotoscan 软件生成分辨率为 0.25 m 的地表高程数据和坡度数据(图 1b)。

为验证本文方法的准确性和适用性,从研究区中选取土地利用情况不同的 3 块区域。实验区 1 约为 67.9 万 m^2(图 2a),该区域中 Y 型支渠特征明

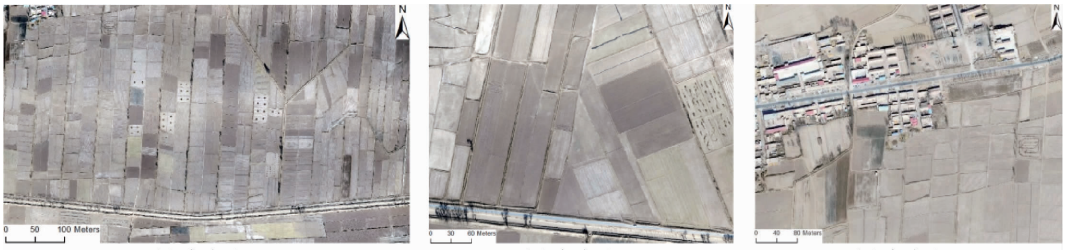


(a) 河套区影像及位置 (b) 地表高程和坡度数据

图 1 研究区域影像及实验区位置、高程

Fig. 1 DOM and DEM data of study area

显，田坎、田间小路等同谱异物的干扰较少，通过该区域来检验环境条件良好情况下本文方法提取渠系的准确性。实验区 2 截取约 12.8 万 m^2（图 2b），该区域中包含沥青道路和田间土路，沥青道路从影像信息上看与渠系差异很大，且树木和阴影较多，道路部分被遮挡，而田间小路的影像、高程、坡度等信息与渠系差异不大，由同谱异物现象所带来的干扰较为严重。实验区 3 约为 27.7 万 m^2（图 2c），该实验区域存在大面积的房屋干扰，渠道、田坎、田间小路分布杂乱，同时田间存在多处秸秆焚烧后的残留物，对影像信息也造成一定影响。可通过该区域验证本文方法在复杂环境下的适用性。



(a) 实验区1　　(b) 实验区2　　(c) 实验区3

图 2　各实验区域影像

Fig. 2　Images of each experiment area

1.2　原理与方法

基于单一数据源的渠系提取效果一般[13]，因此本文将无人机正射影像、DEM 及派生的坡度数据，存储成三维矩阵，通过比对，在 3 组数据上得到可信的训练样本点（人工选点），并使用 SVM 进行分类，其中多核基于超像素图像分割（Superpixels-based classficationvia mutilplekernels，SC－MK）算法为 SVM 提供核函数，用连通区域法和凸包化方法剔除噪声并进行断点连接，利用中轴线算法提取渠系中心线。算法流程如图 3 所示。

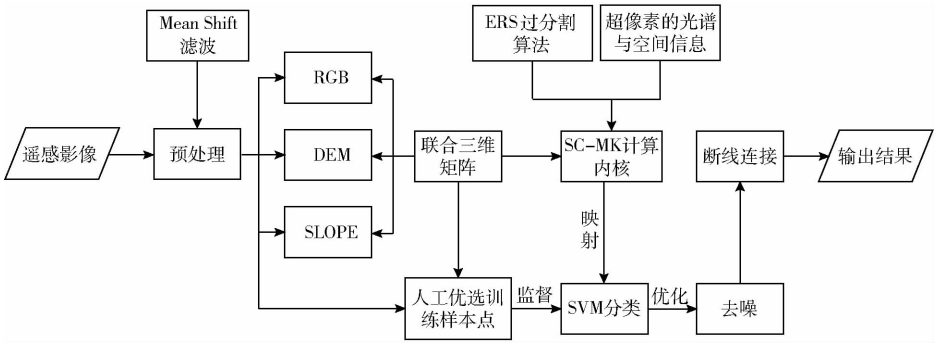


图 3　本文方法的处理流程图

Fig. 3　Flow chart of proposed method

1.2.1　SVM 算法提取渠系

数据、训练样本和核函数是决定分类结果准确性的关键因素[18]，因此基于 SVM 的渠系提取可分为 3 个步骤：

（1）影像预处理

对遥感图像进行 Mean Shift 滤波处理，计算像素点的概率密度，以合并相似的影像特征，在不损失目标信息的前提下，抑制图像噪声[19]。

以 x 为圆心，以 h 为半径，落在球内的点为 x_i 点的概率密度为

$$K_{h_s,h_r}(x)=\frac{C}{h_s^2h_r^2}K\left(\left\|\frac{x^s-x_i^s}{h_s}\right\|^2\right)K\left(\left\|\frac{x^r-x_i^r}{h_r}\right\|^2\right) \tag{1}$$

式中　s——空间域　　r——颜色域

C——概率常数

h_s——空间域下的半径

x^r——颜色域下的 x 像素点

x_i^s——空间域下的 x 像素点位

h_r——颜色域下的半径

x_i^r——颜色域下的 x 像素点位

x^s——空间域下的 x 像素点

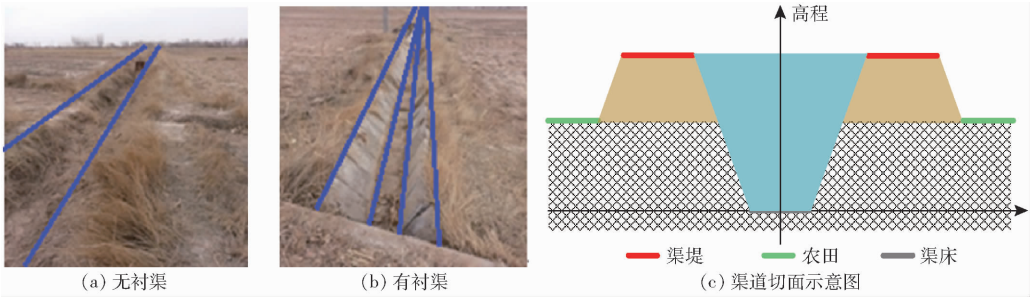
$K\left(\left\|\frac{x^s-x_i^s}{h_s}\right\|^2\right)$——空间位置信息

$K\left(\left\|\frac{x^r-x_i^r}{h_r}\right\|^2\right)$——颜色信息

半径越大，越多的图像细节就会被忽略[23]。选取半径 h 为 15，后期实验分类效果较好。

（2）训练样本选取

正射影像上，渠床与农田颜色较接近；高程上，渠床略低；坡度上，渠床与农田均趋于平缓。而渠堤在高程和坡度特征上与农田区域差异较大。研究区渠系可分为无衬渠系（图 4a）和有衬渠系（图 4b）两



(a) 无衬渠 (b) 有衬渠 (c) 渠道切面示意图

图 4 渠道切面示意图及实地勘察图

Fig. 4 Schematic view of channel section and field survey maps

种,高程、坡度和渠系实地勘察图(蓝色线条)如图 4 所示,结合这些特点,实验过程中将渠堤和渠床同时作为目标取样点。

在监督分类之前,需采集足量的负样本点(非渠系样本点),实验采取等距采样法[20],采样距离视图像大小而定。但候选样本点存在落于渠系的可能,因此根据渠堤和渠床相比农田、道路会发生高程骤变的特点,去除高程变化较大的候选样本点,筛选出较为真实的负样本点,尽可能地降低对分类过程的不利影响。

(3)SC - MK 算法生成核函数

SVM 中采用传统的核函数在分类结果上表现出较多的干扰因素[21]。为了进一步提升分类效果,研究工作者试图将光谱与空间信息结合起来作为分类依据,SC - MK 就是诸多研究工作的一种有效方法。本研究将正射影像、DEM、坡度 3 种数据结合形成的多维数据作为数据源。SC - MK 算法主要分为 3 个步骤[22]:

(1)过分割(Entropy rate superpixel, ERS)。算法先对原始图像进行预处理,包括随机遍历图像并生成熵率以及平衡过程 2 部分。熵率倾向于生成紧密且均匀的簇类,同时平衡函数会促使每个簇类的尺寸趋于一致[23]。采用该算法高效准确地对原始图像进行过分割,为 SC - MK 算法的进行提供了条件。

(2)生成超像素。超像素的生成需要先求出超像素数目 L,这取决于地形区域复杂程度,区域越复杂等待识别的单元格就越多。用 R 表示目标像素占总像素的比例,L_{base} 表示超像素的预设值,则超像素个数 L 为

$$L = L_{base}R \tag{2}$$

根据超像素个数 L,调用 ERS 算法,将原有的高分辨率图像分割生成 L 个超像素。

(3)生成特征信息图像。分割生成超像素后,需用矩阵 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 来描述第 i 个超像素,才能生成特征信息图像,包括光谱信息图像 I_{Spec}、均值信息图像 I_{Mean}、加权均值图像 I_{Weigh}。它们是计算内核的必要保障。

光谱信息图像 I_{Spec} 用于描述超像素图像中原始的光谱特征信息,由全部光谱像素 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 构成。设 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 中共有 z 个像素,$\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 表示为

$$\boldsymbol{Y}_{SP_i} = [y_{1_i} \quad y_{2_i} \quad \cdots \quad y_{z_i}] \tag{3}$$

均值特征图像 I_{Mean} 的生成需要先根据 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 计算每一个超像素中光谱信息的平均值 y_{Mean_i},然后将 y_{Mean_i} 的值赋给 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 中的所有像素。新的均值特征图像 I_{Mean} 可以减少图像中的干扰信息。

加权均值特征图像 I_{Weigh} 由每个超像素 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 及其相邻的超像素进行平均加权计算得到。若 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 共有 J 个邻接超像素,$\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 的邻接超像素为

$$\boldsymbol{Y}_{SP_{i,j}} = [Y_{SP_{i,1}} \quad Y_{SP_{i,2}} \quad \cdots \quad Y_{SP_{i,J}}] \tag{4}$$

某一超像素光谱加权均值信息 y_{WA_i} 的计算,需要其所有邻接超像素光谱均值信息 $y_{Mean_{i,j}}$。光谱加权均值信息 y_{WA_i} 的计算公式为

$$y_{WA_i} = \sum_{j=1}^{J} w_{i,J} y_{Mean_{i,j}} \tag{5}$$

其中

$$w_{i,j} = \mathrm{e}^{(-\|y_{Mean_{i,j}} - y_{Mean_i}\|_2^2)/h} \tag{6}$$

式中 $w_{i,j}$——邻接超像素的权值

h——一个预设的标量

将 y_{WA_i} 的值赋给超像素 $\boldsymbol{Y}_{SP_i}$ 中的每一个像素,将赋值后的超像素集合生成加权均值特征图像 I_{Weigh}。

内核的生成需要特征信息图像结合训练样本得到各自对应的特征训练集合作为基础,具体过程是将选取出的训练样本点组合成训练集合($y_1, y_2, \cdots, y_N$)。根据训练集合中的像素点对应坐标索引,找出光谱信息图像 I_{Spec}、均值信息图像 I_{Mean}、加权均值图像 I_{Weigh} 中对应的像素点,生成光谱信息训练集合($y_{Spec,Train_1}, y_{Spec,Train_2}, \cdots, y_{Spec,Train_N}$)、均值特征训练集合($y_{Mean,Train_1}, y_{Mean,Train_2}, \cdots, y_{Mean,Train_N}$)、加权均值训练集合($y_{Weigh,Train_1}, y_{Weigh,Train_2}, \cdots, y_{Weigh,Train_N}$)。根据 3 个训练集合,分别生成 3 个内核,计算公式为

$$\begin{cases} K_{Spec}(y_{Spec,Train_i},\cdots,y_{Spec,Train_j}) = \\ \quad e^{-\|y_{Spec,Train_i}-y_{Spec,Train_j}\|^2/(2\sigma^2)} \\ K_{IntraS}(y_{IntarS,Train_i},\cdots,y_{IntarS,Train_j}) = \\ \quad e^{-\|y_{Mean,Train_i}-y_{Mean,Train_j}\|^2/(2\sigma^2)} \\ K_{InterS}(y_{InterS,Train_i},\cdots,y_{InterS,Train_j}) = \\ \quad e^{-\|y_{Weigh,Train_i}-y_{Weigh,Train_j}\|^2/(2\sigma^2)} \end{cases} \tag{7}$$

其中 σ 为函数的宽度参数，控制函数的径向作用范围。

根据生成的 3 个内核 K_{Spec}、K_{IntraS}、K_{InterS}，联合 3 个内核采用加权平均值法计算出一个统一的内核，作为 SVM 最终的分类依据，计算公式为

$$K_{ComSup}(y_i,y_j) = \mu_{Spec}K_{Spec} + \mu_{IntraS}K_{IntraS} + \mu_{InterS}K_{InterS} \tag{8}$$

其中，μ_{Spec}、μ_{IntraS}、μ_{InterS} 表示 3 个内核生成统一内核时各自所占的权重，同时 3 个参数需要满足

$$\mu_{Spec} + \mu_{IntraS} + \mu_{InterS} = 1 \tag{9}$$

将生成的混合内核 K_{ComSup} 作为 SVM 的分类准则，用来决定原图像中每个像素所属类别。训练过程中，正负训练样本数量均为 200，可以有良好的训练效果及泛化能力。

SVM 提取后仍存在一定的噪点和渠道断裂现象，因此需要去噪及渠系断点连接来进一步优化。

1.2.2　渠系提取结果优化

1.2.2.1　连通域标记算法剔除噪点

SVM 方法提取出的渠系信息背景中仍存在一定噪点，影响渠系断线连接及结果。消除图像噪声常用的滤波和平滑方法会导致原本的渠系信息也一定程度的丢失，而采用连通区域分析法（Connected component analysis）进行区域标记时对原本目标渠系信息产生的弱化影响较小。连通区域（Connected component）一般是指图像中规定大小的相邻前景元素组成的具有相同像素数的一片区域。连通区域分析法需要将这些区域进行标记，如果符合要求，则将其做增强或者删除[24]。最终当区域个数小于阈值 3 时，默认为非目标渠系，将其重置为背景。从而达到一个较为理想的状态。

为计算连通区域个数，本文对 4 连通邻域进行标记处理，该标记思路为选取一个前景像素点作为种子，然后根据连通区域的 2 个基本条件，即像素数相同且位置相邻（上下左右 4 个位置），将与种子相邻的前景像素标记合并到同一个像素集合中，最终得到的该像素集合即为一个连通区域[27]。处理过程为：

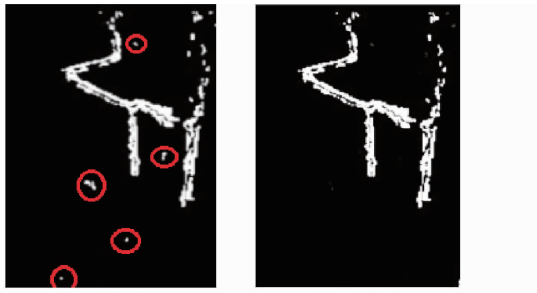
（1）设图像 p 是一个 $m \times n$ 的位图，用数组存放，从上到下，从左到右，依次扫描每个像素点，直到当前的像素点 $p(x,y)$ 为 1。

（2）将 $p(x,y)$ 作为种子，并赋予其一个标记 flag，然后将该种子相邻的 4 个邻域前景像素入栈。

（3）弹出栈顶元素，赋予其相同的 flag，检测该栈顶像素相邻的 4 邻域，若非空压栈，表示不再处理此点，区域个数加 1。

（4）重复步骤（3）操作直到栈中元素为空，此时找到图像 p 中的一个连通区域，并且该区域中的像素值都被标记为同一个 flag。

（5）重复前面 4 个步骤，可以找到所有连通区域，遍历所有连通区域，若其区域个数判断小于 3，则将该区域内的所有像素重置为背景像素。经过该步骤的噪点去除效果如图 5 所示，其中红色圆圈为背景噪声。



（a）去噪前　　（b）去噪后

图 5　去噪效果

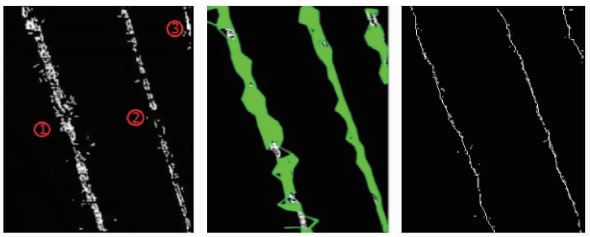
Fig. 5　Local noise removal effect

1.2.2.2　凸包化算法连接渠系断线

针对提取复杂渠道时连续性不足、渠床存在异物以及树木阴影等造成渠系非正常中断的问题，需要进行断线连接处理。断线连接的常用方法有膨胀细化法、张量投票法、凸包化方法等[25]。膨胀细化法直接对栅格数据进行操作，虽然对一部分中断渠道和交汇口具备处理能力，但存在一定盲目性，连接效果并不稳定。张量投票法对较大长度的断裂渠道修复效果一般。而凸包化方法可以有目的地连接较长渠系，具体实现过程是先选出点集 $Q(p_0,p_1,\cdots,p_n)$ 中 y 坐标最小的点记为 p_0，若相同则比较 x 坐标，并将点集 Q 按照极角由小到大排序，若相同则按照到 p_0 的距离由小到大排序。然后将 p_0、p_1、p_2 压入栈，遍历剩下的点，循环剔除不是凸包顶点的点，即非同条渠系所需连接的断点。但由于渠系像素点间离散间距不同，该方法使得渠道变形加粗（图 6b），可通过提取中轴线对该问题进行规避（图 6c）。

1.2.3　结果对比

为了检验不同连接方法对渠系连接的效果，而渠系形状近似为一定宽度的线段，基于这一特征可以通过绘制渠系区域的最小外接矩形来获取渠系的长度、宽度信息。从而进行定量分析评价，即最小外



(a) 分类后效果 (b) 断线连接 (c) 中轴线提取

图 6 渠道断线连接过程

Fig. 6 Channel disconnection process

接矩形的长为渠系长度,宽为渠系宽度。测量单位均为像素数并以人工测量作为检验标准[28]。

为衡量本文方法提取渠系的精度,采用精确率 P、完整度 C、准确率 A,3 项指标对提取结果进行量化评价[26],其计算公式为

$$P = T_P/(T_P + F_P) \times 100\% \quad (10)$$

$$C = T_N/(T_N + F_N) \times 100\% \quad (11)$$

$$A = T_P/(T_P + F_P + F_N) \times 100\% \quad (12)$$

式中 T_P——正确识别的渠系像素数

F_P——非渠系识别为渠系像素数

T_N——正确识别的非渠系像素数

F_N——渠系识别为非渠系像素数

2 结果与讨论

2.1 断线连接

截取实验区 2 中的 3 条渠系,SVM 分类后的效果如图 6a 所示,渠系提取结果连续性较差。采用凸包化方法进行断线连接后的结果如图 6b 所示,渠系连接效果明显,但变形严重。采用中轴线提取后的结果如图 6c 所示,3 条渠系全部连接,但依然存在少量噪声点。由图 6 可以看出,3 条渠系均较好地连接在一起,特别是渠道 2 断线恢复效果最明显。对渠道 2 采用最小外接矩形法定量分析,测量单位均为像素,其测量结果如表 1 所示。

表 1 断线连接结果对比

Tab. 1 Comparison of connection results 像素

测量方法	长度	宽度	长度误差	宽度误差
人工标准	2 480	23	0	0
膨胀细化	2 213	36	267	13
张量投票	2 137	19	343	4
本文方法	2 239	28	241	5

以人工测量作为衡量标准,膨胀细化法、张量投票法在长度和宽度上均出现了较大误差,本文方法处理后的渠道 2 误差均最小且完整连续,断点间误连接问题通过阈值寻优得到一定程度的解决。

同时渠道 1 和 3 连接效果良好,进一步验证了本文方法推广到对整片研究区域进行连接处理的可行性。

2.2 渠系网络提取结果

分别把 3 个实验样区的结果与实际渠系信息进行叠加对比,对应各方法提取的精确率、完整度、准确率计算结果如表 2 所示。提取的渠系分布效果如图 7 所示。不同实验的训练样本对应正射影像中黄色线段。结果表明:

(1)改进的霍夫变换在实验区 1 这种较大片环境良好的区域(图 7a)与 SVM 方法精确率接近,但是面对分布密集、交错较为复杂的渠系漏提取较多,同时提取精度尽管达到斗渠,但大部分农渠丢失,完整度为 86.52%,SVM 方法提取的完整度可达 91.54%,准确率可达 88.34%,均优于改进的霍夫变换。

表 2 本文方法精度评价及对比

Tab. 2 Performance and comparison of proposed method

实验区	实验方法	正确识别的渠系/像素	非渠系识别为渠系/像素	正确识别的非渠系/像素	渠系识别为非渠系/像素	精确率/%	完整度/%	准确率/%
1	SVM	80 363	3 283	79 264	7 329	96.08	91.54	88.34
	改进霍夫变换	78 235	2 089	80 691	12 573	97.40	86.52	84.22
2	SVM	53 769	2 430	49 635	3 981	95.68	92.57	89.35
	改进霍夫变换	50 243	2 612	51 274	4 867	95.06	91.33	87.04
3	SVM	49 352	5 346	39 587	6 672	90.23	85.58	80.42
	改进霍夫变换	32 596	2 491	41 658	8 469	92.90	83.10	74.84

(2)SVM 方法在较复杂和复杂区域(图 7e)整体表现良好,实验区 2 渠系提取准确率可达 89.35%,实验区 3 是本次实验中环境最为复杂的区域(图 7i),存在大量房屋、道路等干扰信息,考验了本文方法面对复杂环境的适用性。该地区北部存在大片房屋建筑干扰以及各种人为活动的影响,实验准确率达到了 80.42%,优于改进霍夫变换的 74.84%。

(3)依照各个指标进行精度评价,平均精度为 86.34%。针对不同复杂环境下的实验区域,本文方法在人工选点的引导下,均得到了有效的渠系分布信息,准确性和适用性良好。在人工监督下的 SVM

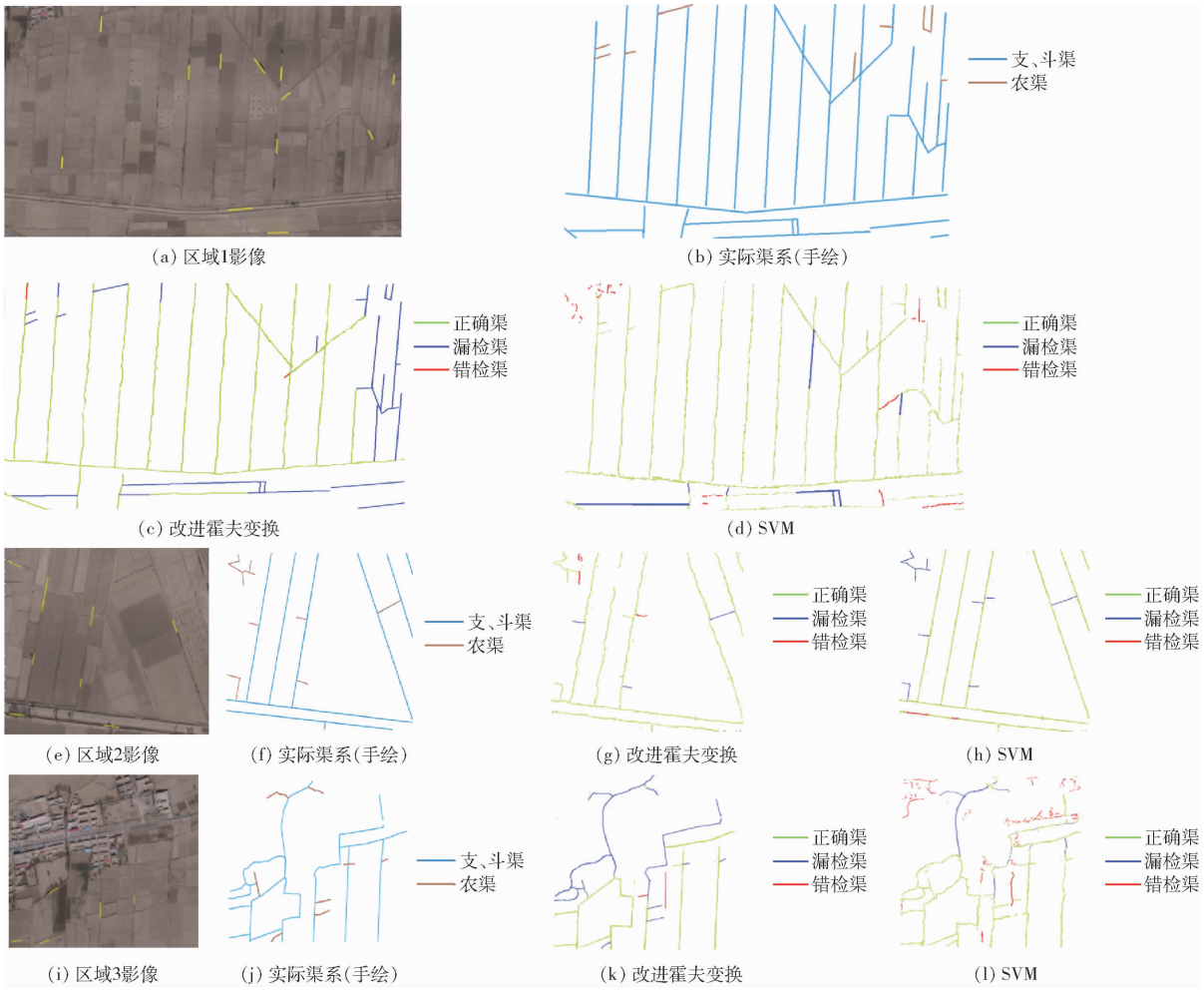


图 7　渠系提取效果比较

Fig. 7　Comparison of canal extraction results

分类方法能够较为完整地保留渠系分布信息，但仍受限于影像信息与其他地物区分度较小，农渠特征不明显以及与渠道相邻的建筑物、人为活动等干扰。断线连接方法在实验过程中也出现了阈值设置过大，极易出现渠道间误连。而阈值设置过小，又会造成连接效果不佳的处境。所以后期针对不同实验区域情况，进行了人工调优，使其渠道断裂连接效果和渠道间错误连接达到一个相对平衡。

3　结论

(1)基于 SVM 方法实现了灌区的渠系提取，后期对渠系结果进行优化，有效地解决了渠系断裂和变形问题，提高了渠系提取精度，主要误差来自于农渠等无衬渠特征不明显。

(2)充分结合多源数据的不同特性，采用多核混合的核函数，为渠系提取提供了新的思路，识别精度得到保障，准确率和精确率都达到了较好的结果。

(3)基于无人机正射影像及其衍生数据的灌区渠系制图，最大的瓶颈来自于渠系地形特征模糊以及建筑物的干扰，使得提取难度加大，因此未来基于水文分析方法结合土地利用分类、多光谱数据等可进一步提高制图精度。

参　考　文　献

1　胡安焱，林凯荣，李玮，等. 无资料地区渠系建设的设计洪水计算探讨[J]. 灌溉排水学报，2006，25(2)：1－3.
HU Anyan，LIN Kairong，LI Wei，et al. Discussion on design flood calculation of canal system in no data area[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2006，25(2)：1－3. (in Chinese)

2　杨勤科，李锐，曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展，2006，21(8)：849－856.
YANG Qinke，LI Rui，CAO Mingming. Study on quantitative study of regional soil erosion at home and abroad [J]. Advances in Earth Science，2006，21(8)：849－856. (in Chinese)

3　PEUCKER T K，DOUGLASD H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data [J]. Computer Graphics & Image Processing，1975，4(4)：375－387.

4　刘辉，谢天文. 基于 PCA 与 HIS 模型的高分辨率遥感影像阴影检测研究[J]. 遥感技术与应用，2013，28(1)：78－84.

LIU Hui, XIE Tianwen. Research on high-resolution remote sensing image shadow detection based on PCA and HIS model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): 78 – 84. (in Chinese)

5 SAATI M, AMINI J. Road network extraction from high-resolution SAR imagery based on the network snake model[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2011(Supp. 1): 23 – 26.

6 刘凯,汤国安,黄骁力,等. 面向地形特征的 DEM 与影像纹理差异分析[J]. 地球信息科学学报,2016,18(3): 386 – 395.
LIU Kai, TANG Guoan, HUANG Xiaoli, et al. DEM and image texture differences for terrain features[J]. Journal of Earth Information Science, 2016, 18(3): 386 – 395. (in Chinese)

7 RAPINEL S, HUBERT L, CLEMENT B, et al. Ditch network extraction and hydrogeomorphological characterization using LiDAR-derived DTM in wetlands[J]. Hydrology Research, 2015, 46(2): 276.

8 CAZORZI F, FONTANA G D, LUCA A D, et al. Drainage network detection and assessment of network storage capacity in agrarian landscape[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(4): 541 – 553.

9 SAH R K, DAS A K. Drainage skeletonization from flow-accumulated area without the use of threshold[J]. Geocarto International, 2015, 30(8): 894 – 904.

10 SCHWANGHART W, GROOM G, KUHN N J, et al. Flow network derivation from a high resolution DEM in a low relief, agrarian landscape[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 27(6): 39 – 43.

11 BROERSON T, PETERS R, LEDOUX H. Automatic identification of watercourses in flat and engineered landscapes by computing the skeleton of a LiDAR point cloud[J]. Computers & Geosciences, 2017, 106: 171 – 180.

12 韩文霆,张立元,张海鑫,等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(3): 205 – 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170326&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateralcanal distribution information based on UAV remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 205 – 214. (in Chinese)

13 张宏鸣,李瑶,王猛,等. 基于无人机 DEM 的灌区渠系提取方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10): 165 – 171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171020&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.020.
ZHANG Hongming, LI Yao, WANG Meng, et al. Study on the extraction method of irrigation networks in irrigated area based on UAV DEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 168 – 171. (in Chinese)

14 陆永帅,李元祥,刘波,等. 基于深度残差网络的高光谱遥感数据霾监测[J]. 光学学报,2017,37(11): 1 – 19.
LU Yongshuai, LI Yuanxiang, LIU Bo, et al. Heavy monitoring of hyperspectral remote sensing data based on depth residuals network [J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 37(11): 1 – 19. (in Chinese)

15 沈照庆,黄亮,陶建斌. 基于支持向量机的高光谱遥感影像道路提取[J]. 长安大学学报:自然科学版,2012,32(5): 34 – 38.
SHEN Zhaoqing, HUANG Liang, TAO Jianbin. Hyperspectral remote sensing image road extraction based on support vector machine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 34 – 38. (in Chinese)

16 ZHANG H, WEI J, YANG Q, et al. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the revised universal soil loss equation for large watersheds[J]. Geoderma, 2017, 308: 36 – 45.

17 YANG T, XU C Y, SHAO Q, et al. Temporal and spatial patterns of low-flow changes in the Yellow River in last half century[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(2): 297 – 309.

18 黄亮,舒宁. 基于支持向量机(SVM)单目标 SAR 图像分割[J]. 地理空间信息,2011,9(1): 60 – 62.
HUANG Liang, SHU Ning. Fractive segmentation of single target SAR based on support vector machine (SVM)[J]. Geospatial Information, 2011, 9(1): 60 – 62. (in Chinese)

19 冀峰,高新波,谢松云. Mean – shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取[J]. 中国图象图形学报,2012,17(6): 651 – 656.
JI Feng, GAO Xinbo, XIE Songyun. Mean – shift filtering and histogram-enhanced image weak edge extraction [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6): 651 – 656. (in Chinese)

20 丁磊,张保明,郭海涛,等. 矢量数据辅助的高分辨率遥感影像道路自动提取[J]. 遥感学报,2017,21(1): 84 – 95.
DING Lei, ZHANG Baoming, GUO Haitao, et al. Automatic extraction of high resolution remote sensing images based on vector data [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 84 – 95. (in Chinese)

21 邬啸,魏延,吴瑕. 基于混合核函数的支持向量机[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2011,25(10): 66 – 70.
WU Xiao, WEI Yan, WU Xia. Support vector machine based on mixed kernel function [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 25(10): 66 – 70. (in Chinese)

22 FANG L, LI S. Classification of hyperspectral images by exploiting spectral-spatial information of superpixelvia multiple kernels [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53(12): 6663 – 6674.

23 LIU M, TUZEL O. Entropy-rate clustering, cluster analysis via maximizing a submodular function subject to a matroid constraint [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36(1): 99 – 112.

24 张云哲,赵海,宋纯贺,等. 一种新的连通区域标记算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(11): 4335 – 4337.
ZHANG Yunzhe, ZHAO Hai, SONG Chunhe, et al. A new connectivity region labeling algorithm[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4335 – 4337. (in Chinese)

25 于广婷,朱聪,李柏林,等. 光学图像中一种新的边界断点连接方法[J]. 计算机应用研究,2014,31(4): 1264 – 1266.
YU Guangting, ZHU Cong, LI Bolin, et al. A new boundary breakpoint connection method in optical image[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(4): 1264 – 1266. (in Chinese)

26 WIEDEMANN C, HEIPKE C, MAYER H, et al. Empirical evaluation of automatically extracted road axes[J]. Wiley-IEEE Computer Society, 1998, 47(3): 172 – 187.