doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.008

基于 K-means 聚类和分区寻优的秸秆覆盖率计算方法

安晓飞[1,2]　王　培[1,2]　罗长海[1,2]　孟志军[1,2]　陈立平[1,2]　张安琪[1,2]
(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对农田秸秆形态多样、细碎秸秆难以准确识别的问题,基于机器视觉技术,提出了一种基于 K-means 聚类和分区寻优结合的秸秆覆盖率计算方法。该方法首先利用 K-means 聚类算法对玉米秸秆图像进行分割,使秸秆从背景图像中分离;然后将秸秆图像分隔为 16 区,利用统计学方法分别计算各区秸秆中位数和众数灰度平均值,16 区平均后分别获得秸秆中心灰度和土壤背景中心灰度,将其作为新的分类中心,重新采用 K-means 聚类方法对玉米秸秆图像进行分割,当秸秆中心灰度不再发生变化时停止迭代,计算秸秆像素点数量;最后计算获得玉米秸秆覆盖率。2021 年 4 月,该方法在吉林省长春市玉米地 100 个采样点进行了实际验证,与人工拉绳法和人工图像标记法的相关系数分别为 0.716 1 和 0.906 8,误判率 7%,平均误差比 Otsu 阈值化方法和经典 K-means 聚类方法分别降低了 45.6% 和 29.2%。试验结果表明,所提方法能够实现对不同天气、不同种植模式、不同地块条件下的秸秆覆盖率准确计算,该研究结果可为秸秆覆盖率在线计算提供一种新方法。

关键词: 玉米秸秆覆盖率; 机器视觉; K-means 聚类; 分区寻优; 保护性耕作
中图分类号: O657.3; S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0084-06　　**OSID**:

Corn Straw Coverage Calculation Algorithm Based on K-means Clustering and Zoning Optimization Method

AN Xiaofei[1,2]　WANG Pei[1,2]　LUO Changhai[1,2]　MENG Zhijun[1,2]　CHEN Liping[1,2]　ZHANG Anqi[1,2]
(1. *Beijing Research Center of Intelligent Equipment Technology for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*
2. *National Research Center of Intelligent Equipment Technology for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Straw coverage rate is one of the most important indicators for conservation tillage evaluation. It is also important to realize online detection of straw coverage rate for black land conservation evaluation. Aiming at the problems of various forms of cropland straws and the difficulty in accurately identifying the broken straws, an online detection algorithm of straw coverage rate was proposed based on the combination of K-means clustering and zoning optimization method with machine vision technology. Firstly, K-means clustering algorithm was used for maize straw image segmentation from the background image. And then the straw image was segmented into 16 areas, using statistical methods to calculate respectively the median of straw and the average number of gray levels, respectively. After 16 area average straw center gray value and soil background gray value were calculated, both were taken as a new classification center. Subsequently the K-means clustering method was used to segment the image of corn straw again. When the gray value of the center of straw did not change, the iteration was stopped. With the calculated number of pixel points of straw, the coverage rate of corn straw was obtained, finally. In April 2021, the proposed algorithm was verified at 100 sampling points in corn fields in Changchun City, Jilin Province. The correlation coefficients between the proposed algorithm and the artificial rope pulling method and the artificial image labeling method were 0.716 1 and 0.906 8, respectively. The corn straw coverage detection misjudgment rate was 7%. The average error of Otsu thresholding method and classical K-means clustering method was respectively reduced by 45.6% and 29.2%. The experimental results

收稿日期: 2021-08-04　修回日期: 2021-08-29
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)和北京市农林科学院创新能力项目(KJCX20210433、KJCX20200416)
作者简介: 安晓飞(1986—),男,副研究员,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail: anxf@nercita.org.cn
通信作者: 张安琪(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail: zhangaq@nercita.org.cn

showed that the proposed method could detect the straw coverage rate under different weather conditions and planting patterns, accurately. It can provide a method for online detection of straw coverage.

Key words: corn straw coverage; machine vision; K-means clustering; zoning optimization; conservation tillage

0　引言

农田秸秆覆盖率是保护性耕作评价的重要指标之一，实现秸秆覆盖率快速检测对黑土地保护评价非常重要。保护性耕作是以秸秆覆盖地表、免少耕播种为主要内容的现代耕作技术体系，具有防治农田扬尘和水土流失、蓄水保墒、培肥地力、节本增效、减少秸秆焚烧和温室气体排放等作用[1-4]。2020 年 4 月，农业农村部发布的《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)》中提出，到 2025 年，保护性耕作实施面积达到 9.33×10^6 hm^2，形成较为完善的保护性耕作政策支持体系、技术装备体系和推广应用体系。

秸秆覆盖率作为保护性耕作重要技术指标，更是秸秆还田补贴的重要依据，准确高效的秸秆覆盖率检测对于推进保护性耕作具有重要作用。而国标 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》中采用人工“拉绳法”进行秸秆覆盖率测量，作业效率低，劳动强度大，已严重落后于当前农机“互联网 +”模式下的实际生产需要。

随着大数据、云计算、物联网等新一代信息技术在现代农业中的推广应用，将这些技术与农业场景深度融合，利用计算机图像处理技术快速而准确地识别秸秆覆盖图像已成为一种趋势。图像法成本低且效率高，成为秸秆检测的热门研究方向和手段。国内外很多学者都致力于这方面的研究，并取得了重要成果[5-23]。文献[5-7]基于航拍图像，提出一种图像自动分割的优化算法多阈值差分灰狼优化算法(DE-AS-MOGWO)，运用该算法可以实现对图像的多阈值分割处理，并对秸秆覆盖率进行精确的检测。文献[8-9]基于卫星遥感影像开展了地表秸秆覆盖度估算研究，但遥感图像尺度较大，缺乏地面数据验证，尚无法成为秸秆还田补贴依据。文献[10-11]将纹理特征的熵值结合反向传播神经网络，进行秸秆覆盖度检测，该方法计算耗时较长，无法满足商业化检测要求。目前基于图像的秸秆覆盖度识别研究多针对静态条件下，秸秆纹理清晰、特征明显的情况，但农机田间作业真实环境复杂，土块、沟壑等因素影响识别；秸秆形状、尺寸、姿态各异，细碎秸秆难于精准辨别。传统机器视觉算法泛化能力弱，难以解决田间不同环境中的秸秆精准识别问题。

本文针对农田秸秆形态多样、细碎秸秆难以识别的问题，提出一种基于 K-means 聚类和分区寻优方法结合的玉米秸秆覆盖率算法，并通过不同天气、不同种植模式、不同地块条件进行田间实际验证。

1　试验材料与方法

1.1　图像采集设备

采集农田秸秆图像的设备为自主研发的前后双置摄像头的保护性耕作作业计量远程监测系统，系统主要由前置摄像头(采集农田秸秆图像)、后置摄像头(采集机具图像)、机具识别传感器、数据采集器、显示器和卫星定位天线组成(图 1)。该装置可以实现保护性耕作作业面积计量、秸秆图像采集、机具图像采集、作业质量分析等功能。



图 1　农田秸秆采集设备

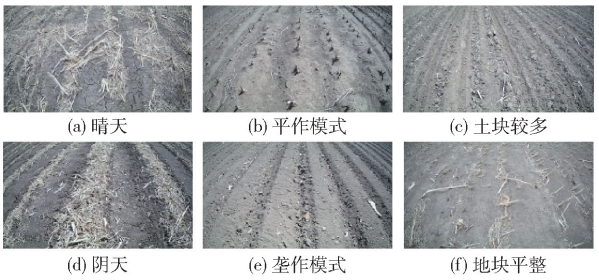
Fig. 1　Field straw collection equipment

其中秸秆图像采集摄像头选用广州谱泰通信科技有限公司 PTC02-200 型 200 万像素串口防水摄像头，5 V 供电，图像传感器类型为 CMOS，模块核心 DSP 芯片集成了新一代 ISP 算法，图像尺寸为 1 920 像素 × 1 080 像素，输出格式为标准 JPEG 格式，拖拉机田间行进速度为 3.6 ~ 5.0 km/h，采样间隔 10 s，串口通信速率为 115 200 b/s。

本批图像采集时间为 2021 年 4 月 26—28 日，选取吉林省长春市双阳区 10 个地块，采集 100 幅不同时间段、不同天气、不同种植模式下的秸秆覆盖图像，其中阴天、晴天秸秆图像数量比为 2∶8，垄作、平作秸秆图像数量比为 1∶3，土块根茬与平整秸秆图像数量比为 1∶9。图 2 为 6 种典型条件下的农田秸秆图像。

1.2　农田实际秸秆覆盖率人工获取方法

采用人工拉绳法测定秸秆覆盖率，用长 2 m 的绳子，每隔 10 cm 做记号，测定时沿地块对角线铺放



(a) 晴天 (b) 平作模式 (c) 土块较多

(d) 阴天 (e) 垄作模式 (f) 地块平整

图 2 6 种典型条件下秸秆图像

Fig. 2 Straw pictures under six typical conditions

绳子,统计标记点上有秸秆的点数,将统计点数除以总标记点数,即为秸秆覆盖率,具体计算公式为

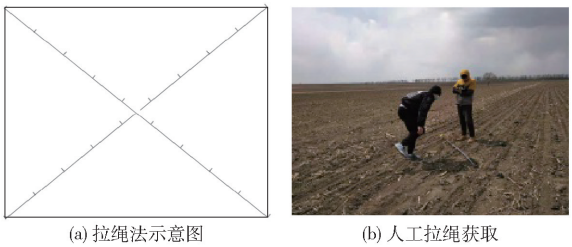
$$F = \frac{\sum \frac{D_1}{D_2}}{3} \times 100\% \tag{1}$$

式中 F——人工法秸秆覆盖率,%

D_1——测定有秸秆的点数

D_2——测定点数

图 3 为人工拉绳法获取玉米秸秆覆盖率示意图。



(a) 拉绳法示意图 (b) 人工拉绳获取

图 3 人工拉绳法获取玉米秸秆覆盖率

Fig. 3 Artificial rope drawing method for corn straw coverage rate

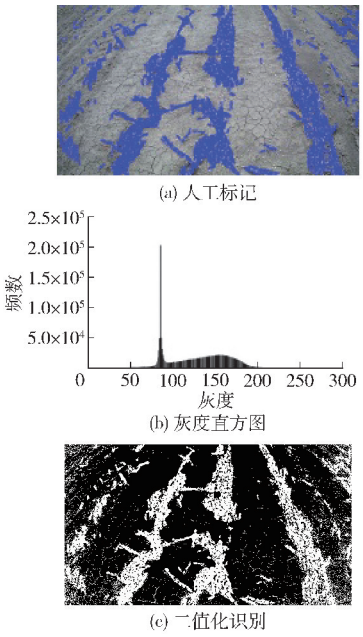
由于田间秸秆覆盖变异性比较大,同一地块变异系数达到 0.71,采用人工拉绳法,无法与采集的秸秆图像做到严格一一对应,本研究中进一步采用了“人工标注 + 二值化识别”方法获得玉米秸秆图像覆盖率真实值,与采集到的秸秆图像实现真值、测量值严格一一对应。图 4 为人工标记法获得秸秆覆盖率方法。

1.3 基于 K-means 聚类的秸秆覆盖率计算方法

1.3.1 经典 K-means 方法

聚类是无监督学习的一种重要形式,其主要作用是将数据对象分为多个簇,保证同一簇内的数据对象相似度尽可能大,而不同簇间的数据对象相似度尽可能小。其中,K-means 聚类是解决聚类问题的一种经典算法,使用非常广泛。

由于图像分割可以看成聚类问题,即图像中像素点类别未知的前提下,根据像素点的特征值,将图像划分为若干个区域。因此,本文利用 K-means 聚类算法实现对秸秆图像的分割,即将其分为 2 类:秸秆和背景。



(a) 人工标记

(b) 灰度直方图

(c) 二值化识别

图 4 人工标记法获得秸秆覆盖率

Fig. 4 Manual marking method for corn straw coverage rate

1.3.2 分区寻优聚类迭代

K-means 聚类有 2 个参数确定比较困难:聚类数量、聚类中心。在玉米秸秆图像中,目标物和背景清晰,聚类数量可确定为 2。聚类中心在经典 K-means 聚类算法中是随机确定的,造成了聚类算法效果不稳定,无法达到最优。本研究在一次聚类基础上,提出了一种分区寻优的方法确定了新的聚类中心,并进行聚类迭代,直到秸秆聚类中心收敛不再发生变化时停止聚类迭代。

首先将原始图像(1 920 像素 × 1 080 像素)分隔为 16 区;然后依次判断各分块中第 1 类(秸秆类)和第 2 类(土壤类),通常情况下,土壤背景灰度小于 100,秸秆灰度大于 160,如果每个分块中均有 2 类,则利用统计学方法分别计算各区秸秆中位数和众数灰度平均值,如果分块中只有一类,则判断类别属性后计算对应类别的灰度平均值,并计入对应类别总数组中。根据 16 分区中的秸秆中位数和众数灰度平均值及数量,按照公式

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{A_j + M_j}{2}}{n} \tag{2}$$

式中 C_i——秸秆中心灰度

A_j——各区众数灰度

M_j——各区中位数灰度

n——实际有效分区个数

计算获得秸秆中心灰度,同理获得土壤中心灰度。

在获得 16 区平均值后分别获得秸秆中心灰度和土壤背景灰度后,将其作为新的分类中心,重新采用 K-means 聚类方法对玉米秸秆图像进行分割,直到秸秆

中心灰度不再发生变化，则停止 K-means 聚类迭代。

K-means 聚类迭代停止后，基于灰度差异判断秸秆和土壤背景，对秸秆像素和土壤背景像素分别进行二值化，并计算秸秆像素数量，则玉米秸秆覆盖率计算式为

$$P_i = \frac{T_i}{N} \times 100\% \tag{3}$$

式中　P_i——分区寻优 K-means 聚类法计算的秸秆覆盖率，%

T_i——秸秆像素点数

N——图像像素点总数

图 5 为分区寻优聚类迭代流程图。

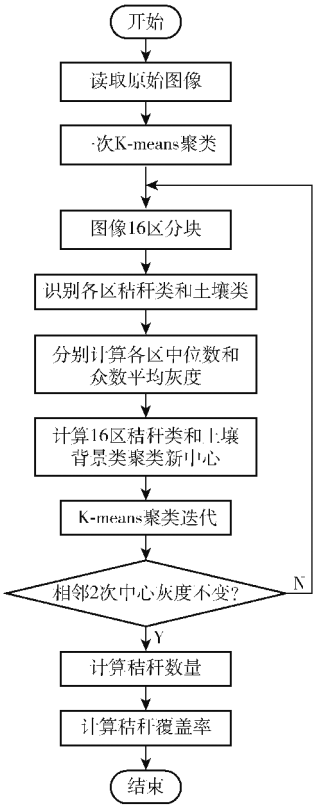


图 5　分区寻优聚类迭代流程图

Fig. 5　Iterative flow chart of partitioned optimization clustering

1.4　评价方法

为了评价农田秸秆覆盖率计算方法，采用相关系数、相对误差和误判率 3 个指标进行，其中相关系数用于评价农田秸秆覆盖率计算结果和人工检测结果相关程度；相对误差用于判断本计算方法的误差偏离程度；误判率是结合实际作业补贴发放场景，根据计算结果和实际补贴档次结果的判断准确率。相关系数 r、相对误差 E、误判率 J_e 计算式为

$$r = \frac{\sum_{k=1}^{n} (x_{1k} - \bar{x}_1)(x_{2k} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{1k} - \bar{x}_1)^2 \sum_{k=1}^{n} (x_{2k} - \bar{x}_2)^2}} \tag{4}$$

$$E = \frac{P_c - F}{F} \times 100\% \tag{5}$$

$$J_e = \frac{J_n}{J_n + J_r} \times 100\% \tag{6}$$

式中　x_{1k}——农田秸秆覆盖率标准值

x_{2k}——农田秸秆覆盖率检测值

$\bar{x}_1$——x_1 平均值

$\bar{x}_2$——x_2 平均值

P_c——秸秆覆盖率检测值

J_n——等级判断错误数

J_r——等级判断正确数

2　结果与讨论

2.1　K-means 和分块寻优法结合的图像处理结果

从图 6 中可以看出，分块寻优聚类迭代后秸秆分割效果和一次聚类相比较，细碎秸秆部分的识别效果得到提高。通过对不同场景的 100 幅图像分别进行分区寻优聚类迭代，获得结果如图 7 所示，与人工拉绳法和人工标记法相关系数分别为 0.716 1 和 0.906 8。如图 8 所示表明该方法可以有效获取玉米秸秆覆盖率。

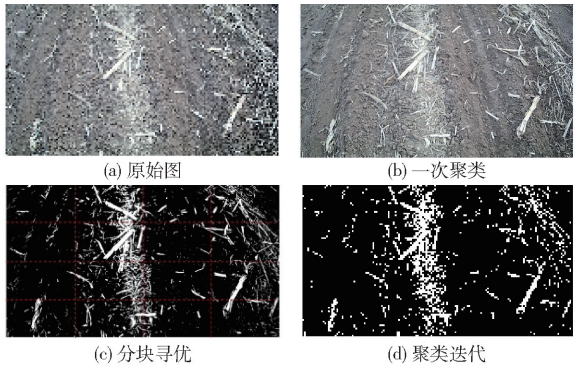


图 6　分区寻优 K-means 聚类过程

Fig. 6　K-means clustering process for partitioning optimization

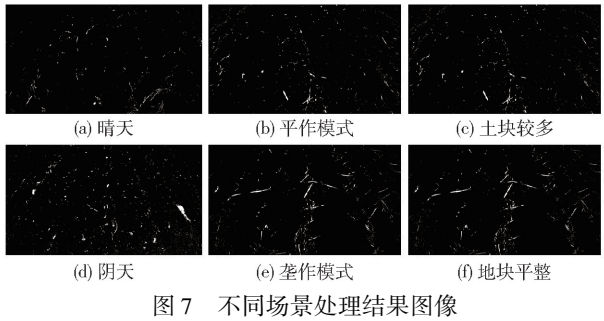


图 7　不同场景处理结果图像

Fig. 7　Process result images for different conditions

相关系数差别大的原因主要是田间秸秆变异系数较大，拉绳法覆盖区域与图像采集区域无法做到严格一一对应，造成相关系数较低，但也仍然达到了 0.70 以上，采用人工标记识别提高了一一对应度，

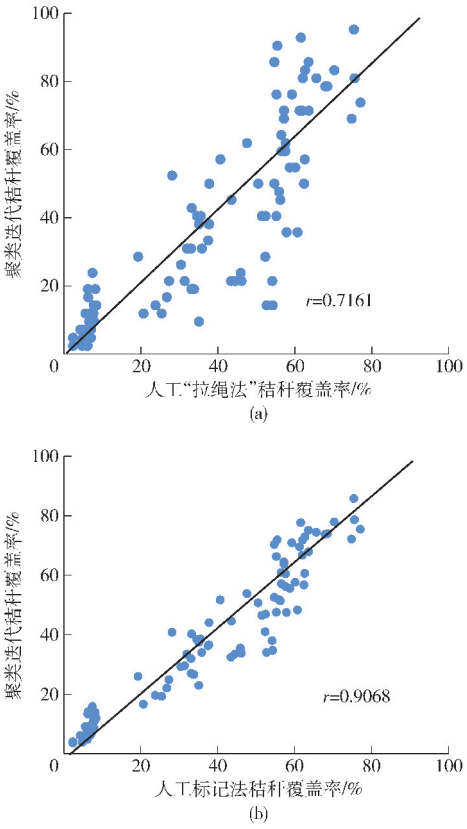


图 8 与 2 种人工方法相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient graph with two manual methods

相关系数达到 0.90 以上。

2.2 与 Otsu 及经典 K-means 方法对比

运用 Otsu 方法、经典 K-means 方法、分区寻优 K-means 聚类迭代法对 100 个样本分别进行处理，与人工标记法进行比较，结果如表 1 所示，结果表明分区寻优 K-means 聚类迭代法在平均误差和误判率上明显优于 Otsu 方法、经典 K-means 方法，其中平均误差降低了 45.6% 和 29.2%，误判率最小，为 7%。与 Otsu 方法和经典 K-means 方法相比较，本文算法由于增加了中心点优化更新、聚类迭代的环节，所需时间最长，为 810 ms，但处理时间小于 1 s，可以满足田间条件下的图像检测响应速度。

表 1 秸秆覆盖计算方法性能比较

Tab. 1 Performance of different corn straw coverage detection algorithms

方法	平均误差/%	误判率/%	处理时间/ms
Otsu	12.5	15	350
经典 K-means	9.6	11	490
分区寻优 K-means 聚类迭代	6.8	7	810

该方法实现了在不同环境条件下(不同天气、不同种植模式)均可实现秸秆的准确识别，在农机上连续稳定运行，具有一定的普适性。但在根茬裸露条件下，分区寻优聚类迭代容易将根茬底部识别为土壤，主要是因为只有根茬的地块中，根茬造成的阴影部分和根茬底部颜色与土壤背景相近，两者叠加影响，容易将秸秆错误识别为土壤，此种情况还需要进一步研究。

3 结论

(1)基于机器视觉技术，提出了一种基于 K-means 聚类和分区寻优结合的玉米秸秆覆盖率检测算法，实现了秸秆覆盖率快速检测，在不同环境条件下(不同天气、不同种植模式)均可实现秸秆的准确识别。

(2)该算法与人工标记法相关系数达到 0.906 8，平均误差为 6.8%，误判率为 7%，该算法为秸秆覆盖率在线计算提供了一种新的技术手段。

参 考 文 献

[1] 王庆杰,王宪良,李洪文,等. 华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):192-198.
WANG Qingjie, WANG Xianliang, LI Hongwen, et al. Effect of maize straw mulching on winter wheat growth in double cropping area of Northern China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(8):192-198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170822&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.022. (in Chinese)

[2] 王丽丽,徐岚俊,魏舒,等. 基于 Sauvola 与 Otsu 算法的秸秆覆盖率图像检测方法[J]. 农业工程,2017, 7(4): 29-35.
WANG Lili, XU Lanjun, WEI Shu, et al. Straw coverage detection method based on Sauvola and Otsu segmentation algorithm[J]. Agricultural Engineering,2017, 7(4): 29-35. (in Chinese)

[3] 于国庆,郝若帆,马洪涛,等. 基于图像处理和支持向量机的粉碎性秸秆覆盖率的图像识别方法研究[J]. 河南农业科学,2018,47(11):155-160.
YU Guoqing, HAO Ruofan, MA Hongtao, et al. Research on image recognition method based on SVM algorithm and ESN algorithm for crushed straw mulching rate[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2018,47(11):155-160. (in Chinese)

[4] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):1-21. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)

[5] 刘媛媛,张硕,于海业,等. 基于语义分割的复杂场景下的秸秆检测[J]. 光学精密工程,2020,28(1):200-211.
LIU Yuanyuan, ZHANG Shuo, YU Haiye, et al. Straw derection algorithm based on semantic segmentation in complex farm scenarios[J]. Optics and Precision Engineering,2020,28(1):200-211. (in Chinese)

[6] 刘媛媛,王跃勇,于海业,等.基于多阈值图像分割算法的秸秆覆盖率检测[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):27-35,55.
LIU Yuanyuan,WANG Yueyong,YU Haiye,et al. Detection of straw coverage rate based on multi threshold image segmentation algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):27-35,55. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.004. (in Chinese)

[7] 刘媛媛,孙嘉慧,张书杰,等. 用多阈值多目标无人机图像分割优化算法检测秸秆覆盖率[J]. 农业工程学报,2020,36(20):134-143.
LIU Yuanyuan, SUN Jiahui, ZHANG Shujie, et al. Detection of straw coverage based on multi-threshold and multi-target UAV image segmentation optimization algorithm[J]. Transactions of the CSAE,2020, 36(20): 134-143. (in Chinese)

[8] 王昌昆. 秸秆覆盖度遥感估算及其水分影响校正研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
WANG Changkun. Estimation of crop residue cover by remote sensing and correction of moisture effects on estimates[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2013. (in Chinese)

[9] 李志婷,王昌昆,潘贤章,等. 基于模拟 Landsat-8 OLI 数据的小麦秸秆覆盖度估算[J].农业工程学报,2016,32(增刊1):145-152.
LI Zhiting, WANG Changkun, PAN Xianzhang, et al. Estimation of wheat residue cover using simulated Landsat-8 OLI datas[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp.1): 145-152. (in Chinese)

[10] 李洪文,李慧,何进,等.基于人工神经网络的田间秸秆覆盖率系统研究[J].农业机械学报,2009,40(6):58-62.
LI Hongwen,LI Hui,HE Jin,et al. System for residue cover rate in field based on BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(6):58-62. (in Chinese)

[11] 李世卫,李洪文.基于计算机视觉的田间秸秆覆盖率计算[J].农机化研究,2009,31(1):20-22,25.
LI Shiwei, LI Hongwen. A counting method for residue cover rate in field based on computer vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(1): 20-22,25. (in Chinese)

[12] 李佳,吕程序,苑严伟,等. 快速傅里叶变换结合 SVM 算法识别地表玉米秸秆覆盖率[J]. 农业工程学报,2019,35(20):194-201.
LI Jia, LÜ Chengxu, YUAN Yanwei, et al. Automatic recognition of corn straw coverage based on fast Fourier transform and SVM[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 194-201. (in Chinese)

[13] 杨光,张洪熙,方涛,等.基于改进 AdaBoost 算法的秸秆识别与覆盖率检测技术[J/OL].农业机械学报,2021,52(7):177-183.
YANG Guang,ZHANG Hongxi,FANG Tao,et al. Straw recognition and coverage rate detection technology based on improved AdaBoost algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):177-183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210718&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.018. (in Chinese)

[14] 肖超云,朱伟兴.基于 Otsu 准则及图像熵的阈值分割算法[J].计算机工程,2007(14):188-189,209.
XIAO Chaoyun, ZHU Weixing. Threshold selection algorithm for image segmentation based on Otsu rule and image entropy[J]. Computer Engineering, 2007(14):188-189,209. (in Chinese)

[15] 郝若帆.基于分散样本图像的区域秸秆覆盖率估算研究[D].石家庄: 河北科技大学,2019.
HAO Ruofan. Research on estimation of regional straw coverage based on scattered sample images[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology,2019. (in Chinese)

[16] 方涛.基于 ARM 的深松深度及秸秆覆盖率监测系统研究[D].长春:长春理工大学,2020.
FANG Tao. Research on monitoring system of subsoil depth and straw coverage based on ARM[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology,2020. (in Chinese)

[17] DAUGHTRY C S T, HUNT Jr E R, MCMURTREY III J E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(1): 126-134.

[18] JAFARI V, ASADI R, RASEKHI, et al. Precise measurement of residue cover by means of image processing techniques[C]// International Conference on Agricultural Engineering Ageng, 1995.

[19] 闫宗正,陈素英,张喜英,等.秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1779-1791.
YAN Zongzheng, CHEN Suying, ZHANG Xiying, et al. Effects of amount and time of straw mulching on soil temperature, root growth and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of EcoAgriculture,2017,25(12):1779-1791. (in Chinese)

[20] 徐胜勇,段宏兵,李东臣,等.小麦茎秆截面参数显微图像测量系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):46-52.
XU Shengyong, DUAN Hongbing, LI Dongchen, et al. Measurement system for parameters of wheat stem section based on microimage processing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):46-52. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.006. (in Chinese)

[21] 王韦韦,吴晓芳,王晴晴,等.免耕直播下秸秆还田方式对夏玉米苗期生长的影响[J/OL].农业机械学报,2020,51(5):315-323.
WANG Weiwei,WU Xiaofang,WANG Qingqing,et al. Effects of different seedbed straw treatments on summer maize seedling growth under no-tillage direct seeding[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5): 315-323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.034. (in Chinese)

[22] XIAO B,TANG H,JIANG Y,et al. Brightness and contrast controllable image enhancement based on histogram specification[J]. Neurocomputing,2018,275: 2798-2809.

[23] 刘现悦,刘卉,王侨,等.农田秸秆覆盖率检测方法与试验[J].中国农机化学报,2021,42(2):203-208.
LIU Xianyue,LIU Hui,WANG Qiao, et al. Method and test of straw coverage detection in farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(2):203-208. (in Chinese)