基于高光谱成像的肉品检测去条带噪声方法

赵茂程[1,2]，宋　瑞[1]，汪希伟[1]，范凯旋[1]，陈加新[1]，顾　越[1]

（1. 南京林业大学机械电子工程学院，南京 210037；2. 泰州学院船舶与机电工程学院，泰州 225300）

摘　要：推扫式高光谱成像系统通常因电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）各像元响应不一致而产生条带噪声，该研究以猪肉为研究对象，设计一种基于多块标准反射率板进行逐波段逐像素相对辐射定标的去除条带噪声方法。该方法基于最小二乘法，利用不同反射率标准板的反射率值与 CCD 输出值，采用多项式拟合出接近于各个波段逐像元真实响应函数的拟合响应函数；选取每一波段图像中的任一像元作为参考，将其余像元与参考像元的拟合响应函数做差，作为其余像元的补偿函数，再采用样本的输出值加补偿值以校正样本。分别采用逐波段逐像素相对辐射定标法和传统矩匹配法对猪肉高光谱图像进行处理，并以四阶标准反射率板各反射区均值与参考值的绝对误差评估反射率校正结果。结果表明，逐波段逐像素相对辐射定法在有效去除条带噪声的同时，不会产生新的噪声，同时能够保持原始图像的灰度分布，校正后图像条带系数最大值比原始图像减少 63.5%；相比矩匹配法，反射率误差大幅下降，其中条带系数最大波段（200 波段）4 个反射区的绝对误差为 0.003～0.089，随机抽取波段（300 波段）4 个反射区的绝对误差为 0.009～0.083。该研究为消除条带噪声提供了一种可靠方法，同时为提高后续基于推扫式光谱成像的指标空间可视化精度奠定了良好的基础。

关键词：高光谱；最小二乘法；推扫式高光谱成像系统；标准反射率板；相对辐射定标；条带噪声

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.031

中图分类号：TP391.41；O657.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-6819(2022)-08-0271-10

赵茂程，宋瑞，汪希伟，等．基于高光谱成像的肉品检测去条带噪声方法[J]．农业工程学报，2022，38(8)：271-280.
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.031　　http://www.tcsae.org

Zhao Maocheng, Song Rui, Wang Xiwei, et al. Striping noise removal method in meat detection based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 271-280. (in Chinese with English abstract)　　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.031　　http://www.tcsae.org

0　引　言

高光谱成像技术最早应用于高空遥感领域[1]，近年来，在谷物[2-6]、果蔬[7-11]、肉品[12-13]等农林产品的质量安全检测中得到了广泛的应用。高光谱图像通常包含待测物的空间、光谱和辐射三重信息，不仅能表现被摄对象空间分布的影像特征，同时也能以其中一像元或像元组为目标获取他们的辐射强度以及光谱特征[14-15]。对于推扫型高光谱成像系统，线阵电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）由许多个像元组成，受像元间响应的差异、像元电子学增益及偏置、光学镜头的衰变和焦平面污染等因素影响，各个像元输出亮度值（Digital Number，DN）值存在不一致现象，这种不一致在原始图像中通常以条带噪声的形式表现出来，不仅掩盖了图像中真实的数据信息、对图像质量产生严重影响，而且会穿过化学计量学模型，最终出现在反映被测指标空间分布情况的可视化预测图中，干扰其空间特征的呈现及解读[16-17]。

现有去除条带噪声方法可分为两类：图像后处理和传感器辐射定标，其中，图像后处理中基于相对辐射定标原理的方法有直方图匹配法和矩匹配法，矩匹配法是在直方图匹配法的基础上改进而来，可以获得比直方图匹配法更好的去除条带噪声效果，但是此方法不适合对复杂被摄目标物进行校正。传感器辐射标定是实验室辐射定标法，需要通过积分球系统进行[18-19]。该方法首先假设传感器各像元的响应函数为线性，利用待定标传感器对不同辐射亮度的积分球成像，计算出相对定标系数，利用其对影像进行相对辐射校正，使 CCD 各个像元的响应输出信号统一到一个水平面上[20-21]。该方法需要用积分球，但是积分球价格昂贵，且需要专业人员操作，不适合一般用户；另外这种方法的思想基于传感器各个像元是线性，但在实际应用中，CCD 对入射光能量的光电响应特性有时会表现出一定的非线性特征[22]。

本文针对实验室辐射定标法去条带噪声存在的不足，以猪肉为样本，探索一种基于相对辐射定标原理、利用多块标准反射率板替代积分球，对推扫型高光谱成像系统采集的高光谱图像进行校正的方法，以去除条带噪声，以期为猪肉产品质量的无损检测提供技术支撑。

1　试验及方法

1.1　试验材料及设备

1.1.1　试验材料

本文以猪肉为样本，用 7 块边长为 25 cm 的正方形反射率标准板对高光谱成像系统进行标定，采集猪肉切片高光谱图像。反射率标准板的反射率分别为 2%、5%、10%、20%、50%、75%和 99%，型号分别为 SRT-02-100、SRT-05-100、SRT-10-100、SRT-20-100、SRT-50-100、

收稿日期：2021-10-11　　修改日期：2022-03-11

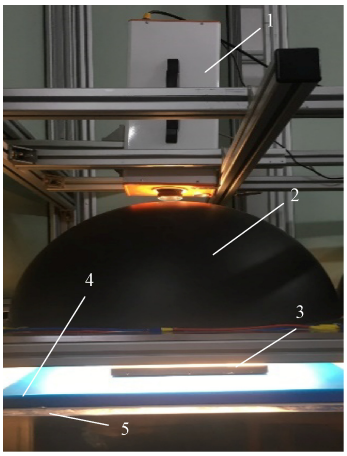
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（32102071）

作者简介：赵茂程，教授，博士生导师，研究方向为计算机视觉在农林工程中的应用、食品安全检测方法与工程。Email：mczhao@njfu.edu.cn

SRT-75-100 和 SRT-99-100，四阶标准反射率板型号为 SRT-MS-100，具有良好的光学朗伯性、稳定性和面均匀性，可形成均匀反射辐亮度进入相机，产自美国新罕布什尔州蓝菲光学有限公司。

1.1.2 试验设备

本文采用的近红外高光谱成像系统由中国四川双利合谱成像技术有限公司生产，标称光谱范围为 900～1 700 nm 的 GaiaField-N17E-N3 定制型号推扫式系统。配备产自芬兰奥卢 SPECIM 公司的 OLES22 型红外镜头和 Imspector N7E 型成像光谱仪，以及由比利时勒文 Xenics 公司生产的 InGaAs 型高灵敏度相机。该系统的成像光谱仪和相机可以相对镜头做线性运动，在相对静止状态下采集图像。为克服图像畸变、以及推扫式高光谱成像系统产生的条带噪声，本文采用外部扫描成像，将该成像系统通过支架搭建在传送台上方，通过传送带实现目标样本与相机之间的相对运动，从而完成图像采集。本文推扫高光谱成像系统示意图如图 1 所示。



1.推扫式高光谱相机 2.穹顶 3.反射率标准板 4.背景托盘 5.传送台
1.Push-broom hyperspectral camera 2.Dome 3.Reflectance standard panel 4.Background tray 5.Transmission desk

图 1 推扫式高光谱成像平台

Fig.1 Push-broom hyperspectral imaging platform

1.2 试验方法

1.2.1 图像采集

采集猪肉切片高光谱图像，以及 7 块标准反射率板及暗噪高光谱图像。猪肉切片中第 200 波段高光谱图像存在明显纵向条带噪声，因此本文选用该样本此波段的高光谱图像数据作为试验数据；暗噪图像为反射率为 0 的黑色背景数据立方体，通过盖上镜头盖、使光无法被镜头捕捉的方式获得。采集图像前，将高光谱相机与照明系统预热 30 min；高光谱图像数据由 Specview 软件获取。采集图像时为使采集的图像不超出 250 mm 的边长标准板范围，系统扫描长度设置为 200 mm，成像光谱仪曝光物距为 430 mm，图像分辨率为 640×580 像素；为确保图像最优，经过多次试验，确定曝光时间为 6 ms，传送带移动速度为 28 mm/s。

1.2.2 图像处理

高光谱原始图像为灰度图，由于人眼对彩色的分辨能力远远高于对灰度的分辨能力，所以本文使用 Matlab 中的伪色彩变换映射函数将原始灰度图像转化成彩色表示。经过试验，为获得图像细节最佳分辨力，颜色图调整为 Colorbar（hot），色带以图像的平均值为中心，6 倍标准差范围。

矩匹配法是传统基于相对辐射定标原理的高光谱去条带噪声方法[23-27]。该方法的思想是假设每个传感器所探测的目标具有相同均衡的辐射分布，所记录数据的变化也与辐射校正的增益与偏移成线性关系，因此可以通过调整每个传感器的均值方差到某一参考值，以达到去除条带噪声的目的。

本文提出并设计逐波段逐像素相对辐射定标法（简称相对定标法），通过使用多块标准反射率板获取不同波段下各个像元的拟合响应函数，从而校正高光谱图像。通过与传统矩匹配法的比较，研究基于相对定标法在消除条带噪声的实际效果。

1.2.3 条带噪声评定

表示相对辐射定标精度的方法通常有平均标准差法、广义噪声法和条带系数法。前两种方法是在相机入瞳处辐射亮度均匀稳定的情况下计算相对辐射定标精度，以评价目标样本图像本身均匀性；条带系数法是将每一像元沿推扫方向计算列均值，对每个像元列均值与其左右两个像元列均值进行比较，以评估该像元条带噪声的严重程度；条带系数越大代表此像元存在条带噪声的情况越严重，反之越轻微。该方法对不同像元的非一致性比较敏感，其评估结果不依赖于图像均匀性，所以本文采用条带系数作为评定反射物相对辐射定标效果的定量指标。计算方法如式（1）所示[16]：

$$\delta_i = \frac{\left|\overline{a_i} - \frac{1}{2}\left(\overline{a_{i-1}} + \overline{a_{i+1}}\right)\right|}{\frac{1}{2}\left(\overline{a_{i-1}} + \overline{a_{i+1}}\right)} \tag{1}$$

式中 i=2，3，…，n−1；n 为像元个数；δ_i 表示第 i 个像元的条带系数；$\overline{a_i}$ 表示第 i 个像元采集的 DN 列均值。

1.2.4 反射率校正

利用式（2）计算样本的相对反射率，以进行标准反射率校正，得到反射率图像 R：

$$R = \frac{D_0 - A_b}{A_w - A_b} \times 100\% \tag{2}$$

式中 R 为校正后的光谱图像；D_0 为校正前的光谱图像；A_b 为黑色背景的光谱图像；A_w 为白色 99%反射率标准板的光谱图像。

利用参考像元拟合响应函数的反函数计算经相对定标法处理后的亮度图的反射率，从而得到校正后的反射率图像 R：

$$R = S_k^{(1)\text{-}1}(Z) \tag{3}$$

式中 Z 为经过相对定标法校正后的亮度图像；R 为校正后的反射率图像；$S_k^{(1)\text{-}1}$ 是第 k 波段下参考像元拟合响应函数的反函数。

本文选取四阶标准反射率板中条带噪声较为严重的第 200 波段，和随机选取的第 300 波段作为试验数据，

分别对两个波段进行反射率校正，得到各区域反射率均值，用均值与参考值的绝对误差评估反射率校正结果，绝对误差越小，其结果越佳，反之越差。

2　相对辐射定标去条带噪声方法设计

2.1　相对辐射定标基本原理

2.1.1　辐射定标

辐射定标是指传感器探测值的标定过程方法，用以确定传感器入口处的准确辐射值，分为绝对定标和相对定标。绝对定标是对目标做定量描述，得到目标辐射绝对值，建立传感器测量的数字信号与对应的辐射能量之间的数量关系，即定标系数。

相对辐射定标又称为传感器探测元件归一化，是为了校正传感器中各个探测元件响应度差异而对传感器测量到的原始亮度值进行归一化的一种处理过程，其本质是通过建立数字图像的灰度值与实际辐射量之间的数学关系来实现信息的真实性表征，校正在图像信息获取过程中因光学相机、像感器和后处理链路的缺陷所造成的入射信号失真。相对定标只得出目标中某一点辐射亮度与其他点的相对值，从应用上讲比绝对辐射定标更加重要[28]。

2.1.2　相对定标法

1）基本思路

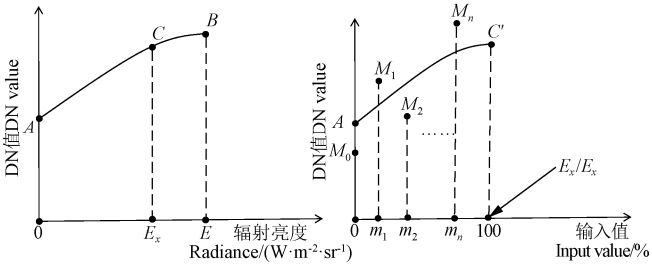
相对定标法是对目标样本高光谱原始图像逐波段进行相对辐射定标，即先对同一波段的高光谱图像逐像素校正，再对高光谱图像逐波段校正。根据最小二乘法，拟合出各个像元的拟合响应函数，选取其中一个像元作为参考像元，把其余的像元校正到该参考像元上，使得相同的输入值通过不同的像元可以得到相同的输出值。

2）利用标准反射率板拟合像元响应函数的基本原理

利用标准反射率板可以拟合出像元真实响应函数曲线中某一段经过横坐标归一化后的响应函数，如图 2 所示，其中图 2a 为像元真实响应函数曲线，图 2b 为横坐标$[0,E_x]$区间归一化后的像元拟合响应函数曲线。图 2a 中曲线 $\overline{AB}$ 为某一像元真实的响应函数，横坐标表示相机的入瞳辐射亮度，通常使用积分球获得；纵坐标表示像元输出 DN 值，A 点为相机的暗噪，即没有光照时像元的读出值。假设光源在入瞳前的辐射亮度为 E_x（未知），输出值为 C（未知）；图 2b 为将横坐标$[0,E_x]$区间进行归一化处理后得到的响应函数曲线 $\overline{AC'}$；将光源分别通过反射率值为 0、m_1%、m_2%、…、m_n%的标准反射率板，形成具有不同辐射能量等级的均匀辐射源进入相机，由于存在误差，使得输出 DN 值 M_0、M_1、M_2、…、M_n 与曲线 $\overline{AC'}$ 发生偏离，以这些输入（反射率）与输出值对应点拟合出曲线 $\overline{AC'}$，即为拟合响应函数。

2.2　算法设计

如图 3 所示为去条带噪声校正流程图。本算法包括两部分，分别通过系统标定与图像校正实现。第一部分为系统标定，主要包括标准反射率板及暗噪图像采集、标准板及暗噪图像列的误差处理、各像元拟合响应函数及补偿函数获取；第二部分为图像校正，主要包括图像列各像素值对应的反射率值计算、图像列各像素值补偿值计算以及通过补偿值校正图像。



a. 真实像元响应函数曲线
a. Response function curve of real pixel

b. 拟合的像元响应函数曲线
b. Response function curve of fixed pixel

注：DN 为输出亮度值；图中变量 A、B、C、M_0、M_1、M_2、…、M_n 为像元的输出亮度值；变量 E、E_x 为相机入瞳前的辐射亮度值；变量 m_1、m_2、…、m_n 为标准反射率板的反射率值。

Note: DN value is digital number; A, B, C, M_0, M_1, M_2 … M_n are the intensity outputs of a sensor-pixel; E and E_x are incident radiance values entering pupil; m_1, m_2 ... m_n are the reflectance values of the standard panel.

图 2　拟合像元响应函数原理图

Fig.2　Fitting response function of a sensor-pixel

2.2.1　系统标定

1）图像采集

采集反射率值位于(0,1]之间的反射率标准板（分别为 m_1%、m_2%、…、m_n%，其中 $m_1<m_2<\cdots<m_n$）和 0%反射率黑色背景的光谱图像，对光谱图像按照反射率值由小到大重新编号为 $l(l=1，2，\cdots，r+1)$，每块反射率标准板都充满相机视野。采集标准反射率板时，高光谱成像系统的各个参数被调试为一个合适的固定值，如光照强度、传送带速度以及相机帧速率、增益和曝光时间等。高光谱图像是一个数据立方体，本文用一个三维矩阵表示（矩阵的宽度维为 M，长度维为 N，光谱维度为 S，高光谱推扫方向沿长度维 N 方向，如式（4）所示：

$$\left\{A_{m\times n,k}^{(l)}\right\}\quad l=1,2,\cdots,r+1\qquad k=1,2,\cdots,s \tag{4}$$

$$A_{m\times n,k}^{(l)}=\begin{pmatrix} a_{11}^{(l,k)} & a_{12}^{(l,k)} & \cdots & a_{1n}^{(l,k)} \\ a_{21}^{(l,k)} & a_{22}^{(l,k)} & \cdots & a_{2n}^{(l,k)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1}^{(l,k)} & a_{m2}^{(l,k)} & \cdots & a_{mn}^{(l,k)} \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中 m 表示行数，即像元采集的像素点个数；n 表示列数，即像元个数；s 表示波段数；$A_{m\times n,k}^{(l)}$ 表示第 k 波段下 r+1 个矩阵集中第 l 矩阵；元素 $a_{ij}^{(l,k)}$ 为第 k 波段下 r+1 个矩阵集中第 j（$j\in n$）个像元采集的像素点中第 i 个像素值（DN 值）。

2）误差处理

①剔除粗大误差

沿推扫方向采集的每个像元标准反射率板数据均含有误差，其中粗大误差是数值较大的像素值误差，它会对测量结果产生明显的歪曲。本文采用 3σ 准则判断像素值是否含有粗大误差，判断式为式（6）[29]：

$$\left|v_{ij}^{(l,k)}\right|>3\sigma_j^{(l,k)}$$
$$i=1,2,\cdots,m\qquad j=1,2,\cdots,n\qquad k=1,2,\cdots,s \tag{6}$$

$$\sigma_j^{(l,k)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(v_{ij}^{(l,k)}\right)^2}{m-1}} \tag{7}$$

$$v_{ij}^{(l,k)} = a_{ij}^{(l,k)} - \frac{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{(l,k)}}{m} \tag{8}$$

式中 $v_{ij}^{(l,k)}$ 为第 k 波段下第 l 个矩阵中第 j 个像元所采集的第 i 个像素值的残余误差，$\sigma_j^{(l,k)}$ 为第 k 波段下第 l 个矩阵中第 j 个像元采集的像素值标准差的估计值。如果在像素列中存在大于 $3\sigma_j^{(l,k)}$ 的残余误差的观测值，应予剔除。

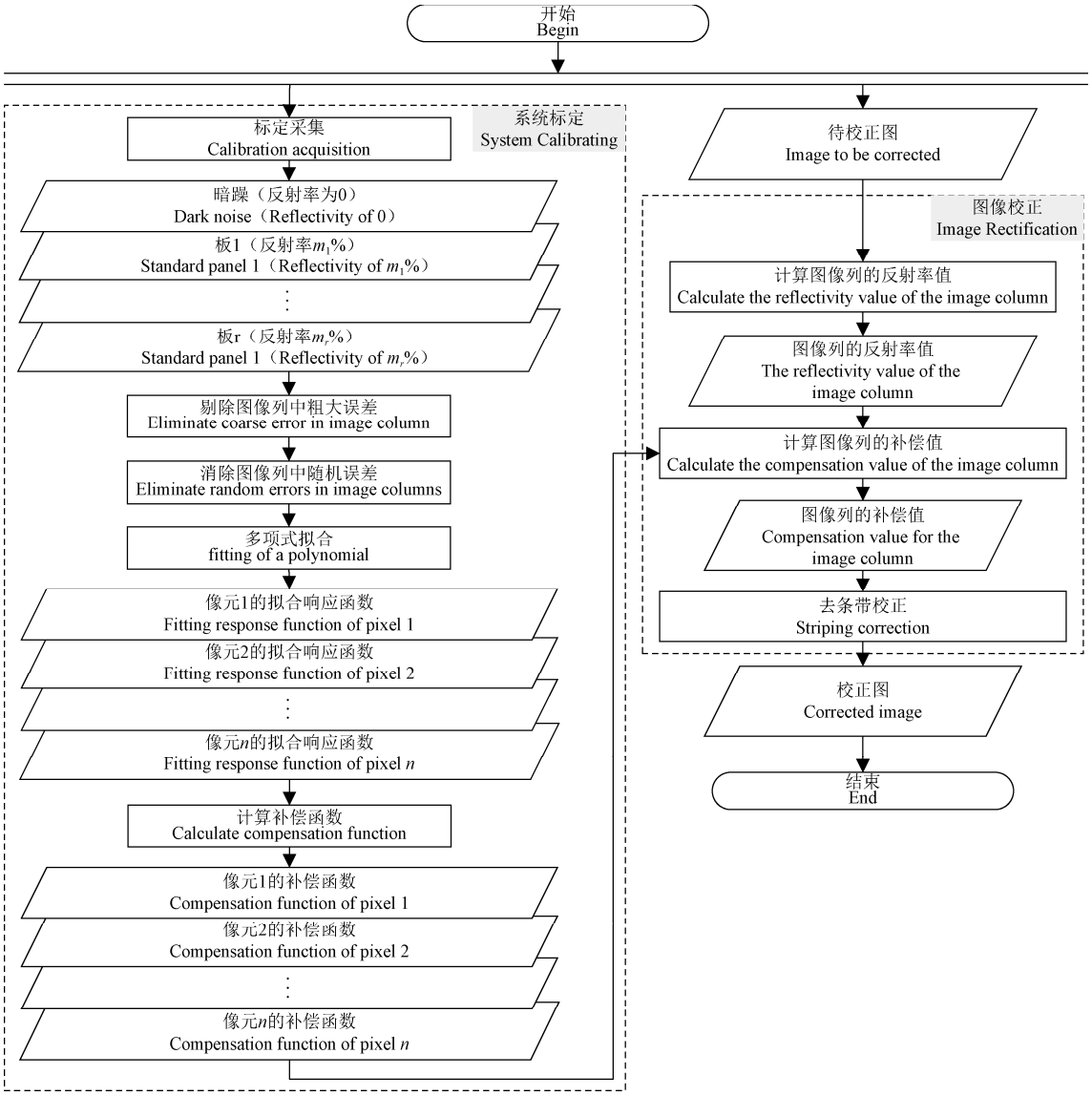


图 3 去条带校正流程图

Fig.3 Algorithm flow chart of destriping noise

每经一次粗大误差剔除，剩下的数据要重新计算 σ 值，再以新的较小 σ 值为依据，进一步判断是否还存在粗大误差，直至无粗大误差为止。

剔除粗大误差后的 r+1 个图像矩阵为矩阵集式（9）：

$$\left\{A_{p\times n,\ k}^{(l)}\right\} \quad l=1,2,\cdots,r+1 \quad k=1,2,\cdots,s \tag{9}$$

$$A_{p\times n,\ k}^{(l)} = \begin{pmatrix} a^{(l,k)}{}_{11} & a^{(l,k)}{}_{12} & \cdots & a^{(l,k)}{}_{1n} \\ a^{(l,k)}{}_{21} & a^{(l,k)}{}_{22} & \cdots & a^{(l,k)}{}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a^{(l,k)}{}_{p_1^{(l,k)}1} & a^{(l,k)}{}_{p_2^{(l,k)}2} & \cdots & a^{(l,k)}{}_{p_n^{(l,k)}n} \end{pmatrix} \tag{10}$$

式中 $p_j^{(l,k)}$（j=1，2，…，n）为第 k 波段下第 l 个矩阵中第 j 个像元像素列中剔除粗大误差后剩余像素的个数，且 $p_j^{(l,k)} \leqslant m$。

②消除随机误差

为消除像素列中随机误差的影响，对各个像素值按列求均值，得到第 k 波段下 r+1 个行向量，即为向量集（11）：

$$\left\{H_{1\times n,k}^{(l)}\right\} \quad l=1,2,\cdots,r+1 \quad k=1,2,\cdots,s \tag{11}$$

$$H_{1\times n,k}^{(l)} = \left(J_1^{(l,k)} \quad J_2^{(l,k)} \quad \cdots \quad J_n^{(l,k)}\right) \tag{12}$$

$$J_j^{(l,k)} = \sum_{i=1}^{p_j^{(l,k)}} a^{(l,k)}{}_{ij} \Big/ p_j^{(l,k)} \quad j=1,2,\cdots,n \tag{13}$$

式中 $J_j^{(l,k)}$ 为第 k 波段下剔除粗大误差后第 l 个矩阵中第 j 个像元的像素列中 DN 算术均值，以此值作为最后测量结果。

将公式（11）中第 k 波段下 r+1 个行向合并为一个 $(r+1)n$ 矩阵，形成式（14）：

$$B_{(r+1)\times n,k}=\begin{pmatrix} J_1^{(1,k)} & J_2^{(1,k)} & \cdots & J_n^{(1,k)} \\ J_1^{(2,k)} & J_2^{(2,k)} & \cdots & J_n^{(2,k)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ J_1^{(r+1,k)} & J_2^{(r+1,k)} & \cdots & J_n^{(r+1,k)} \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$Y_{(r+1)\times 1,k}^{(j)}=\begin{pmatrix} J_j^{(1,k)} & J_j^{(2,k)} & \cdots & J_j^{(r+1,k)} \end{pmatrix}^T$$

$$j=1,\cdots,n \quad k=1,2,\cdots,s \tag{15}$$

式中列向量 $Y_{(r+1)\times 1,k}^{(j,k)}$ 中的元素为第 k 波段下第 j 个像元在 r+1 个不同辐射通量等级下所得 DN 均值。

3）获取补偿函数

①多项式拟合

选用多项式系 1，x，x^2，…，x^m，…为函数空间 S 的基底函数，根据最小二乘法，对每个像元在不同反射率标准板下，反射率值与其对应的 DN 均值进行多项式拟合，即将列向量 X=（0%、m_1%、m_2%、…、m_r%)^{T} 与公式（15）中各列向量对应元素进行拟合，得到第 k 波段下 n 个像元的拟合响应函数，函数集如式（16）所示：

$$\left\{S_k^{(j)}(x)\right\} \quad j=1,\cdots,n \quad k=1,2,\cdots,s \tag{16}$$

$$S_k^{(j)}(x)=a_0^{(j,k)}+a_1^{(j,k)}x+\cdots a_m^{(j,k)}x^m\ (m<r+1) \tag{17}$$

式中 m 表示拟合多项式最高阶数；$S_k^{(j)}(x)$ 为第 k 波段下第 j 个像元的最小二乘解。$a_0^{(j,k)}$、$a_1^{(j,k)}$、…、$a_n^{(j,k)}$ 为第 j 个像元拟合响应函数的系数，其求解公式如式（18）所示：

$$\begin{pmatrix} (1,1) & (x,1) & \cdots & (x^m,1) \\ (1,x) & (x,x) & \cdots & (x^m,x) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (1,x^m) & (x,x^m) & \cdots & (x^m,x^m) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a_0^{(j,k)} \\ a_1^{(j,k)} \\ \vdots \\ a_m^{(j,k)} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} (f,1) \\ (f,x) \\ \vdots \\ (f,x^m) \end{pmatrix} \tag{18}$$

$$(x^u,x^v)=(0\%)^{u+v}+(m_1\%)^{u+v}+\cdots+(m_r\%)^{u+v} \tag{19}$$

$$(f,x^t)=J_j^{(1,k)}\cdot(0\%)^t+J_j^{(2,k)}\cdot(m_1\%)^t+\cdots+J_j^{(r+1,k)}\cdot(m_r\%)^t \tag{20}$$

式中 u, v, t=0,1, …, m；$(0\%)^{u+v}$ 表示 0%的 u+v 次方……；$J_j^{(1,k)}\cdot(0\%)^t$ 表示 $J_j^{(1,k)}$ 与 0%的 t 次方乘积……。

本文采用 Matlab 中曲线拟合工具包计算该波段中每一个像元的多项式系数，并以平方误差作为指标。当指标达到最小时，作为该波段每个像元多项式拟合响应函数的系数。

②补偿函数获取

补偿函数定义为参考像元拟合响应函数与需要校正像元拟合响应函数之差。本文选取第一个像元作为参考像元，其拟合响应函数作为参考函数；将其余像元校正到参考像元行上，使其余像元在相同输入下，得到与参考像元相同的输出值。参考像元拟合响应函数为 $S_k^{(1)}(x)$。

补偿函数为参考像元与该校正像元拟合响应函数之差，如式（21）所示：

$$\left\{w_k^{(j)}(x)=S_k^{(1)}(x)-S_k^{(j)}(x)\right\} \tag{21}$$

式中 k=1，2，…，s；j=1，2，…，n；$w_k^{(j)}(x)$ 为第 k 波段下第 j 个像元的补偿函数。

2.2.2　图像校正

1）列像素值反射率计算

待校正图像用矩阵表示为式（22）：

$$E_{m\times n,k}=\begin{pmatrix} e_{11}^{(k)} & e_{12}^{(k)} & \cdots & e_{1n}^{(k)} \\ e_{21}^{(k)} & e_{22}^{(k)} & \cdots & e_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ e_{m1}^{(k)} & e_{m2}^{(k)} & \cdots & e_{mn}^{(k)} \end{pmatrix} \tag{22}$$

式中 k=1，2，…，s；元素 $e_{ij}^{(k)}$ 为第 k 波段下第 j 个像元像素列中第 i 个像素 DN 值。

通常像元的响应函数在定义域上为单调递增函数，所以第 j 个像元的拟合响应函数反函数为公式（23）：

$$x_{ij}^k=S_k^{(j)-1}(y_{ij}^k),\ x_{ij}^k\in[0,1] \tag{23}$$

式中 k=1，2，…，s；i=1，2，…，m；j=1，2，…，n；y_{ij}^k 为第 k 波段下第 j 个像元采集的像素列中第 i 个 DN 值；x_{ij}^k 为第 j 个像元采集的第 i 个 DN 值代入反函数公式求得的反射率值。

将公式（22）中各元素值代入公式（23），求出各像素的反射率矩阵为式（24）：

$$\begin{pmatrix} x_{11}^k & x_{12}^k & \cdots & x_{1n}^k \\ x_{21}^k & x_{22}^k & \cdots & x_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1}^k & x_{m2}^k & \cdots & x_{mn}^k \end{pmatrix} \tag{24}$$

$$x_{ij}^k=S_k^{(j)-1}(e_{ij}^{(k)}) \tag{25}$$

式中 i=1，2，…，m；j=1，2，…，n；元素 $e_{ij}^{(k)}$ 为待校正图像矩阵中第 k 波段下第 j 个像元采集像素列中第 i 个像素 DN 值。

2）列像素值补偿值计算

将公式（24）中各元素代入公式（21），求出待校正图像补偿函数矩阵为式（26）：

$$W_{m\times n,k}=\begin{pmatrix} w_k^{(1)}(x_{11}^k) & w_k^{(2)}(x_{12}^k) & \cdots & w_k^{(n)}(x_{1n}^k) \\ w_k^{(1)}(x_{21}^k) & w_k^{(2)}(x_{22}^k) & \cdots & w_k^{(n)}(x_{2n}^k) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_k^{(1)}(x_{m1}^k) & w_k^{(2)}(x_{m2}^k) & \cdots & w_k^{(n)}(x_{mn}^k) \end{pmatrix} \tag{26}$$

3）通过补偿校正图像

最后得到校正后的图像矩阵为式（27）：

$$Z_{m\times n,k}=E_{m\times n,k}+W_{m\times n,k} \tag{27}$$

式中 k=1，2，…，s；$Z_{m\times n,k}$ 为相对辐射校正后的第 k 波段图像矩阵。

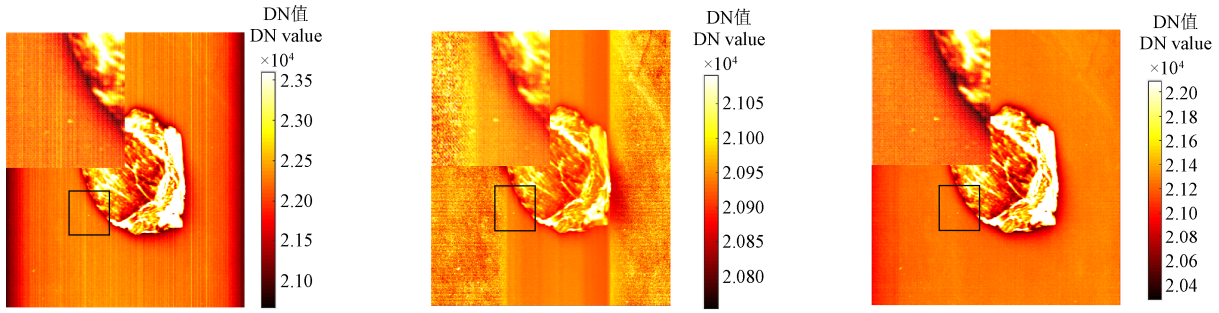
3　结果与分析

3.1　样本图像条带噪声处理结果比较

图 4 为猪肉切片样本的原始图像及分别经过矩匹配

法、相对定标法处理后的图像。通过调节色阶使图像细节纹理明显可视，颜色越深，代表 DN 值越小，反之越大。

从图 4a 可以看出，猪肉切片原始图像含有许多清晰的纵向亮条带；经矩匹配法处理后，如图 4b 所示，条带噪声虽然得到了抑制，但出现了新噪声，产生了“带状效应（Banding effect）[30]”；经相对定标法处理后，如图 4c 中所示，不仅条带噪声得到有效消除，而且没有出现新的噪声。



a. 原始图像
a. Original image

b. 矩匹配法校正后的图像
b. Image corrected by moment matching method

c. 相对定标法校正后的图像
c. Image corrected by relative scaling method

注：各图黑框中的局部区域放大显示于左上角。
Note: Top-left quarter of each image is the zoom of the local part marked in black frame.

图 4 猪肉切片原始图像及经过不同方法相对辐射定标校正后的图像

Fig.4 Original images of pork slices and images corrected by relative radiometric calibration with different methods

图 5 表示猪肉切片样本在第 200 波段处图像分别经矩匹配法和相对定标法处理后，各像元列方向 DN 均值统计图。

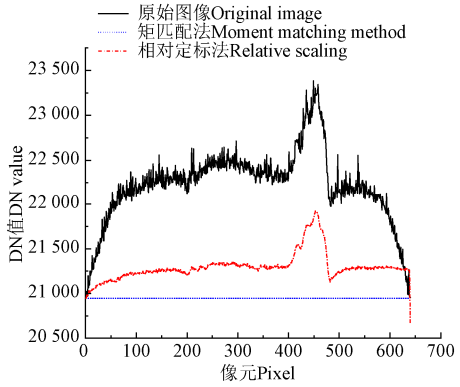


图 5 相对辐射校正前后猪肉切片第 200 波段图像各像元列均值统计图

Fig.5 Statistical charts of the mean values of each pixel column in the 200th band image of pork slices before and after relative radiation correction

从图 5 中可以看出，在猪肉切片样本的右侧脂肪区出现了明显的峰值，样本原始图像列方向 DN 均值曲线随像元分布存在一些较为明显的不规则毛刺，这与图像中明显的纵向亮条带位置相对应；经矩匹配法校正后，DN 均值曲线近似为一条水平线，虽然抑制噪声效果明显，但与原始图像均值曲线变化趋势相差较大，不能反映处理前样本图像的灰度分布；经相对定标法校正后，图像 DN 均值曲线比较光滑，且变化趋势与原始图像保持一致，说明消除噪声的同时，能够反映处理前样本图像灰度分布的实际情况。

通过计算可知，猪肉切片原始图像条带系数最大值为 2.0×10^{-2}；矩匹配法校正后，样本图像条带系数最大值为 8.6×10^{-15}，噪声消除效果非常显著；基于相对定标法校正，样本图像条带系数最大值为 7.3×10^{-3}，比原始图像减少 63.5%，噪声消除效果也十分显著。

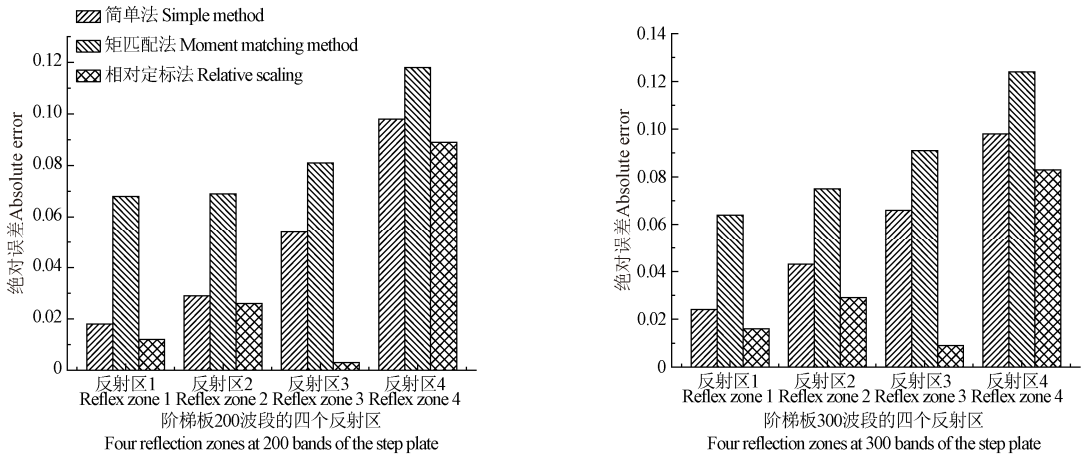
3.2 样本图像反射率校正结果比较

本文用三种方法对图像反射率进行校正。简单法是直接利用相对反射率校正公式（即式（2））对原始亮度图像进行反射率校正；矩匹配法是对经矩匹配修正后的亮度图像进行反射率校正；相对定标法是利用参考像元拟合响应函数的反函数（即式（3））对经相对定标法处理后的亮度图像进行反射率校正。表 1 是对四阶标准反射率板第 200、300 波段反射率校正的结果。四阶标准反射率板各区域的标称反射率均值分别为 0.12、0.25、0.5、0.99，经厂商校正后出具的证书参考值分别为 0.140、0.317、0.596、0.989 和 0.145、0.325、0.605、0.988。经相对定标法校正后，在第 200 波段，4 个反射区的绝对误差分别为 0.012、0.026、0.003、0.089，在第 300 波段，4 个反射区的绝对误差分别为 0.016、0.029、0.009、0.083。图 6 是用三种方法校正后的绝对误差绘制的柱状图。

表 1 四阶阶梯板 200 波段和 300 波段的反射率校正结果

Table 1 Reflectance correction results of the 200th band and the 300th band of the four-step panel

波段 Band	方法 Method	反射区 1 Zone 1	反射区 2 Zone 2	反射区 3 Zone 3	反射区 4 Zone 4
	标称 Nominal	0.12	0.25	0.50	0.99
200th	证书参考值 Certificate reference	0.140	0.317	0.596	0.989
	简单法 Simple	0.158	0.346	0.649	1.087
	矩匹配法 Moment matching	0.208	0.386	0.677	1.107
	相对定标法 Relative scaling	0.128	0.291	0.593	1.078
300th	证书参考值 Certificate reference	0.145	0.325	0.605	0.988
	简单法 Simple	0.169	0.368	0.671	1.086
	矩匹配法 Moment matching	0.209	0.400	0.696	1.112
	相对定标法 Relative scaling	0.129	0.296	0.596	1.071



a. 第 200 波段的绝对误差对比图
a. Accuracy comparison of band 200th

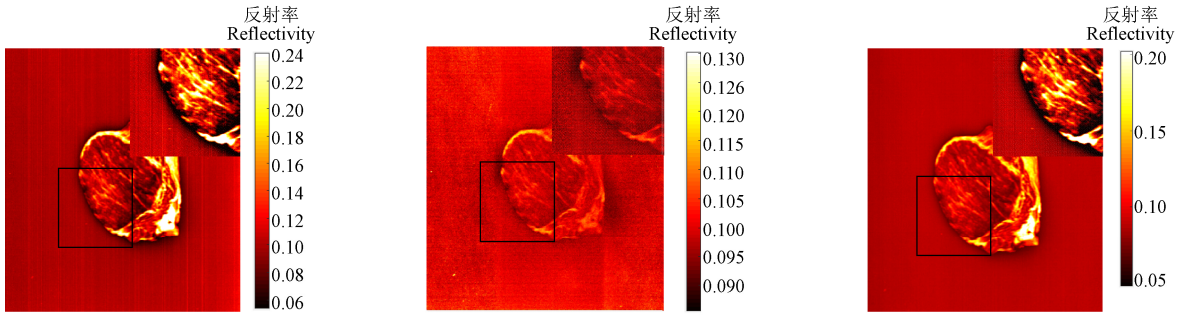
b. 第 300 波段的绝对误差对比图
b. Accuracy comparison of band 300 th

图 6　四阶阶梯板的反射率校正误差比较

Fig.6　Comparison of reflectance correction errors of the four-step panel

从图 6 中可以看出，在四个反射区中，矩匹配法的绝对误差最高，相对定标法具有最低的误差，尤其是在反射区 3 效果更为明显。

图 7 是猪肉切片图像经过三种方法校正后的反射率图像。通过调节色阶使图像中细节纹理明显可视，颜色越深，代表反射率越小，反之越大。



a. 简单法校正后的图像
a. Image corrected by simple method

b. 矩匹配法校正后的图像
b. Image corrected by moment matching method

c. 相对定标法校正后的图像
c. Image corrected by relative scaling method

注：框中区域是局部放大区域，右上角是放大后的反射率图。
Note: The area in the box is the local zoom area, and the enlarged reflectivity image is shown in the upper right corner.

图 7　猪肉切片图像经过不同方法校正后的反射率图像

Fig.7　Reflectivity images of pork slice images corrected by different methods

从图 7a 中可以看出，猪肉切片经过简单法处理后，图像中含有许多明显的纵向亮条带；经矩匹配法处理后，条带噪声得到了抑制，但图 7b 中出现了新噪声；经过相对定标法处理后，不仅有效地去除了条带噪声，并且没有新的噪声产生，如图 7c 所示。

综上，对于猪肉切片图像，经矩匹配法校正后，条带噪声虽然得到明显消除，但是会引入新的噪声，产生“带状效应”，即图像沿列的方向产生一种忽暗忽明不连续、不符合真实目标物特征分布的新噪声，其列均值分布曲线为一条直线，结果与文献[30]一致；因此矩匹配法在抑制条带噪声的同时，抑制了图像中的细节。经相对定标法校正后，图像条带噪声得到明显消除，也不会出现新的噪声；列均值曲线与原始图像的变化趋势基本一致，能够反映样本原始图像中灰度的实际分布，这对后续的指标空间定量可视化具有重要意义。

4　讨　论

对比两种方法处理前后图像最高条带系数可以发现，经矩匹配法[30]校正后的图像条带系数大幅降低，这是由于这种方法在不能充分反映复杂对象辐射特征的前提下，得到了错误的条带系数。矩匹配法的思想是在对象均一的条件下，利用整幅图像的统计数据计算探测像元的增益和偏置，然后将图像待校正像素列校正到参考像素列上，使其与参考像素列具有相同的均值（即一阶原点矩）和方差（即二阶中心矩），从而使得此方法得到的列均值曲线是一条水平线，不但丢失了原图像列均值的起伏性，而且在处理列均值和列方差相差较大的复杂图像时，往往会出现“带状效应”，从而造成新的误差。这种新噪声不仅会使反射率校正的效果下降，而且会穿过化学反射率校正模型，最终出现在反映被测指标空间分布情况的可视化预测图中，干扰其空间特征的呈现及解读。

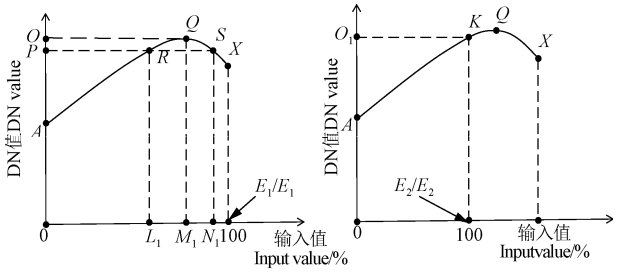
对于经相对定标法校正后的图像，虽然最高条带系数下降不如矩匹配法明显，但定标精度与文献[16]中所描述的基于积分球数据进行辐射校正的方法相当，降至将近十分之三，而且不会产生新噪声，同时 DN 均值曲线变

化趋势同原图像基本相同，保留了原图像的细节信息。因此相比于矩匹配法，相对定标法具有更高的适用性，在降噪的同时，更能反映样本图像的实际分布，也能为下一步指标空间可视化奠定坚实的基础。

通过对两种方法进行比较，发现矩匹配法无需进行系统标定，因此具有更高的效率，而相对定标法主要由两部分组成：系统标定与高光谱图像辐射修正，系统标定主要是求出各像元拟合响应函数及其补偿函数，并增加误差处理，以改善标定精度，因而所需的计算量较大。然而，这两部分是分开的，即一次标定，然后再利用这一次标定的结果来修正高光谱图像的辐射。在实际使用中，由于时间或其他因素，某些传感器像元会发生不同辐射特性变化，需要定期进行系统校正，也就是对拟合系数和阶数的再更新。

由于计算量过大，本文对每个像元均采用相同阶多项式进行拟合，未针对各个像元的具体情况，匹配最佳拟合阶数。在采用 4 阶多项式进行拟合时，某些像元处出现了欠拟合或过拟合，甚至出现异常像元点，校正后的条带系数偏大；在采用 2 阶多项式拟合时，对高 DN 值图像进行相对校正时出现异常，校正后的图像去条带噪声效果不佳，这是由于像元拟合响应函数在定义域上非单调所致，在使用式（23）计算反函数时出现两个根，现简要分析，并提出解决方法。

如图 8a 所示，当入瞳前辐射亮度为 E_1 时，某一像元采用二次多项式拟合出的拟合响应函数曲线为抛物线 $\overline{AX}$，这时在定义域[0,1]上出现极值点 Q，当此像元采集的像素列上高 DN 值点 P 带入拟合曲线求反函数时，出现两个根 L_1 和 N_1，从而导致无法分辨真实的反射率值以及后续计算的混乱，对于高光谱成像系统，可以通过调节灯光强度，即降低入瞳前的辐射亮度，避开极值点的方法予以解决。当降低辐射亮度到 E_2（$E_2<E_1$）时，由 2.1.2 标准反射率板拟合原理可知，像元拟合响应函数为曲线 $\overline{AK}$，如图 8b 所示，此时拟合函数是定义域为[0,1]上的单调函数。



a. 辐射亮度为 E_1
a. The radiance E_1

b. 辐射亮度为 E_2
b. The radiance E_2

注：DN 为亮度值；图中变量 A、Q、X、O、P、R、S、O_1、K 为像元的输出亮度值；变量 L_1、M_1、N_1 为反射率值；变量 E_1、E_2 为相机入瞳前的辐射亮度值。

Note: DN is brightness value; In the figure, variables A, Q, X, O, P, R, S, O_1, K is the output brightness value of the pixel; Variables L_1, M_1 and N_1 are reflectance values; Variables E_1 and E_2 are the radiation brightness values of the camera before entering pupil.

图 8 不同辐射亮度下像元拟合响应函数曲线图

Fig.8 The curve of pixel fitted response function with different radiation brightness

5 结 论

本文以猪肉为样本，针对推扫型高光谱成像系统在对猪肉品质进行检测时产生的条带噪声，提出并设计了利用多块标准反射率板替代积分球进行相对辐定标的新方法，主要结论如下：

1）在做定量化高光谱成像研究中，相对辐射定标是必须首要完成的步骤，它在高光谱成像的定量分析中起着至关重要的作用；

2）相对定标法在有效去除条带噪声的同时，不会出现新的其他噪声，同时能够保留原图像中的众多细节；相比较传统方法，无论是条带系数最大值，还是反射率误差均大幅下降，其中条带系数比原始图像减少 63.5%，条带系数最大波段（第 200 波段）4 个反射区的绝对误差分别仅为 0.012、0.026、0.003、0.089，随机抽取波段（第 300 波段）4 个反射区的绝对误差分别仅为 0.016、0.029、0.009、0.083。

3）与使用积分球进行相对辐射定标相比，标准板定标操作简单、成本大幅下降。与实验室相对辐射定标法相比，相对定标法也适用于非线性系统；

采用相对定标法，为解决条带噪声问题提供了一种可靠思路，并为猪肉产品质量的无损检测提供了技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 王忠良，冯燕，王丽. 推扫式高光谱谱间压缩感知成像与重构[J]. 光学精密工程，2014，22(11)：3129-3135.
Wang Zhongliang, Feng Yan, Wang Li. Compressive sensing imaging and reconstruction of pushbroom hyperspectra[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 3129-3135. (in Chinese with English abstract)

[2] 王玉娜，李粉玲，王伟东，等. 基于无人机高光谱的冬小麦氮素营养监测[J]. 农业工程学报，2020，36(22)：31-39.
Wang Yuna, Li Fenling, Wang Weidong, et al. Monitoring of winter wheat nitrogen nutrition based on UAV hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 31-39. (in Chinese with English abstract)

[3] 陈晓凯，李粉玲，王玉娜，等. 无人机高光谱遥感估算冬小麦叶面积指数[J]. 农业工程学报，2020，36(22)：40-49.
Chen Xiaokai, Li Fenling, Wang Yuna, et al. Estimation of winter wheat leaf area index based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 40-49. (in Chinese with English abstract)

[4] 曹中盛，李艳大，叶春，等. 基于高光谱的双季稻分蘖数监测模型[J]. 农业工程学报，2020，36(4)：185-192.
Cao Zhongsheng, Li Yanda, Ye Chun, et al. Model for monitoring tiller number of double cropping rice based on hyperspectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 185-192. (in Chinese with English abstract)

[5] 孙俊，张林，周鑫，等. 采用高光谱图像深度特征检测水稻种子活力等级[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：171-178.
Sun Jun, Zhang Lin, Zhou Xin, et al. Detection of rice seed vigor level by using deep feature of hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(14): 171-178. (in Chinese with English abstract)

[6] 陶惠林，徐良骥，冯海宽，等. 基于无人机高光谱遥感数据的冬小麦产量估算[J]. 农业机械学报，2020，51(7)：146-155.
Tao Huilin, Xu Liangji, Feng Haikuan, et al. Winter wheat yield estimation based on UAV hyperspectral remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 146-155. (in Chinese with English abstract)

[7] 谢忠红，徐焕良，黄秋桂，等. 基于高光谱图像和深度学习的菠菜新鲜度检测[J]. 农业工程学报，2019，35(13)：277-284.
Xie Zhonghong, Xu Huanliang, Huang Qiugui, et al. Spinach freshness detection based on hyperspectral image and deep learning method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 277-284. (in Chinese with English abstract)

[8] Jiang Q Y, Wu G H, Tian C F, et al. Hyperspectral imaging for early identification of strawberry leaves diseases with machine learning and spectral fingerprint features[J]. Infrared Physics and Technology, 2021, 118: 1-8.

[9] Akmal N, Meera A, Priti M, et al. Hyperspectral imaging based kinetic approach to assess quality deterioration in fresh mushrooms (Agaricus bisporus) during postharvest storage[J]. Food Control, 2022, 131: 1-9.

[10] 赵茂程，杨君荣，陆丹丹，等. 基于高光谱成像的青梅酸度检测方法[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：318-323.
Zhao Maocheng, Yang Junrong, Lu Dandan, et al. Detection methods of greengage acidity based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 318-323. (in Chinese with English abstract)

[11] 黄文倩，陈立平，李江波，等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取[J]. 农业工程学报，2013，29(1)：272-277.
Huang Wenqian, Chen Liping, Li Jiangbo, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples basedd on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 272-277. (in Chinese with English abstract)

[12] 王伟，姜洪喆，贾贝贝，等. 基于高光谱成像的生鲜鸡肉糜中大豆蛋白含量检测[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：357-364.
Wang Wei, Jiang Hongzhe, Jia Beibei, et al. Detection of soybean protein content in fresh minced chicken meat using hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 357-364. (in Chinese with English abstract)

[13] 白宗秀，朱荣光，王世昌，等. 高光谱图像结合特征变量筛选定量检测羊肉中狐狸肉掺假[J]. 农业工程学报，2021，37(17)：276-284.
Bai Zhongxiu, Zhou Rongguangg, Wang Shichang, et al. Quantitative detection of fox meat adulteration in mutton by hyper spectral imagingg combined with characteristic variables screening[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(17): 276-284. (in Chinese with English abstract)

[14] 王冬，王坤，吴静珠，等. 基于光谱及成像技术的种子品质无损速测研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(1)：52-59.
Wang Dong, Wang Kun, Wu Jingzhu, et al. Progress in research on rapid and non-destructive detection of seed quality based on spectroscopy and imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 52-59. (in Chinese with English abstract)

[15] 胡忠铠，高昆，豆泽阳，等. 基于全变分正则最大后验估计的高光谱图像亚像元快速定位方法[J]. 北京理工大学学报，2019，39(8)：870-875.
Hu Zhongkai, Gao Kun, Dou Zeyang, et al. A fast method for hyperspectral image subpixel mapping based on maximum a posteriori and total variation estimation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(8): 870-875. (in Chinese with English abstract)

[16] 许和鱼，张黎明，李鑫，等. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究[J]. 光学学报，2020，40(6)：179-187.
Xu Heyu, Zhang Liming, Li Xin, et al. A relative radiometric calibration method based on solar diffuse reflection for a linear array CCD detector[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 179-187. (in Chinese with English abstract)

[17] 赵茂程，陈加新，邢晓阳，等. 叶片含水率推扫式高光谱成像去条纹标定法优化[J]. 农业机械学报，2022，53(2)：212-220.
Zhao Maocheng, Chen Jiaxin, Xing Xiaoyang, et al. Method of de-stripe calibration applied in water content spatial visualization in ginkgo leaf on spectral imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 212-220. (in Chinese with English abstract)

[18] 张梦雅，袁银麟，翟文超，等. 宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测[J]. 光学学报，2019，39(6)：180-189.
Zhang Mengya, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design and test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 180-189. (in Chinese with English abstract)

[19] 李朕阳，刘振海，邹鹏，等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验[J]. 光学学报，2021，41(3)：108-120.
Li Zhenyang, Liu Zhenhai, Zou Peng, et al. Prelaunch calibration and ground verification test spaceborne particulate observing scanning polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 108-120. (in Chinese with English abstract)

[20] 李宪圣，刘洪兴，孙景旭，等. 光学拼接焦平面空间相机的相对辐射定标[J]. 光学学报，2017，37(8)：371-380.
Li Xiansheng, Liu Hongxing, Sun Jingxu, et al. Relative radiometric calibration of space camera with optical focal plane assembly[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 371-380. (in Chinese with English abstract)

[21] 张过，蒋永华，李立涛，等. 高分辨率光学/SAR 卫星几何辐射定标研究进展[J]. 测绘学报，2019，48(12)：1604-1623.
Zhang Guo, Jiang Yonghua, Li Litao, et al. Research progress of high-resolution optical/SAR satellite geometric radiometric calibration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1604-1623. (in Chinese with English abstract)

[22] 景文博，张汝平，王晓曼，等. CCD 的非线性响应特性对光束质量测量的影响及修正[J]. 红外与激光工程，2017，46(8)：135-142.
Jing Wenbo, Zhang Ruping, Wang Xiaoman, et al. Impact and correction of CCD nonlinear response on measurement of the laser beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 135-142. (in Chinese with English abstract)

[23] Gao H T, Liu W, He H Y, et al. De-striping for tdiccd remote sensing image based on statistical features of histogram[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, B1(XL1): 311-316.

[24] Li Q Y, Zhong R F, Wang Y. A method for the destriping of an orbita hyperspectral image with adaptive moment

matching and unidirectional total variation[J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 1-32.
[25] Kang Y F, Wang S G, Han F F, et al. Destriping methods of CBERS-02C satellite image based on improved moment matching[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1582-1586.
[26] Pal M K, Porwal A. A local brightness normalization (LBN) algorithm for destriping hyperion images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(10): 2674-2696.
[27] Shi Q X, Li Z X, Zhang L X, et al. High-speed ocular artifacts removal of multichannel EEG based on improved moment matching[J]. Journal of Neural Engineering, 2021, 18(5): 1-11.
[28] 孙家抦，倪玲，周军其. 遥感原理与应用[M]. 武汉：武汉大学出版社，2013：142-147.
[29] 费业泰，陈晓怀，秦岚. 误差理论与数据处理[M]. 北京：机械工业出版社，2015：10-44.
[30] 康一飞，王树根，韩飞飞，等. 资源一号 02C 影像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J]. 武汉大学学报：信息科学版，2015，40(12)：1582-1587.
Kang Yifei, Wang Shugen, Han Feifei, et al. Destriping methods of CBERS-02C satellite image based on improved moment matching[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1582-1587. (in Chinese with English abstract)

Striping noise removal method in meat detection based on hyperspectral imaging

Zhao Maocheng[1,2], Song Rui[1], Wang Xiwei[1], Fan Kaixuan[1], Chen Jiaxin[1], Gu Yue[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*; 2. *College of Vessel and Mechatronics Engineering*, *Taizhou University*, *Taizhou* 225300, *China*)

Abstract: High-resolution hyperspectral imagery has been one of the most fashionable tools using the push broom scanner in motion, particularly for the in-line measurement in industrial production of food and agricultural products. However, a distinct pattern of stripes can tend to impair the image quality that resulted from the non-uniformity among the sensing pixels, due to the inhomogeneity of imaging sensors in manufacturing, dark currents, and working conditions. Taking the pork as the measurement subject, this work aims to devise a de-stripe procedure for the relative radiance calibration using multiple standard reflectance panels. The specific procedure included the illumination of the standard panels to generate spatially uniform-distributed fluxes on the different levels into the camera, in order to gage the response of individual pixels on the imaging sensor. A polynomial fitting of sensor readouts on reflectance values was implemented to profile the response function of individual sensing pixels, and the compensation of all the sensing pixels for each wavelength, according to the response differences to a designated pixel as reference. A reflectance calibration was also provided to calculate the imaging subject reflectance using this procedure, according to the inverse of the fitted response function for the individual sensing pixels. Furthermore, the hyperspectral images of pork were selected to verify the de-stripe performance of the calibration procedure working on the third-order polynomial fitting with that of moment-matching using an intuitive visual evaluation aided with pseudo-color mapping, an objective profiling of the average digital number per column, as well as the maxima of stripe-index. In addition, a step-reflectance standard panel was used to measure the accuracy of the reflectance calibration on the regions of four reflectance values. Results showed that the subject spatial variation across the image columns was dropped along with the removal of stripe-noise, where the apparent pseudo edges were created, especially at the columns located in the transition from background to subject. There was a significant difference in moment matching in the image-columns average digital numbers of the same gray value after calibration. The calibration per individual pixel working on each wavelength substantially reduced the stripe noise, while no new noise was introduced. The spatial distributions in the original image were perfectly maintained as the image-columns average-digital-number profiles after de-stripe calibration, indicating a good agreement with those before. Aside from the compelling visual evidence, the procedure was also quantified in both the maxima of stripe-index after calibration and the lowness of reflectance error. Specifically, there was a 63.5% decrease in the stripe-index maxima on the hyperspectral images of pork. The reflectance calibration error was 0.003-0.089 for the four regions on the step-standard panel in the most stripe-stricken waveband 200, and 0.009-0.083 in a random waveband 300. The procedure of relative radiance calibration and the companion reflectance calibration can be widely expected to reduce the stripe-noise, while for the intact of subjects' spatial details and precise reflectance values. The finding can be paving the way to better spatial visualization of quality indicators and attributes to the food and agricultural products when working on the images collected using push-broom hyperspectral imagery.

Keywords: hyperspectrum; least-square method; push-broom hyperspectral imaging system; standard reflectance panel; relative radiometric calibration; stripe noise