doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.031

推扫式双相机高光谱成像系统设计与试验

史卓林　杨增玲　任朝霞　于涞源　王凌龙　黄圆萍　韩鲁佳
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：高光谱成像（HSI）是一种应用日益广泛的无损检测技术，HSI数据同时包含样品的空间与光谱信息，可用于表征物质性质的空间分布特征或快速获取内部异质性较强样品的性质特征。但受传感器以及光学器件材料性能和成本制约，单个高光谱相机仅能覆盖有限的光谱波段范围，但物质性质信息往往蕴含在不同波段的光谱中，导致使用单个相机监测物质性质的种类和精度受限。因此本文设计并搭建了一套推扫式双相机HSI系统，该系统在波段400~1 000 nm和1 000~2 500 nm的实际最小分辨率为140.31 μm和222.72 μm，光谱分辨率分别为2.8 nm和12 nm，共计有464个工作波段。使用C#和XAML语言编写了用户友好型数据采集软件MySpec HSI，可实现双相机HSI数据的便捷采集。为评估所搭建的推扫式双相机HSI系统性能，利用该系统对一组玉米样品冠层进行成像，建立了玉米冠层叶片生物量、叶绿素含量和全氮含量的偏最小二乘回归监测模型。基于可见近红外单相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模型的R_C^2分别为0.567、0.773和0.653，RMSEP分别为0.52 g、2.5和0.301%；基于短波红外单相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模型的R_C^2分别为0.566、0.719和0.652，RMSEP分别为0.53 g、2.8和0.309%，除叶绿素含量监测的可见近红外波段表现出略微优势外，其他情况二者的监测精度相当，表明基于任一单相机HSI均可实现玉米冠层叶片生物量、叶绿素含量和全氮含量监测。而基于双相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模型的R_C^2分别高达0.670、0.822和0.683，与单相机模型相比提升幅度最高分别为18%、14%和5%，RMSEP分别低至0.46 g、2.0和0.258%，与单相机模型相比降低幅度最高分别为13%、27%和17%，表明融合双相机HSI数据能有效提高玉米冠层叶片性质的监测精度。

关键词：玉米冠层；高光谱；推扫成像；双相机系统
中图分类号：TP391.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0288-07

Design and Test of Push-Broom Dual-camera Hyperspectral Imaging System

SHI Zhuolin　YANG Zengling　REN Zhaoxia　YU Laiyuan　WANG Linglong
HUANG Yuanping　HAN Lujia
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Hyperspectral imaging (HSI) is an increasingly utilized non-destructive testing technology that simultaneously captures spatial and spectral information of samples, making it suitable for characterizing the spatial distribution of material properties or quickly obtaining the properties of highly heterogeneous samples. However, due to the limitations imposed by sensor and optical material performance and cost, a single hyperspectral camera can only cover a limited spectral range, while the material property information is often distributed across different spectral bands. This limits the types and accuracy of material property monitoring when using a single camera. A push-broom dual-camera HSI system was designed and constructed. The system achieved a minimum spatial resolution of 140.31 μm and 222.72 μm in the spectral ranges of 400~1 000 nm and 1 000~2 500 nm, respectively, with spectral resolutions of 2.8 nm and 12 nm, covering a total of 464 working bands. A user-friendly data acquisition software, MySpec HSI, was developed by using C# and XAML to facilitate convenient dual-camera HSI data collection. To evaluate the performance of the constructed push-broom dual-camera HSI system, it was used to image the canopy of maize samples, and partial least squares regression models were established for monitoring biomass, chlorophyll, and total nitrogen content in maize canopy leaves. The R_C^2 values of the biomass, chlorophyll, and total nitrogen content monitoring models based on a visible-near-infrared (VNIR)

收稿日期：2024-07-20　修回日期：2024-09-23
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2002101)
作者简介：史卓林(1997—)，男，博士生，主要从事农业信息智能感知技术及装备研究，E-mail：shizhuolin@cau.edu.cn
通信作者：杨增玲(1977—)，女，教授，博士生导师，主要从事农业信息智能感知技术及装备研究，E-mail：yangzengling@cau.edu.cn

single camera were 0.567, 0.773, and 0.653, respectively, with RMSEP values of 0.52 g, 2.5, and 0.301%. For the shortwave-infrared (SWIR) single camera, the R_C^2 values were 0.566, 0.719, and 0.652, with RMSEP values of 0.53 g, 2.8, and 0.309%. Except for a slight advantage in chlorophyll monitoring by the VNIR band, the monitoring accuracy of the other properties was comparable between the two bands, indicating that either single-camera HSI can achieve biomass, chlorophyll, and nitrogen content monitoring of maize canopy leaves. However, the dual-camera model demonstrated superior performance, with R_C^2 values for biomass, chlorophyll, and total nitrogen content reaching 0.670, 0.822, and 0.683, respectively, representing improvements of up to 18%, 14%, and 5% compared with that of the single-camera models. The RMSEP values were decreased to 0.46 g, 2.0, and 0.258%, respectively, showing reductions of up to 13%, 27%, and 17% compared with that of the single-camera models, indicating that integrating dual-camera HSI data effectively enhanced the accuracy of monitoring maize canopy leaf properties.

Key words: maize canopy; hyperspectral imaging; push-broom imaging; dual-camera system

0　引言

高光谱成像(HSI)是一种应用日益广泛的无损检测技术[1-4]，HSI数据同时包含样品的空间与光谱信息[5]，可用于表征物质性质的空间分布特征[6-7]或快速获取内部异质性较强样品的性质特征[8]。由于存在技术优势，已有大量研究挖掘了将HSI应用于医学成像[9]、农情监测[10-15]、水质监测[16-18]、文物保护[19-22]、食品质控[23]和矿床搜寻[24]等领域。

但受传感器以及光学器件材料性能和成本制约，单个高光谱相机仅能覆盖有限的光谱波段范围[25-26]，但物质性质信息往往蕴含在不同波段的光谱中[27-28]，导致使用单个相机监测物质性质的种类和精度受限。目前，商品化的推扫式双相机HSI系统，如芬兰Specim公司的SisuROCK工作站和中国谷丰光电的高光谱品质分析系统，普遍采用相机垂直固定、样品依次平移通过采集箱的设计，以完成双相机HSI数据采集。然而，这种方式只能获取样品的顶视角信息，且在实际应用中，样品的可采集尺寸会受到采集箱尺寸限制。

本文旨在设计并搭建一套视角可变的推扫式双相机HSI系统，并编写对应的HSI数据采集软件，评价其光谱及空间解析性能，并以玉米冠层叶片的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测为例，验证通过系统集成多相机提高HSI系统性能的可行性。

1　系统硬件实现

1.1　系统原理

本文搭建的推扫式双相机HSI系统设计原理如图1所示。该系统主要组成元件包括：2个不同波段的推扫式高光谱相机、标准C口镜头、相机支架、卤素灯组和由高精度步进电机驱动的二维自动位移平台。卤素灯组安装在相机支架上，与2个高光谱相机间相对位置固定，每次扫描前预热30 min以上。扫描作业时，2个高光谱相机在高精度步进电机的驱动下，沿垂直于相机狭缝的方向，以设定速度扫过静止的已知反射率特性参比板和目标样品，携带目标信息的反射光由镜头收集进入高光谱相机，通过狭缝后经准直光路由棱镜分光打在面阵列检测器上转换为数字信号实现高光谱数据采集。

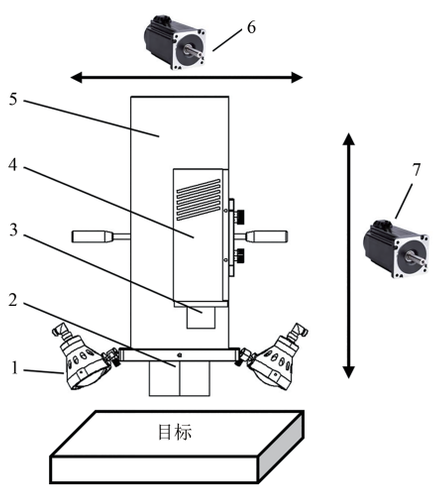
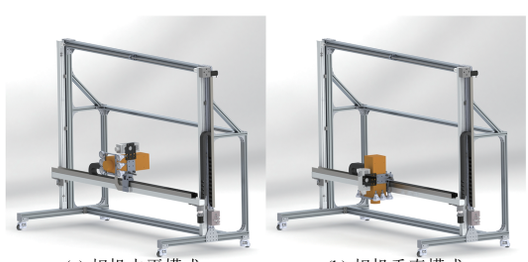


图1　推扫式双相机HSI系统设计原理图

Fig. 1　Schematic of push-broom dual-camera HSI system design

1. 卤素灯组　2. 短波红外镜头　3. 可见近红外镜头　4. 可见近红外相机　5. 短波红外相机　6. 水平步进电机　7. 垂直步进电机

通过机械设计实现相机支架翻转以便从侧面或顶部扫描样品，如图2所示，相机水平模式可以采集样品侧面高光谱数据，相机垂直模式可以采集样品顶部高光谱数据。



(a) 相机水平模式　　(b) 相机垂直模式

图2　推扫式双相机HSI系统渲染图

Fig. 2　Renderings of push-broom dual-camera HSI system

1.2 系统器件

系统采用的高光谱相机为波长范围为400~1 000 nm的Image-λ-V10E型可见近红外高光谱相机(Dualix,中国)和波长范围1 000~2 500 nm的SWIR3型短波红外高光谱相机(Specim,芬兰)。Image-λ-V10E型相机的面阵列传感器分辨率为960像素×176像素,可在同一时刻获得空间中一条线上960个像素点在400~1 000 nm内的176个波段数据;SWIR3型相机的面阵列传感器分辨率为384像素×288像素,可在同一时刻获得空间中一条线上384个像素点在1 000~2 500 nm内的288个波段数据,两相机狭缝宽度均为30 μm。为Image-λ-V10E型相机配置HSIA-OLE23型消色差成像镜头,其焦距23 mm,光圈f/2.4,视场角为21.6°;为SWIR3型相机配置HSIA-OLES30型增透成像镜头,其焦距30 mm,光圈f/2,视场角为17.6°,两镜头的工作距离均为300 mm到无限远。本系统的卤素灯组由6个配有柔光罩的50 W卤钨灯组成,其波长范围涵盖400~2 500 nm,使用直流电源为其供电以避免高光谱成像受交流电频闪影响。二维自动位移平台在水平方向行程为2.4 m,垂直方向行程为1.05 m,许载质量25 kg。

1.3 系统技术指标

1.3.1 光谱分辨参数

通过波段数量、光谱采样间隔和光谱分辨率3个参数评价系统的光谱分辨能力。

系统波段数量由高光谱相机的面阵列传感器决定,所使用的高光谱相机在400~1 000 nm范围内有176个工作波段,在1 000~2 500 nm范围内有288个工作波段,合计464个工作波段。在相同光谱范围内系统能获取的波段数量越多,光谱采样间隔则越小,也就表示系统数据采集越精细。光谱采样间隔σ计算公式为

$$\sigma = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{n} \tag{1}$$

式中 λ_{max}——波长范围最大点

λ_{min}——波长范围最小点

n——工作波段的数量

计算得到本系统在400~1 000 nm的光谱采样间隔为3.4 nm,在1 000~2 500 nm的光谱采样间隔为5.2 nm。

系统的光谱分辨率$\Delta\lambda$由入射狭缝宽度ω、分光棱镜色散率D和成像系统焦距f共同决定,其计算公式为

$$\Delta\lambda = \frac{\omega D}{f} \tag{2}$$

计算得到本系统在400~1 000 nm的光谱分辨率为2.8 nm,在1 000~2 500 nm的光谱分辨率为12 nm。

1.3.2 空间分辨率

光谱成像系统的空间分辨率受光学衍射极限分辨率δ_1和图像分辨率δ_2共同制约。其中δ_1的计算公式为

$$\delta_1 = \frac{0.61\lambda}{1\,000N} \tag{3}$$

式中 λ——波长

N——镜头数值孔径

本系统在400~1 000 nm的N值为0.187,计算得到δ_1范围为1.3 ~ 3.3 μm;在1 000~2 500 nm的N值为0.153,计算得到δ_1范围为4.0 ~ 10.0 μm。

δ_2受相机像素尺寸和相机系统放大率共同决定,相机能准确分辨样品的标准是像素尺寸小于等于所需分辨样品尺寸的一半,计算公式为

$$\delta_2 = \frac{2P}{M} \tag{4}$$

式中 P——像素尺寸

M——系统放大率

计算得到本系统在400~1 000 nm的图像分辨率最高为121.5 μm,在1 000~2 500 nm的图像分辨率最高为217.5 μm。比较光学衍射极限分辨率和图像分辨率可知,本系统的空间分辨率主要受限于图像分辨率:在400~1 000 nm波段范围内最高为121.5 μm,在1 000~2 500 nm波段范围内最高为217.5 μm。

为测试本系统的实际最小空间分辨率,在最小工作距离300 mm的物距下分别使用两相机对USAF-1951型标准分辨率板进行推扫,到达合焦极限时进行组号和元素号的读数,分辨率S的计算公式为

$$S = 2^{G + \frac{E-1}{6}} \tag{5}$$

式中 G——可分辨极限条纹组号

E——可分辨极限条纹元素号

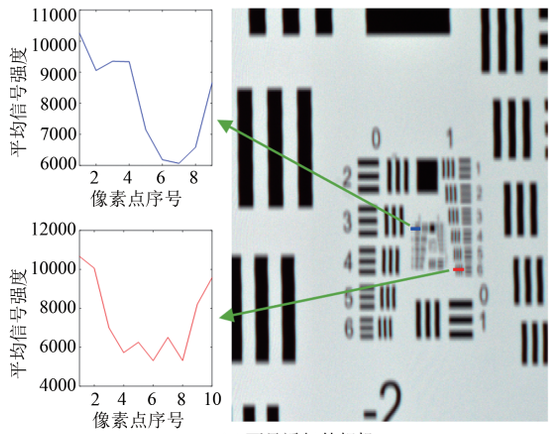
图3为系统使用两相机推扫USAF-1951型标准分辨率板到达分辨极限时的伪彩图像。图3a为可见近红外相机的推扫结果,系统可清晰分辨第1组第6号线对,但无法清晰分析第2组第1号线对,计算得到分辨率为3.56线对/mm,表明可识别140.31 μm以上的线宽,与理论计算值相符;图3b为短波红外相机的推扫结果,系统可清晰分辨第1组第2号线对,但无法清晰分析第1组第3号线对,计算得到分辨率为2.24线对/mm,表明可识别222.72 μm以上的线宽,与理论计算值相符。因此本系统在400~1 000 nm波段范围内的实际分辨率为140.31 μm,在1 000~2 500 nm波段范围内的实际分辨率为222.72 μm。

而本系统使用了集成128细分驱动器的步进电机(Vince,中国)和每转2 mm的减速系统,可实现相机在推扫方向以每脉冲0.078 μm的距离精度运动,远远高于两相机140.31 μm和222.72 μm的空间分辨率,满足测量对于运动精度的需要。

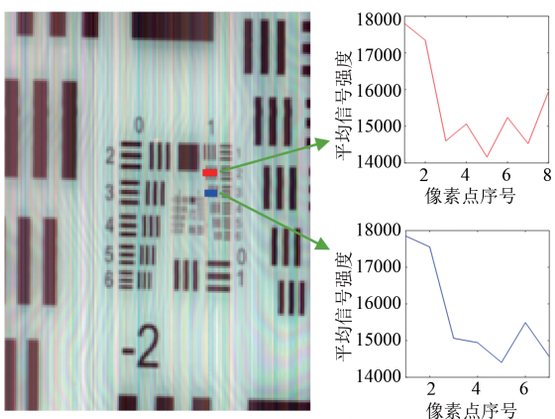
2 系统软件实现

为搭建的推扫式双相机HSI系统编写数据采集软件,命名为MySpec HSI。该软件是在Windows 11操作系统的Visual Studio 2022开发环境中,基于.NET 8.0平台框架和Windows Presentation Foundation(WPF)UI框架,使用C#和XAML语言编译完成。计算机处理器为AMD

Ryzen 9 7940HS，运行内存为64 GB。



(a) 可见近红外相机



(b) 短波红外相机

图3　USAF-1951型标准分辨率板的推扫伪彩图像

Fig. 3　Push-broom pseudo-color images of USAF-1951 standard resolution target

MySpec HSI主要功能由公共(Utility)和扫描(Scan)2个选项卡组成，其界面分别见图4和图5。在Utility选项卡中，在水平电机(Horizontal motor)和垂直电机(Vertical motor)选项组中分别调控水平和垂直电机的串口连接参数和归零，在电机控制(Motor control)选项组中手动控制相机的水平和垂直移动，在可见近红外相机(VIS-NIR camera)和短波红外相机(SWIR camera)选项组中设置对应相机在空间维与光谱维的采样点数、曝光时间、帧率以及推扫速度，并提供传感器信号值实时预览以便测样前进行手动调焦。在Scan选项卡中，在可见近红外相机控制(VIS-NIR camera control)和短波红外相机控制(SWIR camera control)选项组中分别选择预览可见近红外高光谱图像和短波红外高光谱图像时伪彩图RGB三通道使用的光谱波点以及相机开始扫描与结束扫描位置点，通过扫描(Scan)和停止(Stop)按钮控制扫描任务的启停，并在可见近红外高光谱图像预览(VIS-NIR HSI preview)和短波红外高光谱图像预览(SWIR HSI preview)中实时预览两相机采集高光谱数据的伪彩图像。

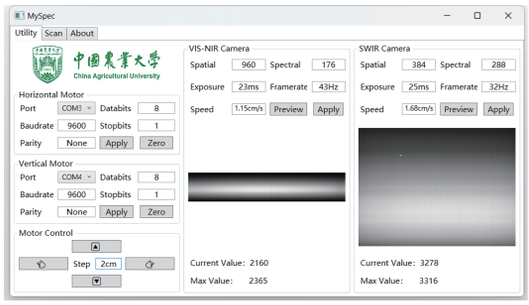


图4　MySpec HSI软件公共界面

Fig. 4　Utility interface of MySpec HSI software

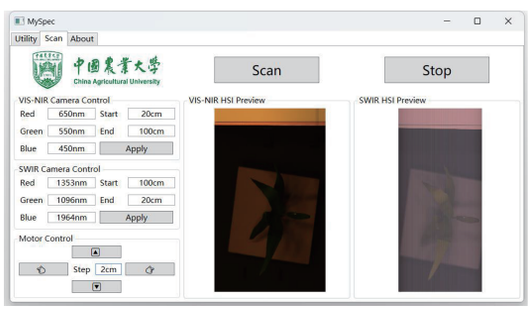


图5　MySpec HSI软件扫描界面

Fig. 5　Scan interface of MySpec HSI software

3　试验测试

为了评估所搭建的推扫式双相机HSI系统性能，基于该系统采集了一组玉米样品冠层高光谱图像，并通过获取的高光谱图像实现玉米的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测。

3.1　样品的采集与处理

2023年9月，在中国农业大学曲周实验站内一处长期定位试验田(36°52'20.9"N，115°01'20.0"E)采集90株玉米作为研究对象，采集的玉米品种为郑单958，但来自不同耕作方式、秸秆还田处理和氮肥施用量的小区。

玉米样品采集后即刻运往室内利用本文搭建系统采集高光谱数据，然后将玉米植株上三叶从植株分离，使用叶绿素仪(SPAD-502型，Konica Minolta，日本)在每个叶片上均匀测量5个点位的SPAD值，计算每株3个叶片共计15个点位的平均值作为该株玉米冠层叶片的SPAD值，代表植株的叶绿素含量水平。随后，将样品放入105℃烘箱杀青30 min，并在75℃温度下烘干。待样品质量不再变化时，称取质量为生物量值。使用TissueLyser II型球磨仪(QIAGEN，德国)研磨样品直至全部通过20目筛。通过Vario Macro型元素分析仪(Elementar，德国)测定玉米冠层叶片全氮含量，每个样品测定两组平行数据取平均值。

3.2　高光谱数据的采集与处理

3.2.1　玉米冠层高光谱图像获取

利用本文搭建的双相机HSI系统采集玉米冠层高光谱数据。将玉米插入花盆，以上二叶自然水平处为基准，以物距70 cm扫描样品，其余参数设定如下：可见近

红外相机设定曝光时间23 ms、帧率43 Hz、推扫速度1.15 cm/s;短波红外相机设定曝光时间25 ms、帧率32 f/s、推扫速度1.68 cm/s。在双相机同步扫描时,将短波红外相机帧率缩限至21.9 f/s,推扫速度将同为1.15 cm/s,此时数据质量不受影响。两相机均通过手动微调镜头对焦环实现精准对焦;使用30 cm×30 cm 95%反射率白板(SphereOptics型,德国)作为反射率校正材料,每间隔30 min采集一次相机暗电流信号,扫样过程中控制室内环境稳定,尽可能控制环境杂散光,扫样过程示意见图6。



图6 暗室高光谱数据获取过程示意图

Fig. 6 Schematic of darkroom hyperspectral data acquisition process

3.2.2 反射率校正

利用扫描白板的数据和暗电流信号数据将玉米冠层叶片高光谱原始数据校正为反射率数据。每个数据点校正时均使用来自传感器相应像元的白板信号和暗电流信号。反射率计算公式

$$R_{ijk}=\frac{H_{ijk}-B_{jk}}{C(W_{jk}-B_{jk})} \tag{6}$$

式中 R_{ijk}——高光谱原始数据第i行j列像素第k个波段的反射率

H_{ijk}——第i行j列像素第k个波段的原始数字信号值

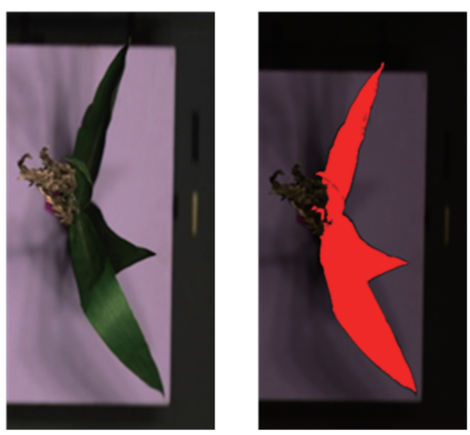
W_{jk}——扫描白板第j列像素第k个波段的原始数字信号值

B_{jk}——暗电流数据第j列像素第k个波段的原始数字信号值

C——白板反射率,取95%

3.2.3 光谱的提取与融合

通过划定感兴趣区域(Region of interest,ROI)从玉米冠层叶片高光谱反射率立方体数据中提取玉米冠层叶片光谱,具体步骤如下:①对于可见近红外高光谱数据:取近红外波长814 nm处与红色波长674 nm处的反射率计算比值植被指数(Ratio vegetation index,RVI),将比值大于2的像素标记为掩膜区域;对于短波红外高光谱数据:取波长1 753 nm处与波长1 919 nm处的反射率计算RVI,将大于2的像素标记为掩膜区域。②将掩膜中标记为植物的像素连通为区域并将面积小于100像素点的区域从掩膜中剔除,之后检查确定所有掩膜都正确标记到了玉米冠层叶片区域,如图7所示。③从玉米冠层叶片高光谱反射率立方体数据中掩膜区域对应的光谱提取并计算平均光谱,即为对应样品的玉米冠层叶片光谱。将从两相机数据提取的相同样品的反射率光谱在波长1 000 nm处首尾拼接作为对应样品的波段400~2 500 nm完整可见近红外反射率光谱。



(a) 高光谱反射率伪彩色图 (b) 标记掩膜区域的高光谱反射率伪彩色图

图7 玉米冠层叶片ROI区域标记掩膜示意图

Fig. 7 Schematic of ROI mask for corn canopy leaves

3.2.4 定标模型的建立与评估

按玉米冠层叶片指标梯度以3∶1的比例将数据集划分为校正集和外部独立验证集,为保证定标模型的适用范围将极值样品划分到校正集。分集前后的单株玉米冠层叶片实验室分析结果见表1。生物量为0.79~5.16 g,叶绿素含量为30.4~57.7,全氮含量为1.681%~4.095%。从含量分布来看,所测样品的性质有较大的变异,这与样品来自不同耕作方式、秸秆还田处理方式以及肥料施用量试验小区的情况相符。总体样品集、校正集与验证集的均值和标准差(Standard deviation,SD)均接近,表明校正集和验证集均具有良好的代表性。

建立模型前首先利用均值方差化(Autoscaling)消除光谱中不同变量间的尺度差异,然后采用偏最小二乘回归(Partial least squares regression,PLSR)方法建立单株玉米冠层叶片生物量、叶绿素含量和全氮含量的定量模型。选用校正集和独立外部验证集的决定系数(R_C^2和R_P^2)和均方根误差(Root mean square error, RMSE,校正集和独立外部验证集的RMSE分别表示为RMSEC和RMSEP)作为模型评价指标。较高的R_C^2和较低的RMSEC表明定标效果良好,较高的R_P^2和较低的RMSEP代表定标模型的预测性能良好,接近的RMSEC与RMSEP表明模型未出现过拟合。

RMSEP没有较大差异表明模型未出现过拟合。基于可见近红外单相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模

表 1　玉米冠层叶片样品实验室化学值统计结果

Tab.1　Statistical results of laboratory chemical values of corn canopy leaf samples

	性质	样品数量	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
生物量	全集	90	0.79 g	5.16 g	2.06 g	0.79 g	0.38
	校正集	67	0.79 g	5.16 g	2.05 g	0.79 g	0.39
	外部独立验证集	23	0.91 g	3.74 g	2.10 g	0.79 g	0.38
叶绿素含量	全集	90	30.4	57.7	46.2	5.09	0.11
	校正集	67	30.4	57.7	46.1	5.09	0.11
	外部独立验证集	23	36.4	57.0	46.6	5.18	0.11
全氮含量	全集	90	1.681%	4.095%	2.720%	0.472%	0.174
	校正集	67	1.681%	4.095%	2.705%	0.466%	0.172
	外部独立验证集	23	2.118%	3.874%	2.762%	0.496%	0.179

型的 R_C^2 分别为 0.567、0.773 和 0.653，RMSEP 分别为 0.52 g、2.5 和 0.301%；基于短波红外单相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模型的 R_C^2 分别为 0.566、0.719 和 0.652，RMSEP 分别为 0.53 g、2.8 和 0.309%，除对叶绿素含量的监测相较可见近红外存在些许劣势外其他指标二者的监测精度相当。而基于双相机的生物量、叶绿素含量和全氮含量监测模型与单相机相比均有提升，其监测生物量、叶绿素含量和全氮含量的 R_C^2 分别高达 0.670、0.822 和 0.683，提升幅度最高分别为 18%、14% 和 5%，RMSEP 分别低至 0.46 g、2.0 和 0.258%，降低幅度最高分别为 13%、27% 和 17%。表明融合更多波段的光谱信息有助于提高推扫式 HSI 系统监测玉米冠层叶片性质的精度。

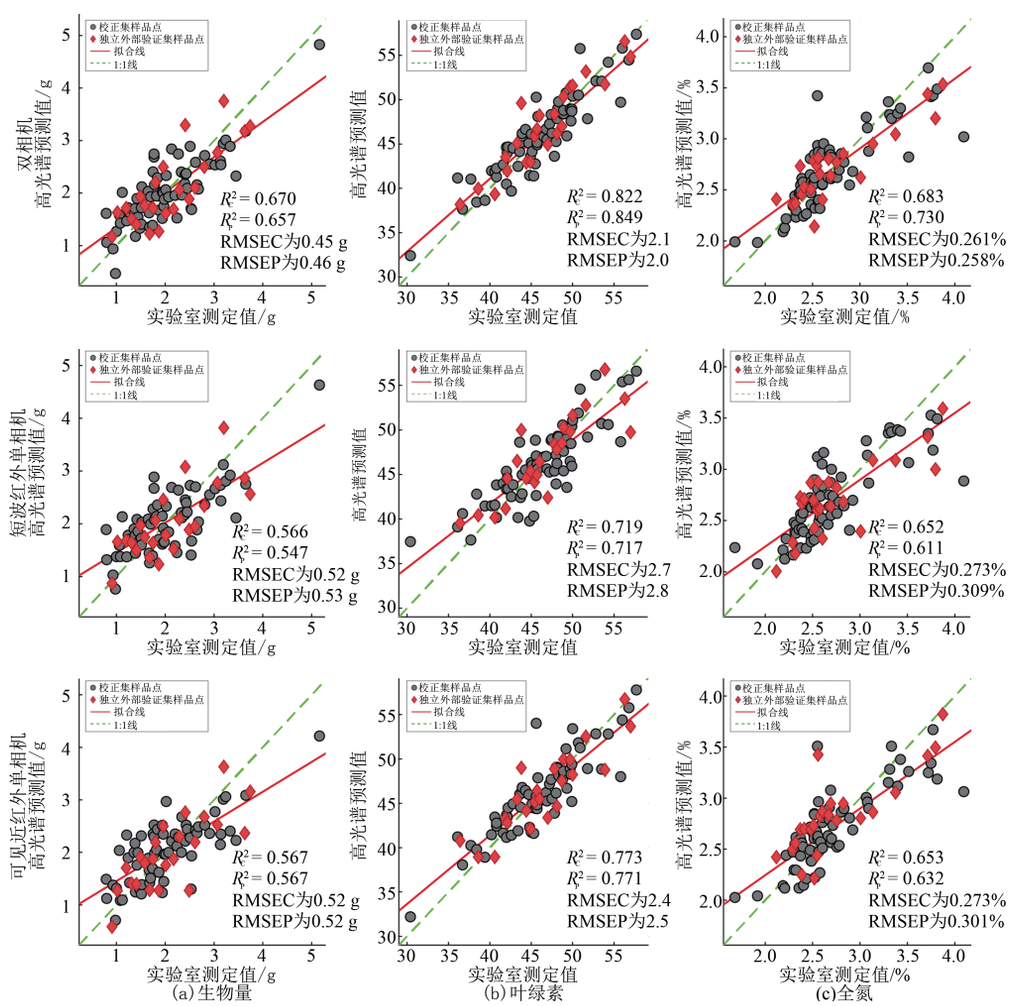


图 8　基于推扫式双相机 HSI 系统的玉米冠层叶片性质监测模型评价图

Fig. 8　Evaluation of maize canopy leaf property monitoring models based on push-broom dual-camera HSI system

4　结束语

利用 2 个不同波段的推扫式高光谱相机、标准 C 口镜头、相机支架、卤素灯组和由高精度步进电机驱动的二维自动位移平台搭建了一套推扫式双相机 HSI 系统，

该系统在波长400~1 000 nm和1 000~2 500 nm的实际最小分辨率为140.31 μm和222.72 μm，光谱分辨率分别为2.8 nm和12 nm，共计有464个工作波段。同时利用C#和XAML语言编写了适用于该系统硬件的用户友好型数据采集软件MySpec HSI，可部署在用户Windows操作系统的计算机实现双相机HSI数据的采集。利用该系统对一组玉米样品冠层进行成像，发现基于任一单相机HSI数据均可实现玉米冠层叶片性质监测，而基于双相机HSI数据玉米冠层叶片生物量、叶绿素含量和全氮含量的监测误差降低13%、27%和17%，表明通过系统集成融合多台相机是提高HSI系统性能的可行方案。

参 考 文 献

[1] CHANG Chein-I. Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification[M]. Springer Science & Business Media, 2003.

[2] KHAN M J, KHAN H S, YOUSAF A, et al. Modern trends in hyperspectral image analysis: a review[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14118 - 14129.

[3] SELCI S. The future of hyperspectral imaging[J]. Journal of Imaging, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019, 5(11): 84.

[4] DATTA D, MALLICK P K, BHOI A K, et al. Hyperspectral image classification: potentials, challenges, and future directions[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 1: 3854635.

[5] ELMASRY G, SUN Dawen. CHAPTER 1—principles of hyperspectral imaging technology[M]//SUN Dawen. Hyperspectral imaging for food quality analysis and control. San Diego: Academic Press, 2010: 3 - 43.

[6] NAGANATHAN G K, GRIMES L M, SUBBIAH J, et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 225 - 233.

[7] ELMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Chemical-free assessment and mapping of major constituents in beef using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(2): 235 - 246.

[8] GE C, YANG Z, FAN X, et al. A new spectral simulating method based on near-infrared hyperspectral imaging for evaluation of antibiotic mycelia residues in protein feeds[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 319: 124536.

[9] LU G, FEI B. Medical hyperspectral imaging: a review[J]. Journal of Biomedical Optics, SPIE, 2014, 19(1): 010901.

[10] LU B, DAO P D, LIU J, et al. Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture[J]. Remote Sensing, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 12(16): 2659.

[11] ZHU W, SUN Z, YANG T, et al. Estimating leaf chlorophyll content of crops via optimal unmanned aerial vehicle hyperspectral data at multi-scales[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105786.

[12] ZHANG J, CHENG T, GUO W, et al. Leaf area index estimation model for UAV image hyperspectral data based on wavelength variable selection and machine learning methods[R]. In Review, 2020.

[13] LI D, CHEN J M, ZHANG X, et al. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248: 111985.

[14] MAO Zhihui, DENG Lei, DUAN Fuzhou, et al. Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 93: 102198.

[15] SUN Q, GU X, CHEN L, et al. Monitoring maize canopy chlorophyll density under lodging stress based on UAV hyperspectral imagery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106671.

[16] 马成才，马永春，罗福正. 基于无人机倾斜摄影的河湖水质污染范围监控方法研究[J]. 环境科学与管理，2024，49(5)：133 - 137.
MA Chengcai, MA Yongchun, LUO Fuzheng. Monitoring method for water pollution range of rivers and lakes based on drone tilt photography[J]. Environmental Science and Management, 2024, 49(5): 133 - 137. (in Chinese)

[17] 梁文广，吴勇锋，石一凡，等. 基于无人机高光谱的太浦河水质反演[J]. 测绘通报，2024(4)：29 - 34.
LIANG Wenguang, WU Yongfeng, SHI Yifan, et al. Inversion of Taipu River water quality parameters by UAV hyperspectral imaging technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(4): 29 - 34. (in Chinese)

[18] 白立飞. 基于无人机高光谱遥感的水体CHL-a反演[J]. 测绘与空间地理信息，2024，47(7)：123 - 125，132.
BAI Lifei. Water CHL-a inversion based on UAV hyperspectral remote sensing [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(7): 123 - 125, 132. (in Chinese)

[19] FISCHER C, KAKOULLI I. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications[J]. Studies in Conservation, Routledge, 2006, 51(Supp.1): 3 - 16.

[20] 刘宁，傅凡，张曼. 基于高光谱技术的隆长寺建筑彩画分析[J]. 室内设计与装修，2024(5)：126 - 127.

[21] 李广华，陈垚，孙雪剑，等. 大幅面高光谱扫描系统在文物研究中的应用[J]. 红外，2024，45(2)：42 - 52.
LI Guanghua, CHEN Yao, SUN Xuejian, et al. Application of large-format hyperspectral scanning system in cultural relics research [J]. Infrared, 2024, 45(2): 42 - 52. (in Chinese)

[22] 贺渝龙. 基于图谱融合的纸质文物霉斑检测方法研究[D]. 重庆：重庆理工大学，2024.
HE Yulong. Research on mold spot detection method for paper artifacts based on graph fusion[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024. (in Chinese)

(下转第305页)

[18] 曹英丽,赵雨薇,杨璐璐,等.基于改进DeepLabv3+的水稻田间杂草识别方法[J].农业机械学报, 2023, 54(12): 242 - 252.
CAO Yingli, ZHAO Yuwei, YANG Lulu, et al. Weed identification method in rice field based on improved DeepLabv3+ [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 242 - 252.(in Chinese)

[19] 王生生, 王顺, 张航, 等. 基于轻量和积网络及无人机遥感图像的大豆田杂草识别[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 81 - 89.
WANG Shengsheng, WANG Shun, ZHANG Hang, et al. Soybean field weed recognition based on light sum-product networks and UAV remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE , 2019, 35(6): 81 - 89.(in Chinese)

[20] CHEN Y, XIN R, JIANG H Y, et al. Refined feature fusion for in-field high-density and multi-scale rice panicle counting in UAV images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108032.

[21] 王金鹏,何萌,甄乾广,等.基于改进COF-YOLO v8n的油茶果静态与动态检测计数方法[J].农业机械学报, 2024, 55(4): 193 - 203.
WANG Jinpeng, HE Meng, ZHEN Qianguang, et al. *Camellia oleifera* fruit static and dynamic detection counting based on improved COF-YOLO v8n[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 193 - 203. (in Chinese)

[22] 肖伸平,赵倩颖,曾甲元,等. 基于YOLO-DCL的复杂环境油茶果遮挡检测与计数研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(10):318 - 326.
XIAO Shenping, ZHAO Qianying, ZENG Jiayuan, et al. *camellia oleifera* fruits occlusion detection and counting in complex environments based on improved YOLO-DCL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):318 - 326.(in Chinese)

[23] 鲍文霞,苏彪彪,胡根生,等.基于FE-P2Pnel的无人机小麦图像麦穗计数方法[J].农业机械学报, 2024,55(4):155-164.
BAO Wenxia, SU Biaobiao, HU Gensheng, et al. Method for counting wheat ears in UAV images based on FE-P2Pnet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(4):155-164.(in Chinese)

[24] WANG Q F, CHENG M, XIAO X P, et al. An image segmentation method based on deep learning for damage assessment of the invasive weed *Solanum rostratum* Dunal[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106320.

[25] WANG Q F, CHENG M, HUANG S, et al. A deep learning approach incorporating YOLO v5 and attention mechanisms for field real-time detection of the invasive weed *Solanum rostratum* Dunal seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107194.

[26] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:779 - 788.

[27] JOCHER G, CHAURASIA A, QIU J. Ultralytics YOLO (Version 8.0.0) [Computer software]. https://github.com/ultralytics/ultralytics.

[28] OUANG D, HE S, ZHANG G, et al. Efficient multi-scale attention module with cross-spatial learning[C]//2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023: 1 - 5.

[29] 申阳,王冲宇,赵佳怡,等.基于改进YOLOv8和多目标跟踪的鱼苗计数方法[J].农业工程学报, 2024, 40(16): 163 - 170.
SHEN Yang, WANG Chongyu, ZHAO Jiayi, et al. Fry counting method using improved YOLOv8 and multi-target tracking [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 163 - 170.(in Chinese)

[30] 黄成龙,张忠福,华向东,等.基于改进Faster R-CNN和Deep Sort的棉铃跟踪计数[J].农业机械学报, 2023, 54(6): 205 - 213.
HUANG Chenglong, ZHANG Zhongfu, HUA Xiangdong, et al. Cotton boll tracking and counting based on improved Faster R-CNN and Deep Sort[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 205 - 213.(in chinese)

[31] 赵新龙,顾臻奇,李军.基于YOLO v5s和改进SORT算法的黑水虻幼虫计数方法[J].农业机械学报, 2023, 54(7): 339 - 346.
ZHAO Xinlong, GU Zhenqi, LI Jun. Larvae of black soldier fly counting based on YOLO v5s network and improved SORT algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 339 - 346.(in Chinese)

[32] BEWLEY A, GE Z, OTT L, et al. Simple online and realtime tracking[C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2016: 3464 - 3468.

(上接第294页)

[23] GOWEN A A, O'DONNELL C P, CULLEN P J, et al. Hyperspectral imaging - an emerging process analytical tool for food quality and safety control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(12): 590 - 598.

[24] CLARK R N, SWAYZE G A. Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice and snow, and other materials: The USGS tricorder algorithm[C]//Pasadena: Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop, 1995.

[25] LÓPEZ M, HOFER H, STOCK K D, et al. Spectral reflectance and responsivity of Ge- and InGaAs-photodiodes in the near-infrared: measurement and model[J]. Applied Optics, Optica Publishing Group, 2007, 46(29): 7337 - 7344.

[26] MIAO Y, LIN H, LI B, et al. Review of Ge (GeSn) and InGaAs avalanche diodes operating in the SWIR spectral region [J]. Nanomaterials, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, 13(3): 606.

[27] PRICE J C. On the information content of soil reflectance spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 33(2): 113 - 121.

[28] KOTHARI S, SCHWEIGER A K. Plant spectra as integrative measures of plant phenotypes[J]. Journal of Ecology, 2022, 110(11): 2536 - 2554.