

基于梯度方向直方图的干枯植物与 裸土偏振光谱识别研究

杨 威¹, 侯 鲲^{2,3*}, 赵云升^{4*}

(1. 长春师范大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130032;

2. 东北师范大学 信息科学与技术学院, 吉林 长春 130117;

3. 吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林 长春 130012;

4. 东北师范大学 地理科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 从地物光谱图像识别的关键问题出发, 将改进的梯度方向直方图(光谱梯度方向直方图) 与“光谱总反射率”应用到偏振光谱识别研究中, 实现了对 5 种干枯植物与 3 种裸土的识别. 在研究中, 先联合光谱梯度方向直方图特征向量的模与光谱总反射率进行层次聚类分析, 可以识别 6 种研究对象, 再单独利用光谱梯度方向直方图特征的模进行层次聚类分析识别其余 2 种研究对象, 从而可以实现全部研究对象偏振光谱识别.

关键词: 高光谱; 多角度; 偏振; 光谱梯度方向直方图; 光谱总反射率

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

The study on polarized spectral identification of dry plants and bare soils based on histogram of oriented gradient

YANG Wei¹, HOU Kun^{2,3*}, ZHAO Yun-Sheng^{4*}

(1. College of Computer Science and Technology, Changchun Normal University, Changchun 130032, China;

2. School of Information Science and Technology, Northeast Normal University, Changchun 130117, China;

3. Key Laboratory of Symbol Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education,
Jilin University, Changchun 130012, China;

4. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Starting from the key problems of spectral image recognition, the improved Histogram of Oriented Gradient (Spectral Histogram of Oriented Gradient) and "Spectral total reflectance" were applied to the polarized spectral recognition study, and five dry plants and three bare soils could be recognized. In the study, the hierarchical clustering analysis was carried out by combining the length of Spectral Histogram of Oriented Gradient and Spectral total reflectance, and six study objects could be identified. Then, the length of Spectral Histogram of Oriented Gradient was used to identify the remaining two study objects by the hierarchical clustering analysis alone. As a result, the polarized spectrum of all the study objects could be recognized.

Key words: hyperspectral, multi-angle, polarization, Spectral Histogram of Oriented Gradient, spectral total reflectance

PACS: 42. 25. Ja, 02. 70. Hm

收稿日期: 2018-10-21 修回日期: 2018-12-17

Received date: 2018-10-21 revised date: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(41671347); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190500KJ); 吉林省省级产业创新专项资金(2019C047-6); 长春师范大学自然科学基金(长师大自科合字[2018]第015号)

Foundation items: Supported in part by the National Natural Science Foundation of China (41671347); supported in part by the Jilin Provincial Education Department's "Thirteenth Five Year" scientific and technological research planning project (JJKH20190500KJ); supported in part by Jilin Provincial Special Foundation for Industrial Innovation (2019C047-6); supported in part by the Natural Science Foundation of Changchun Normal University (2018-015)

作者简介 (Biography): 杨 威(1979-), 女, 黑龙江牡丹江人, 副教授, 博士学位, 主要研究领域为遥感探测机理、遥感影像处理. E-mail: viviyw@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: houk431@nenu.edu.cn, zhaoy975@nenu.edu.cn

引言

植被的功能和结构属性受微气候条件、营养动力学、草食动物活动以及许多其他因素的影响,因此植被对于全球气候和生态系统中的生物地球化学过程非常重要。草原干枯植物直接覆盖于地表,是植被群落垂直结构中重要的组成部分。草原干枯植物的识别在保持草原生态系统平衡、防止草原土壤侵蚀、估算草原干草生物量、预警草原火灾等领域的研究工作中发挥着巨大的作用。

遥感技术的不断发展与广泛应用,为草原干枯植物识别的研究提供了详实的数据,不仅比传统人工野外实地调查更加快速、客观和准确,而且节省了大量人力、物力与财力。但在实际应用中,由于干枯植物与裸土、不同种类的干枯植物以及不同种类的裸土彼此之间存在光谱相似性,使干枯植物与裸土的遥感识别存在一定的困难。高光谱遥感、多角度遥感,尤其是偏振遥感的出现与发展为不同草原干枯植物与裸土识别的深入研究开辟了一条新路。

多项研究发现,植被的物理和生理参数可以从实地测量或遥感平台获取的高光谱遥感数据中得到,从而可以进一步研究植被覆盖状况与其光谱反射率之间的相关性^[1]。2008年,Zhang等人^[2]使用高光谱遥感数据检测了叶片中叶绿素的含量;2015年,Landmann等人^[3]利用高光谱遥感数据绘制了第一幅非洲花卉花期图;2018年,Gao等人^[4]应用高光谱遥感数据对高寒草原牧草中磷的含量进行了建模。

为了研究植被冠层的散射行为,研究人员还对植被表面的光谱反射率进行了定向测量,对植被表面的定向测量使角度反射特征成为除光谱特征之外的又一新特征^[5]。多角度遥感已被应用于各种研究中,旨在获取更多额外的信息,加强对土地覆盖^[6]和冠层结构^[7]的评估。

从目标表面反射的光线可以用其强度特征与偏振特征来描述,但是在遥感领域的研究工作中,对光线强度特征的研究远远多于对光线偏振特征的研究。在过去的40年中,众多科学报告指出,偏振测量可以为大气监测、地表表征、地物分类、目标检测等遥感领域的应用提供许多有用的信息^[8]。偏振是与横向电场方向有关的光或电磁辐射的性质,无法从光的强度或光谱信号直接获得。因此,获取目标地物的偏振信息可以为遥感目标识别增加新思路与新方

法,NASA也已经确认了偏振信息在遥感领域中的重要意义^[9]。2011年,Gu等人^[10]使用偏振遥感数据,研究了珠江三角洲地区及周边城市不同地表覆盖物上的地表偏振反射率;2018年,Sun等人^[11]利用偏振遥感数据,研究了单叶与植被的光学特性。

干枯植物的生理特性已经消失,这使得干枯植物与裸土、不同种类的干枯植物以及不同种类的裸土之间的光谱特征非常接近,较难直接利用光谱图像进行区分。理论上,任何地物的光谱图像信息均可以看作是图像信号,其光谱特征自然也就蕴含在这些图像信号中。作为一种在计算机视觉和图像处理领域中重要的特征检测手段,梯度方向直方图(Histogram of Oriented Gradient, HOG)技术可以作为研究不同地物光谱特征的方法,该方法中的核心概念HOG特征可以很好的描述光谱图像的内在特征。本文利用改进的梯度方向直方图特征,对干枯植物与裸土的偏振光谱曲线进行分析,实现草原地区广泛分布的5种干枯植物与3种裸土的识别。

1 样本采集和实验方法

1.1 样本采集与处理

选用小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、碱蒿(*Alkali Artemisia*)、羊草(*Leymus chinensis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、芦苇(*Reed*)5种枯萎植株样本及黑土(*Black soil*)、碱土(*Alkali soil*)、风沙土(*Aeolian sandy soil*)3种裸土样本作为研究对象。样本均采自吉林省西部草原,采集时间为2015年3月5日至3月10日。其中,裸土样本来自表面层,取样深度不超过2 cm;枯萎植株样本与裸土样本采集后在室温条件下风干至恒重,剔除杂物,制成自然风干样本。

1.2 实验仪器与偏振光谱测量

使用东北师范大学的Goniospectrometer系统(NENULGS)对8种研究对象进行室内光谱测量。基本的NENULGS配置包括多角度测试平台、人工照明设备与高光谱仪FieldSpec 3(ASD FS3)。

多角度测试平台有一个1.2 m长的步进电机驱动臂,垂直方向运动变化的探测天顶角水平取值区间为 $[0^\circ \sim 90^\circ]$,精度为 0.1° ,水平方向运动变化的探测方位角水平取值区间为 $[0^\circ \sim 360^\circ]$,精度为 0.25° 。模拟太阳光的卤钨灯位于具有1.5 m半径的圆弧上,光线入射天顶角水平取值区间为 $[0^\circ \sim 90^\circ]$,光线入射方位角水平取值区间为 $[0^\circ \sim 360^\circ]$,精度为 0.25° 。使用ASD FS3进行光谱反射

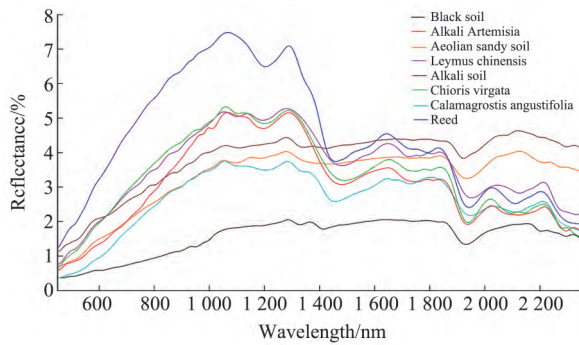


图1 8种研究对象偏振反射光谱曲线
Fig.1 Polarized spectral curves for the eight study objects

率测量,波段范围为 50 ~ 2 500 nm,350 ~ 1 000 nm 光谱分辨率为 3 nm,采样间隔为 14 nm,1 000-2 500 nm 光谱分辨率为 10 nm,采样间隔为 2 nm,波长精度 1 nm,扫描时间 100 ms. 在进行偏振光谱数据获取时,将偏振棱镜(偏振棱镜为汤姆逊棱镜,有效透过波段为 350 nm ~ 2 300 nm)装置在 ASD FS3 光纤前,偏振镜头上有 0° ~ 360° 范围的刻度,可以以 0.5° 精度自由旋转. 研究对象样本分别放置于直径 10 cm,深 3.5 cm 的容器内. 实验中,探测方位角分别为 0°,60°,180°,270°;探测天顶角分别为 30°,50°,70°;偏振角分别为 0°,30°,60°,90°. 图 1 为探测方位角 30°,探测天顶角 0°,偏振角 0° 时研究对象的偏振反射光谱曲线.

在偏振光谱数据的获取过程中,常常伴随各种不同的噪声干扰. 为了增加光谱数据的有效性和准确性,本文采用 EMD 方法对光谱数据进行预处理. EMD(Empirical Mode Decomposition)方法是一种新型的信号时频处理方法,其最大特点是抛弃了基函数的概念,仅仅依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解,具备自适应性. 故而其特别适用于非线性、非平稳信号的分析处理,具有很高的信噪比. 该方法被认为是近年来以傅立叶变换为基础的线性和稳态频谱分析领域的一个重大突破. 已在众多工程领域得到了迅速而有效的应用,例如,在海洋、大气、天体观测与地球物理数据分析等方面.

从图 1 可以看出,黑土的偏振反射光谱曲线整体最低,芦苇的偏振反射光谱曲线总体最高,二者均可以通过图 1 进行识别. 其他 6 种研究对象,风沙土、碱土、小叶章、碱蒿、羊草和虎尾草的偏振反射光谱曲线较为相近,较难识别区分.

1.3 光谱梯度方向直方图

HOG 特征是法国研究人员 Navneet Dalal 和 Bill

Triggs 在 2005 年提出的一种实现静态行人检测的方法^[12],后来又被用来检测电影和视频中的动态行人. 近年来,更成为计算机视觉与模式识别领域中一种常用的描述图像局部纹理的特征. HOG 特征是一种能够对物体进行检测的基于形状边缘特征的描述算子,利用梯度信息反映图像目标的边缘信息并通过局部梯度的大小将图像局部的的外观和形状特征化. 但是,数字图像信息与光谱信息数据形式并不相同,不能直接应用于光谱图像. 本文针对光谱图像的特点,提出了一种改进的 HOG 特征,光谱梯度方向直方图(Spectral Histogram of Oriented Gradient, Spectral-HOG)特征. Spectral-HOG 特征的计算方法如下:

(1) 计算光谱梯度

光谱曲线上波长 λ_i 的梯度 $G(\lambda_i)$,如式(1),

$$G(\lambda_i) = R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1}), \text{start} \leq i \leq \text{end} \quad (1)$$

式中, $R(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的反射率, start 是光谱曲线起始端的波长, end 是光谱曲线的结束端的波长.

梯度方向 $G_d(\lambda_i)$,如式(2),

$$G_d(\lambda_i) = \begin{cases} \tan^{-1}(G(\lambda_i)), G(\lambda_i) \geq 0 \\ \tan^{-1}(G(\lambda_i)) + \pi, G(\lambda_i) < 0 \end{cases} \quad \text{start} \leq i \leq \text{end} \quad (2)$$

(2) 构建单元特征向量

将光谱曲线平均分成 n 个单元 $cell$,每个单元包含 c 个相邻的波长. 将单元的梯度方向 $[0 \sim \pi]$ 分成 B 个方向块,对单元内 c 个波长用梯度方向对 B 个方向进行投影,第 k 个单元中波长 λ_i 在第 b 个方向上的投影 $cell_k(b)$ 如式(3),每个单元产生 B 维特征向量如式(4),

$$cell_k(b) = \sum_{i=1}^c \nabla \left(\text{floor} \left(\frac{G_d(\lambda_i)}{\pi} \times B \right) - b \right), \quad (3)$$

$$1 \leq k \leq n, 0 \leq b \leq B - 1$$

式中,函数 $\nabla(\cdot)$ 的值为 1 当且仅当参数值为 0 时,否则函数 $\nabla(\cdot)$ 的值为 0.

$$\overline{cell}_k = (cell_k(0), \dots, cell_k(b), \dots, cell_k(B-1)), \quad (4)$$

$$1 \leq k \leq n, 0 \leq b \leq B - 1$$

(3) 将单元组成大的区间

将 p 个相邻的单元组成一个区间 $block$,一个区间内所有单元的特征向量串联起来就是该区间的特征向量. 这些区间是互有重叠的,每一个单元的特征向量会以不同的形式多次出现在最后的特征向量中,第 m 个区间的特征向量如式(5).

$$\overrightarrow{block}_m = (\overrightarrow{cell}_1, \dots, \overrightarrow{cell}_k, \dots, \overrightarrow{cell}_p) \quad (5)$$

(4) 生成 Spectral-HOG 特征向量

拼接光谱曲线所有区间的特征向量,生成最终

的光谱曲线 Spectral-HOG 特征向量 \vec{H} , 如式(6),

$$\vec{H} = (\overrightarrow{block}_1, \dots, \overrightarrow{block}_m, \dots) \quad (6)$$

1.4 光谱总反射率

定义光谱曲线所有波长的光谱反射率之和为 Spectral-E, 如式(7),

$$\text{Spectral-E} = \sum_{i=\text{start}}^{\lambda_{\text{end}}} R(\lambda_i), \text{start} \leq i \leq \text{end} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 使用 Spectral-HOG 与 Spectral-E 进行分析

Spectral-HOG 特征与 Spectral-E 分别量化了光谱曲线的“形状”与“总反射率”。“形状”与“总反射率”是分析不同偏振光谱曲线,进而实现不同目标地物识别不容忽视的特征. 本文利用 Matlab 分别计算了研究对象的 Spectral-HOG 的模 $|\vec{H}|$ 与总反射率 Spectral-E (如表 1 所示). 经过对实验数据进行统计分析, $|\vec{H}|$ 与 Spectral-E 之间的相关系数为 0.2139, 相关性并不显著, 可以作为研究对象的不同特征.

从表 1 可以看出, 芦苇具有最大的 $|\vec{H}|$ 值为 81.857935, 与其他的研究对象 $|\vec{H}|$ 值差距较大, 说明芦苇的光谱曲线形状与其他研究对象的差别较大 (如图 1 所示), 可以通过 $|\vec{H}|$ 进行识别. 其他 7 种研究对象的 $|\vec{H}|$ 值彼此之间的差距不大, 不具有典型特征, 无法通过 $|\vec{H}|$ 进行识别. 其中, 黑土和碱土的 $|\vec{H}|$ 值分别为 63.762417 和 64.188562, 差距最小为 0.426145, 说明二者光谱曲线的形状信息较为相似, 难以通过 $|\vec{H}|$ 值进行识别 (如图 1 所示). 风沙土、小叶章、碱蒿、羊草和虎尾草的 $|\vec{H}|$ 值分别为 70.469274、74.517192、76.043014、75.055221 和 78.040604, 差距较小, 较难通过 $|\vec{H}|$ 值进行识别 (如图 1 所示).

黑土具有最小的 Spectral-E 值为 29.418736, 芦苇具有最大的 Spectral-E 值为 84.210180, 与其他研究对象的差距较大, 说明黑土光谱的反射率最低, 芦苇光谱的总反射率最高 (如图 1 所示), 具有典型的特征, 可以通过 Spectral-E 值识别黑土与芦苇. 其他

6 种研究对象的 Spectral-E 值彼此之间的差距不大, 不具有典型特征, 无法通过 Spectral-E 值进行识别. 其中, 风沙土和虎尾草的 Spectral-E 值分别为 62.413978 和 63.426614, 差距最小为 1.012636, 说明二者光谱的“总反射率”较为接近, 很难通过 Spectral-E 值进行识别 (如图 1 所示). 碱土、羊草、碱蒿和小叶章的 Spectral-E 值分别为 72.335045、68.183956、58.479831 和 49.851581, 差距较小, 较难通过 Spectral-E 值进行识别 (如图 1 所示).

表 1 不同研究对象的 $|\vec{H}|$ 与 Spectral-E

Table 1 $|\vec{H}|$ and Spectral-E for the study objects

研究对象	$ \vec{H} $	Spectral-E
黑土	63.762417	29.418736
风沙土	70.469274	62.413978
碱土	64.188562	72.335045
小叶章	74.517192	49.851581
碱蒿	76.043014	58.479831
羊草	75.055221	68.183956
虎尾草	78.040604	63.426614
芦苇	81.857935	84.210180

2.2 层次聚类分析

层次聚类 (Hierarchical Clustering) 是一种基于原型的聚类算法, 该算法试图在不同的层次对数据集进行划分, 从而形成树形的聚类结构. 数据集的划分可采用“自底向上”的聚合策略, 也可以采用“自顶向下”的分拆策略. 层次聚类算法的优势在于, 可以通过绘制树状图 (Dendrogram), 帮助我们使用可视化的方式来解释聚类结果. 层次聚类算法的另一个优点是不需要事先指定簇的数量.

虽然 8 种研究对象光谱曲线的 $|\vec{H}|$ 值与 Spectral-E 值不同, 但是仅仅通过 8 种研究对象 $|\vec{H}|$ 值或 Spectral-E 值之间的微小差别, 很难准确地将 8 种研究对象完全区分. 为了实现不同研究对象的偏振反射光谱的识别, 本文分别针对 $|\vec{H}|$, Spectral-E, $|\vec{H}|$ 与 Spectral-E 进行层次聚类分析, 结果如图 2、3 和 4 所示.

从图 2 可以看出, 基于 $|\vec{H}|$ 的层次聚类分析结果表明, 黑土和碱土聚为一类, 小叶章和羊草聚为一类, 风沙土、碱蒿、虎尾草与芦苇自成一类. 可见, 利用 $|\vec{H}|$ 对 8 种研究对象进行层次聚类分析, 可以识别风沙土、碱蒿、虎尾草与芦苇, 但是却无法识别黑土和碱土, 小叶章和羊草.

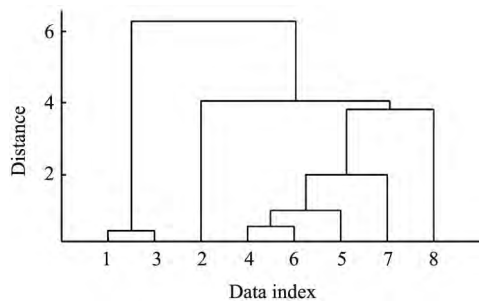


图 2 基于 $|\vec{H}|$ 的层次聚类分析. 1: 黑土; 2: 风沙土; 3: 碱土; 4: 小叶章; 5: 碱蒿; 6: 羊草; 7: 虎尾草; 8: 芦苇

Fig. 2 Hierarchical clustering analysis of $|\vec{H}|$. 1: Black soil; 2: Aeolian sandy soil; 3: Alkali soil; 4: Calamagrostis angustifolia; 5: Alkali artemisia; 6: Leymus chinensis; 7: Chloris virgata; 8: Reed

基于 Spectral-E 的层次聚类分析结果如图 3 所示. 不难看出, 风沙土和虎尾草聚为一类, 碱土和羊草聚为一类, 黑土、小叶章、碱蒿及芦苇自成一类. 由此可见, 利用 Spectral-E 对 8 种研究对象进行层次聚类分析, 可以识别黑土、小叶章、碱蒿和芦苇, 但是无法识别风沙土和虎尾草, 碱土和羊草.

基于 $|\vec{H}|$ 和 Spectral-E 的层次聚类分析结果(图 4) 表明, 碱蒿和虎尾草聚为一类, 黑土、风沙土、碱土、小叶章、羊草及芦苇构成一类. 可见, 利用 $|\vec{H}|$ 和 Spectral-E 对 8 种研究对象进行层次聚类分析, 仅无法识别碱蒿和虎尾草, 其他 6 种研究对象均可识别.

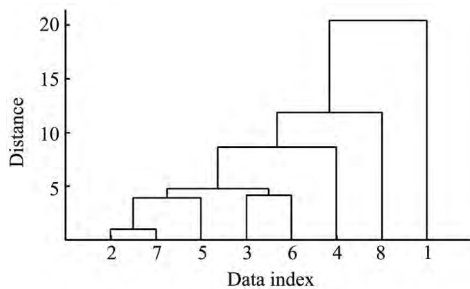


图 3 基于 Spectral-E 的层次聚类分析. 1: 黑土; 2: 风沙土; 3: 碱土; 4: 小叶章; 5: 碱蒿; 6: 羊草; 7: 虎尾草; 8: 芦苇

Fig. 3 Hierarchical clustering analysis of Spectral-E. 1: Black soil; 2: Aeolian sandy soil; 3: Alkali soil; 4: Calamagrostis angustifolia; 5: Alkali artemisia; 6: Leymus chinensis; 7: Chloris virgata; 8: Reed

综上所述, 仅通过 $|\vec{H}|$ 可以识别风沙土、碱蒿、虎尾草与芦苇 4 种研究对象, 仅通过 Spectral-E 可以识别黑土、小叶章、碱蒿和芦苇 4 种研究对象, 综合分别利用 $|\vec{H}|$ 和 Spectral-E 对 8 种研究对象进行

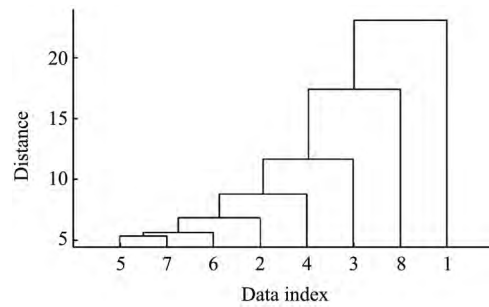


图 4 基于 $|\vec{H}|$ 与 Spectral-E 的层次聚类分析. 1: 黑土; 2: 风沙土; 3: 碱土; 4: 小叶章; 5: 碱蒿; 6: 羊草; 7: 虎尾草; 8: 芦苇

Fig. 4 Hierarchical clustering analysis of $|\vec{H}|$ and Spectral-E. 1: Black soil; 2: Aeolian sandy soil; 3: Alkali soil; 4: Calamagrostis angustifolia; 5: Alkali artemisia; 6: Leymus chinensis; 7: Chloris virgata; 8: Reed

层次聚类分析的结果, 也只能识别黑土、风沙土、小叶章、碱蒿、虎尾草和芦苇 6 种研究对象. 但是如果先利用 $|\vec{H}|$ 与 Spectral-E 进行层次聚类分析的结果可以识别黑土、风沙土、碱土、小叶章、羊草、芦苇 6 种研究对象, 再利用 $|\vec{H}|$ 进行层次聚类分析的结果识别碱蒿与虎尾草 2 种研究对象, 就可以识别全部 8 种研究对象.

3 结论

通过以上的对比与分析, 我们可以得到以下的结论:

1) 尽管实验中不同枯草与裸土具有不同的偏振反射光谱, 但总体上曲线形态相似, 变化较为平缓, 其中芦苇的偏振反射率总体较高, 而黑土的偏振反射率最低, 较易识别, 其余地物谱型相近, 较难识别.

2) Spectral-HOG 特征量化了光谱曲线的“形状”, 通过层次聚类分析, 可以实现部分研究对象的识别.

3) Spectral-E 量化了光谱曲线的“总反射率”, 通过层次聚类分析, 也可以实现部分研究对象的识别.

4) 先利用 Spectral-HOG 特征的模与 Spectral-E 对研究对象进行层次聚类分析, 再利用 Spectral-HOG 特征的模进行层次聚类分析, 可以实现全部研究对象的识别.

干枯植物不再具有绿色植物特征, 其光谱曲线中典型的绿色植物光谱特征也基本消失殆尽, 传统的针对绿色植被的识别方法和经验很难用于识别干

枯植物. 尽管可以利用人工提取光谱特征实现研究对象的识别,但在特征选取的过程中,受研究人员个人因素的影响,往往无法保证识别结果的准确性和一致性. HOG 特征是图像处理领域中一种有效的对象识别描述符,不仅能表征光谱曲线局部形状的特点,也可以描述光谱曲线整体的内在特征. 本文提出的基于 HOG 的方法与“总反射率”可以完整地描述光谱曲线. 本研究对草原干枯植物与裸土的偏振光谱特征的研究有着重要意义,为干枯植物与裸土识别的研究提供了新的技术与方法.

References

- [1] Diner D J, Xu F, Martonchik J V, et al. Exploration of a Polarized Surface Bidirectional Reflectance Model Using the Ground-Based Multiangle SpectroPolarimetric Imager [J]. *Atmosphere*, 2012, **3**(4): 591-619.
- [2] Zhang Y Q, Chen J M, Miller J R, et al. Leaf chlorophyll content retrieval from airborne hyperspectral remote sensing imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(7): 3234-3247.
- [3] Landmann T, Piironen R, Makori D M, et al. Application of hyperspectral remote sensing for flower mapping in African savannas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **166**: 50-60.
- [4] Gao J L, Meng B P, Liang T G, et al. Modeling alpine grassland forage phosphorus based on hyperspectral remote sensing and a multi-factor machine learning algorithm in the east of Tibetan Plateau, China [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, **147**: 104-117.
- [5] Comar A, Baret F, Viénot F, et al. Wheat Leaf Bidirectional Reflectance Measurements: Description and Quantifi-

cation of the Volume, Specular and Hot-spot Scattering Features [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**(2): 26-35.

- [6] Jiao Z T, Woodcock C, Schaaf C B, et al. Improving MODIS land cover classification by combining MODIS spectral and angular signatures in a Canadian boreal forest [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, **37**(2): 184-203.
- [7] Roujean J L, Lacaze R. Global mapping of vegetation parameters from POLDER multiangular measurements for studies of surface-atmosphere interactions: A pragmatic method and its validation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, **107**(D12): ACL6-1-ACL6-14.
- [8] Chowdhary J, Cairns B, Waquet F, et al. Sensitivity of Multiangle, Multispectral Polarimetric Remote Sensing over Open Oceans to Water-leaving Radiance: Analyses of RSP Data Acquired during the MILAGRO Campaign [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **118**(4): 284-308.
- [9] Yang Han, Wen-Ru Xu, Lun Jin. A Study on the Polarized Reflectance Hyperspectral Characteristics and Models of Typical Saline Soil [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (韩阳, 徐文茹, 金伦. 典型盐渍化土壤偏振反射高光谱特征与模型分析. 红外与毫米波学报), 2015, **34**(5): 606-612.
- [10] Gu X, Cheng T, Xie D, et al. Analysis of surface and aerosol polarized reflectance for aerosol retrievals from polarized remote sensing in PRD urban region [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(36): 6607-6612.
- [11] Sun Z Q, Peng Z Y, Wu D, et al. Photopolarimetric Properties of Leaf and Vegetation Covers over a Wide Range of Measurement Directions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, **206**: 273-285.
- [12] Dalal N, Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 05), 2005 [C]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005: 886-893.

(上接第 319 页)

References

- [1] Loka C, Park K R, Lee K. SiO₂/TiO₂/n-Si/Ag(Cr)/TiO₂ thin films with super hydrophilicity and low emissivity [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, **55**(01): 1-7.
- [2] Zhang W G, Xu G Y, Shi X, et al. Ultra-low infrared emissivity at the wavelength of 3-5 μm from Ge/ZnS one-dimensional photonic crystal [J]. *Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications*, 2015, **14**: 46-51.
- [3] Fang S J, Wang W, Yu X L, et al. Preparation of ZnO: (Al, La) / polyacrylonitrile (PAN) nonwovens with low infrared emissivity via electrospinning [J]. *Materials Letters*. 2015, **143**: 120-123.
- [4] Srikanth G, Jack E, Fred T, et al. Frequency-selective surface based band pass filter in the near-infrared region [J]. *Microwave and optical technology letter*. 2004, **41**(4): 266-269.
- [5] Vegesna S, Yan H Z, Bernussi A. Terahertz two-layer frequency selective surfaces with improved transmission characteristics [J]. *IEEE Sci. Technol.*, 2012, **2**(4): 441-448.
- [6] James G, David S, Peter K, et al. Polarized infrared emission using frequency selective surfaces [J]. *Opt. Exp.*, 2010, **18**(5): 4557-4563.
- [7] Bossard J A, Werner D H, Mayer T S, et al. The design and fabrication of planar multiband metalodielectric frequency selective surfaces for infrared applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2006, **54**(4): 1265-1276.
- [8] Mathew J D, Koray A, Imogen M P, et al. Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO₂ phase transition [J]. *Opt. Exp.*, 2009, **17**(20): 18330-18339.
- [9] Bossard J A, Liang X T, Li L, et al. Tunable Frequency Selective Surfaces and Negative-Zero-Positive Index Metamaterials Based on Liquid Crystals [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation* 2008, **56**(5): 1308-1319.
- [10] Che Zh X, Tian Ch H, Wang B K, et al. An Infrared Frequency Selective Surface with Dual Stop-band [J]. *Infrared Technology* (车志新, 田昌会, 王斌科, 等. 一种双阻带红外频率选择表面. 红外技术) 2017, **39**(7): 594-597.
- [11] Ma W, Wen Y ZH, Yu X M. Broadband metamaterial absorber at midinfrared using multiplexed cross resonators [J]. *Opt. Exp.*, 2013, **21**(25): 30724-30730.
- [12] Nikitin A, Guinea F, Martin-Moreno L. Resonant plasmonic effects in periodic graphene antidot arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(15): 151119.