

农产品线扫描高光谱成像系统的集成标定方法

王海华¹, 李长缨², 梅树立¹, 李民赞^{1*}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 佐治亚大学生物与农业工程系, 美国佐治亚 31793)

摘要: 高光谱成像技术在农业和食品检测中的应用日益广泛, 线扫描高光谱成像系统的标定是获取高精度图像的基础。该文从系统集成部件的调整顺序、扫描速度控制、导轨偏移校正、光谱图像变形标定和光谱波长偏移校正等几方面系统地讨论了一种线扫描高光谱成像系统的调整和标定。通过对棋盘格图案的扫描, 校正光谱图像在 CCD 上成像的位置, 给出了导轨偏移校正及速度控制的具体计算公式。研究了光谱图像水平 (Smile) 和垂直 (Keystone) 光学系统变形, 并标定了图像 2 个维度变形误差, 分别为 1.26 和 0.04 mm。对照笔型氦气校正灯标准光谱, 给出了光谱波长移位的二次校对方程。实践证明该文提出的方法能快速、有效地完成图像采集试验的设备准备工作, 为相近研究领域的科研人员提供参考和帮助。

关键词: 扫描, 标定, 变形, 高光谱成像, 集成

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.037

中图分类号: O657.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0244-06

王海华, 李长缨, 梅树立, 等. 农产品线扫描高光谱成像系统的集成标定方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 244-249.
Wang Haihua, Li Changying, Mei Shuli, Li Minzan. Integrated calibration of line-scan high spectral imaging system for agricultural products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 244-249. (in Chinese with English abstract)

0 引言

光谱检测技术可以用于检测物体内外特性, 具有快速、无损的特点, 在农业和食品质量与安全检测领域得到了广泛的关注。早在 1937 年 Harvey^[1]和 1960 年 Birth^[2]就分别利用 X 光和近红光光谱透射研究了土豆的内部污点问题。近几十年来光谱技术在农业检测中的应用逐渐广泛, 如苹果的内部品质检测^[3,4,5]、桃子的甜度分析^[6]、甜瓜可溶性固体分析^[7]、黄瓜叶片含磷素检测^[8]、油菜氮含量检测^[9]、茄子灰霉病的诊断^[10]、以及谷物水分检测^[11]等。

光谱与图像相结合的光谱图像具备了丰富的空间维和光谱维信息, 使得光谱技术得到进一步发展。其中, 多光谱成像技术在遥感应用中已有 30 多年^[12], 农业中最早用于检测作物和植被的群体营养状况^[13]。而具备更丰富光谱信息的高光谱成像技术更是在农业和食品安全与质量检测中应用日渐广泛^[4,14,16,20]。

光谱成像技术应用于农产品品质定量分析时, 对数据精确度要求较高, 因此, 实验前必须对光谱成像系统进行校正^[14-15]和标定。而目前的研究仅对光谱图

像的严重光学变形校正进行了讨论^[15], 或是提到了光谱图像光谱维和空间维分辨率的标定^[14], 并未对复杂系统的集成调整进行全面深入研究。而高速高分辨率的线扫描高光谱成像系统因为结构复杂, 所以集成调整步骤较多, 且前后关联紧密, 对数据精度影响较大。因此, 本文对线扫描高光谱成像系统的集成调整与校正方法进行了系统研究, 内容主要包括: 1) 确定系统部件调整顺序和方法; 2) 给出定位扫描线和控制扫描速度的方法; 3) 导轨偏转所引起的切向变形校正; 4) 光谱图像光谱维和空间维变形的标定和光谱波长位置校正。

1 材料与方法

线扫描高光谱成像 (hyperspectral imaging, HSI) 系统 (Food and Fiber Sensing Laboratory, University of Georgia, USA) 结构如图 1 所示。主体结构为基于 PGP (prism grating prism) 棱镜组分光的光谱仪 (ImSpector VE10, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland), 分辨率为 2.8 nm, 波长范围为 400~1100 nm。光谱仪后端与 CCD 相机 (ICL-B1410, Imperx Inc., Boca Raton, FL, USA) 相连, 相机分辨率为 (1392×1040) pixel。

在光谱仪进光端安装有镜头 (XNP 14/17-0503B, Schneider Optics, Hauppauge, NY, USA), F 数为 1.4, 焦距为 17.53 mm。系统光源由直流调节装置 (Fiber-Liter DC-95, Dolan-Jenner Industries, Boxborough, MA, US) 控制的 150 W 石英卤素钨丝

收稿日期: 2011-12-11 修订日期: 2012-05-29

基金项目: 国家科技部 863 项目 (2011AA100703); 国家自然科学基金 (U0931001); 国家自然科学基金 (60772038)

作者简介: 王海华 (1976—), 男, 江西南昌人, 讲师, 博士, 图像处理和精细农业。北京 中国农业大学现代精细农业系统集成教育部重点实验室, 100083。Email: wanghaihua@cau.edu.cn

*通信作者: 李民赞 (1963—), 男, 河北人, 教授, 博士, 精细农业系统集成研究。北京 中国农业大学现代精细农业系统集成教育部重点实验室, 100083。Email: limz@cau.edu.cn

灯提供，调节光源经光纤传输至石英发光体形成线型光束。

ImSpector 光谱仪工作原理如图 2 所示。光线通过进光槽后由 PGP 棱镜组分光成不同波长的连续光谱，最后经透镜在相机感光板形成光谱图像。图像的 2 个维度分别是空间轴 X 和光谱轴 λ 。

2 系统标定方法构建与结果讨论

系统在集成组装过程中不同部件的相对位置变化对数据采集有着不同程度的影响，如光谱仪的安装高度直接影响扫描速度和有效观察区大小，扫描速度的控制需要先定位扫描线，导轨的偏转校正前提是合理的控制扫描速度。具体调整及校正顺序如图 3 所示。

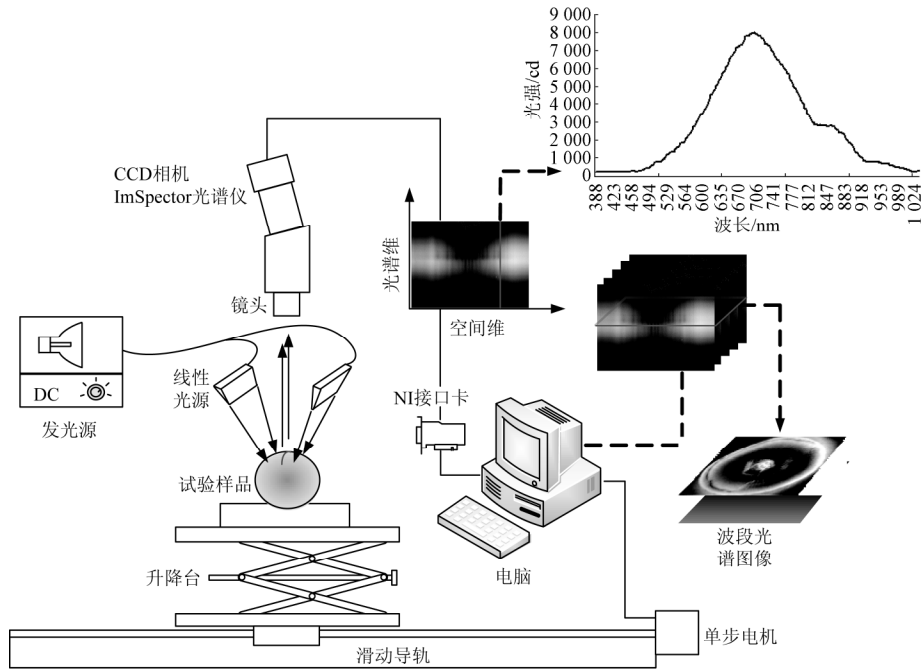


图 1 线扫描高光谱成像系统结构
Fig.1 Structure of the line-scan HSI system

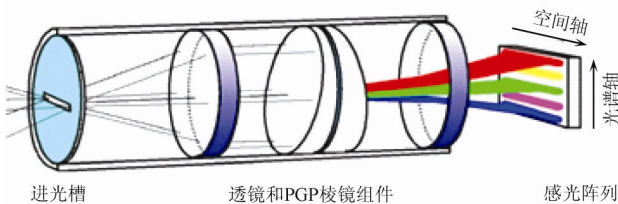


图 2 ImSpector 光谱仪工作原理
Fig.2 Structure and principle of ImSpector

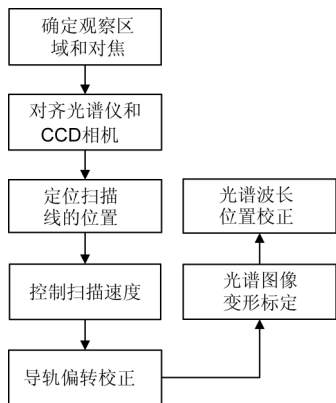


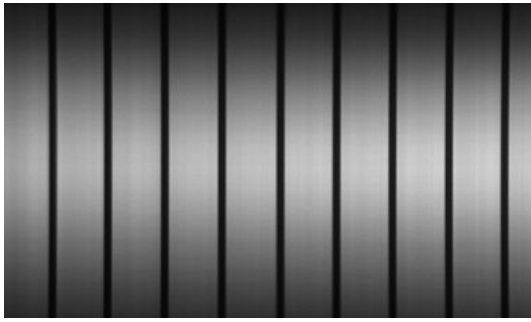
图 3 调整及校正过程
Fig.3 Flow chart of adjustment and calibration

2.1 观察区域校正与对焦

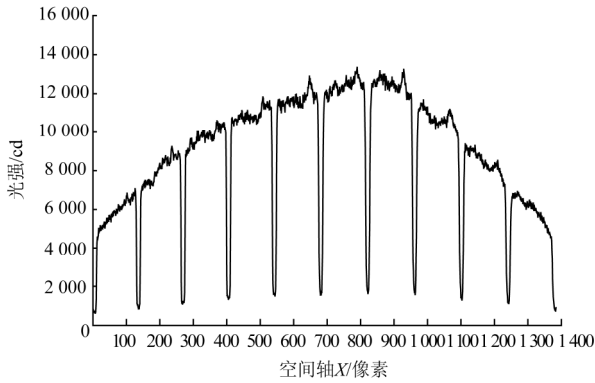
相机在光谱成像时，不同的波长感光强度不同，且成像中心比四周亮度偏高。因此，后期数据处理时需要进行白板校正。但是，为了提高数据的信噪比，应尽量确保所检测对象处于感光强度在 50% 以上的观察区域 (field of view, FOV) [18]。四角衰减现象主要是受系统光学物理特性及光源的影响，因此可以通过改变光谱仪高度、光源的高度、角度和强度来合理调整 FOV。调整完 FOV 之后，光谱仪与目标物间的高度将被固定。进一步旋转光谱仪前端聚焦透镜对目标进行对焦，观察光谱图像是否出现锐边，聚焦精度由灰度梯度区间宽度定量分析。

以洋葱检测为例，较大尺寸洋葱直径为 110~120 mm，约为图 4a 光谱图像中 5 块白色区域宽度。图 4b 为光谱轴上 700 nm 处的水平光强分布，中间 5 块白色区域均为 8 000 CD (candela, 坎德拉) 以上，最大光强约为 13 000 CD，因此洋葱检测范围处于有效 FOV 内。

图 4b 中波谷为从白到黑的阶跃，波谷两侧竖边的折段数等于像素数，与灰度梯度区间宽度相关，约为 3 像素，说明对焦锐边效果较好。



a. 确定 FOV 和对焦的光谱图像



b. 700 nm 处扫描线的光强分布

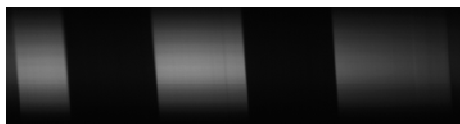
图 4 确定观察区域和对焦结果

Fig4. Determination of FOV and focus

2.2 CCD 相机与光谱仪的对齐

相机与光谱仪通过 C 型螺纹接头连接，二者未对齐时，光谱图像数据将出现严重偏差。此时将普通黑白棋盘格纸铺平摆放在镜头下，单帧图像将出现边界倾斜的情况，如图 5a 所示。最终获取的三维数据在 ENVI (ITT Corporation, White Plains, NY, USA) 等软件中提取某一段的图像时，实际所得图像并非同一波段产生。如图 6 所示，右边的波长 W2 比左边的波长 W1 值要大。并且在 X 方向上像素将发生位移，使得不同波段光谱图像像素不能对齐。

相机与光谱仪的对齐主要是通过旋转相机进行微调，并在处理软件 (SpectralCube, AutoVision Inc., Palo Alto, CA, USA) 中查看对焦后的锐边是否完全竖直，如图 5b 所示。



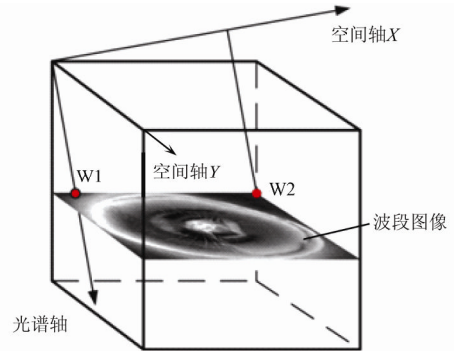
a. 二者未对齐的光谱图像



b. 二者对齐的光谱图像

图 5 相机与 ImSpector 对齐检测图像

Fig.5 Spectral image for alignment of the camera and the spectrograph



注: W1 和 W2 为波长。

图 6 高光谱图像立方

Fig.6 Hyperspectral image cube

2.3 定位扫描线位置

扫描线是单次采样时目标对象上所对应的线性位置，如图 7 中 AB。定位扫描线可以帮助进一步微调光源的照射角度。更重要的是定位扫描线是速度控制和导轨方向调整的前提。

扫描线的定位主要借助图 7 所示特定图案，通过手工微调的方式，使光谱图像中出现均匀分布且最细的黑色竖线，此时采样线正好经过 AB 线，AB 所在位置即为扫描线位置。

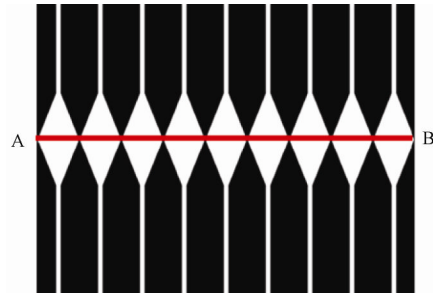
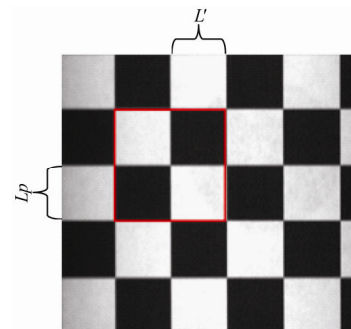


图 7 定位扫描线

Fig.7 Location scan line

2.4 扫描速度调整

为校正扫描线与导轨方向垂直，首先需要计算出一个合理的速度，使扫描方向 Y 的分辨率等于 X 扫描线方向分辨率。因为 X 方向的成像分辨率是由系统给定的，而 Y 方向的分辨率则取决于系统分辨率和扫描速度。速度调整和导轨偏转校正主要是通过分析棋盘格图案 (图 8) 扫描图像上相应的边长和角度来完成。



注: L_x 和 L_y 分别指棋盘格光谱图像中方格边长在 X 和 Y 两个方向的长度 (单位: 像素)。

图 8 棋盘格扫描图案

Fig.8 Image of checkerboard

将棋盘方格边对齐扫描线 AB，以当前速度进行扫描并记录光谱图像数据。黑白棋盘格图案实际小方格边长 L (单位: mm) 与速度和导轨偏角之间的关系如公式 (1) 所示

$$L = V \cdot t \cdot \cos \theta \quad (1)$$

式中, V 为当前导轨速度, mm/s; θ 为导轨与扫描线垂直方面的偏转角, ($^\circ$); t 导轨以当前速度在 Y 方向上滑动 L 距离所需时间, s。

其长度 L 对应的 Y 方向上图像像素数为 L_p , 可由相机帧率 FPS (帧/秒) 求得,

$$L_p = FPS \cdot t \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 可得

$$L_p \cdot V = \frac{L \cdot FPS}{\cos \theta} \quad (3)$$

以上公式中 L , θ 和 FPS 在实际应用中均为定值。因此, L_p 与 V 乘积为定值。由此可知, 当方格边长 L 在 Y 方向得到的像素数与 X 方向像素数 L' 相等, 即 2 个方向同分辨率时, 导轨速度 V' (mm/s) 为

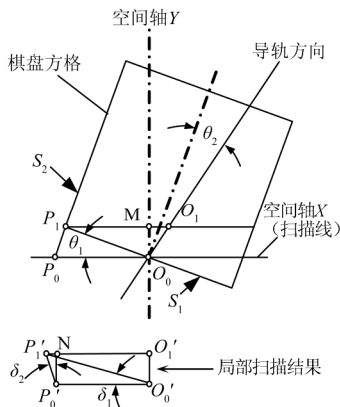
$$V' = \frac{L_p V}{L'} \quad (4)$$

L 和 L_p 可以通过 ENVI 打开棋盘格扫描数据中高反射波段清晰图像, 利用像素定位工具量取。当前速度 V 是 SpectralCube 软件的设定值。

试验中当初始导轨速度 V 设为 6.00 mm/s 时, 测得棋盘方格光谱图像 X 方向上边长 L' 等于 187.33 pixel (重复 3 次测量取平均), Y 方向上 L_p 等于 150.75 pixel。根据公式 (4) 计算可得图案 2 方向同分辨率 (不变形) 时的速度 V' 为 7.46 mm/s。

2.5 导轨偏转校正

当导轨方向与扫描线不垂直时 (图 9), 获取的光谱图像将沿 X 轴方向发生切向变形 (图 10)。为便于将导轨方向校正到与空间轴 Y 一致且垂直于扫描线, 应先调整速度使 X 、 Y 方向具有相同分辨率, 即 L_p 等于 L' 。



注: S_1 、 S_2 是方格两相邻边, P_0 、 P_1 、 O_0 、 O_1 、 M 是实际位置点, θ_1 是扫描线与 S_1 的夹角, $^\circ$; θ_2 是导轨与 S_2 的夹角, $^\circ$; P_0' 、 P_1' 、 O_0' 、 O_1' 和 N 是光谱图像中与实际位置点对应的像素点, δ_1 是光谱图像中 S_1 边与水平方向夹角, $^\circ$; δ_2 是光谱图像中 S_2 边与竖直方向夹角, $^\circ$ 。

图 9 导轨与扫描线位置关系

Fig.9 Geometric relationship between the scanning line and the linear slide

图 9 中棋盘方格扫描后, O_1P_1 将沿 X 方向移动变形 (切变), 使导轨上的点 O_1 和 O_2 连线垂直扫描线 ($O_1'O_2'$), 但垂直方向距离不受此切变影响。扫描前方格中相关线段有以下几何关系

$$O_0P_0 \sin \theta_1 \cos \theta_1 = O_0M \quad (5)$$

$$O_1P_1 = O_0M / \tan \theta_1 + O_0M \tan (\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

扫描后的相对应几何关系如下

$$O_1'P_1' = O_0'O_1' / \tan \delta_1 \quad (7)$$

$$O_0'P_0' = O_1'P_1' - O_0'O_1' \tan \delta_2 = \quad (8)$$

$$O_0'O_1'(1 / \tan \delta_1 - \tan \delta_2)$$

式中, δ_1 是 S_1 ($O_0'P_1'$) 边与水平方向夹角, ($^\circ$); δ_2 是 S_2 ($P_0'P_1'$) 边与竖直方向夹角, ($^\circ$)。

由公式 (6)、(7) 得

$$\frac{O_1P_1}{O_1'P_1'} = \frac{O_0M}{O_0'O_1'} \frac{1 / \tan \theta_1 + \tan (\theta_1 + \theta_2)}{1 / \tan \delta_1} \quad (9)$$

由于垂直方向距离不受水平切变影响, 且扫描线 X 和空间轴 Y 方向分辨率相等。因此, 由公式 (9) 消去两组线段比得

$$\tan \delta_1 = \frac{1}{1 / \tan \theta_1 + \tan (\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\sin \theta_1 \cdot \cos (\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_2} \quad (10)$$

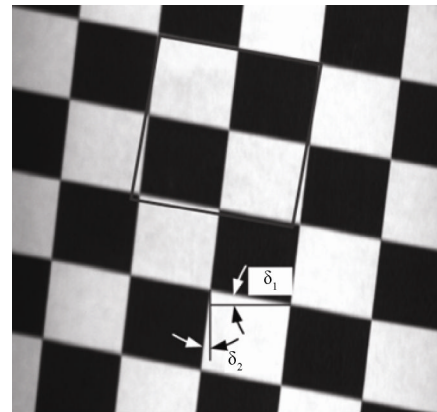


图 10 棋盘格变形图像

Fig.10 Image distortion of the checkerboard

将公式 (8) 与公式 (5) 联立, 得

$$\frac{O_0P_0}{O_0P_0'} \sin \theta_1 \cos \theta_1 = \frac{O_0M}{O_0'O_1'} \frac{1}{1 / \tan \delta_1 - \tan \delta_2} \quad (11)$$

同理, 消去两组线段比, 且代入公式 (10) 可得

$$\tan \delta_2 = 1 / \tan \delta_1 - 1 / \sin \theta_1 \cos \theta_2 = \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cdot \cos (\theta_1 + \theta_2)} \quad (12)$$

公式 (10)、(12) 中角度以顺时针为正, 导轨偏转校正角度 θ 等于 $\theta_1 + \theta_2$ 。如果扫描线位置确定, 且扫描方格前将方格边对齐扫描线, 则可知夹角 θ_1 为 0, 由公式 (10) 可知 δ_1 也等于 0。再由公式 (12) 可知 δ_2 就等于导轨需要旋转的角度 θ_2 。

当扫描速度调整到 7.46 mm/s 后, 试验扫描获得光谱图像如图 10 所示, 由软件测得 δ_1 为 9.8° , δ_2 为 6.3° 。通

过公式 (10)、(12) 计算得 $\theta_1=10.31^\circ$, $\theta_2=5.98^\circ$ 。因此, 导轨需要逆时针旋转的角度为 16.29° 。导轨旋转后, 根据公式 (1) 可知实际速度也应调整为 $V' \cdot \cos\theta$, 即 7.16 mm/s 。

2.6 光谱图像变形标定

棋盘方格图案和笔型氦气校正灯产生的光谱图像如图 11、图 12 所示。

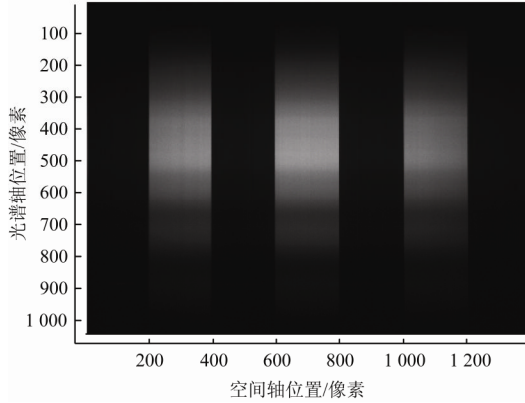


图 11 棋盘方格图案光谱图像

Fig.11 Spectral image of checkerboard

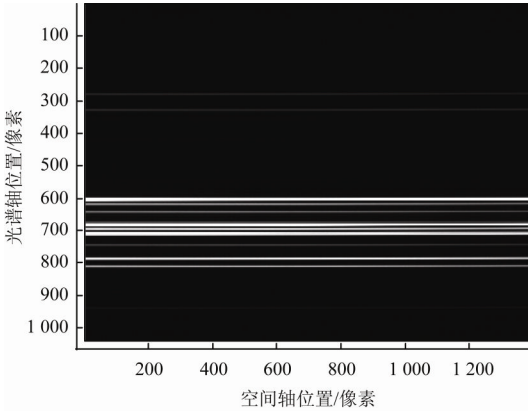
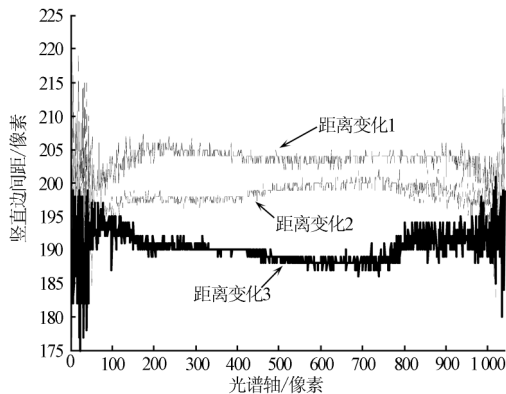


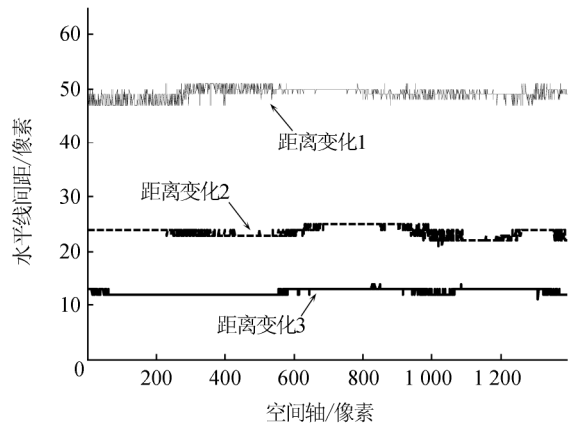
图 12 笔型氦气校正灯光谱图像

Fig.12 Spectral image of Krypton lamp

利用 Matlab (MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) 对图像进行差分边界提取。图 13a 为竖直边宽度距离的变化值, 图中两端为噪声区, 在与可见近红外波长范围 $557 \sim 892.9 \text{ nm}$ 对应的像素位置 $275 \sim 807$ 像素内, 噪声及变形误差为 6 pixel, 约 0.04 mm , 垂直变形不明显。图 13b 为水平线弯曲变形, 主要影响为噪声, 有效波长和 FOV 范围内误差约为 3 像素, 即 1.26 nm , 水平变形不明显。



a. 棋盘方格光谱图像竖直边变形



b. 笔型氦气校正灯光谱图像水平变形

图 13 光谱图像变形

Fig.13 Distortions of spectral image

实际采集图像时经过 4 倍压缩处理, 误差将进一步被降低。综上可知, 在有效的波长及 FOV 区域内, 图像水平和垂直变形不明显。关于严重水平变形和鱼眼变形可以采用文献[15]和[19]提到的方法加以校正。

2.7 波长位置校正

光谱波长位置在系统使用前需要进行校正和标定, 否则将得到错误的关于波长的结论。在图 12 水平位置 700 pixel 处提取竖直线上光谱, 与光源厂商提供的标准^[17]进行特定波长 (557 、 587.1 、 760.15 、 769.45 、 785.48 、 810.44 、 819 、 829.81 、 850.9 、 877.7 、 892.9 nm) 比对, 并利用回归分析建立标定方程, 如公式 (13)。

$$w = 2.821 \times 10^{-5} W_r^2 + 0.602 W_r + 389.094 \quad (13)$$

式中, W_r 为光谱图像中光谱维像素位置, pixel (像素), w 为校正后的标定波长, nm。试验结果如表 1 所示, 其中氦气灯标准波长与标定波长相关系数为 $R^2=0.99997$, 标定值与标准值相差除在 829.81 nm 波长处为 -1.40 nm 以外, 其他绝对值均小 0.7 nm 。表明校正后的光谱波长位置和标准值一致。

表 1 波长与标准对照标定

Table1 Calibration of spectral accuracy

像素位 置/pixel	标准 波长/nm	标定 波长/nm	偏差 /nm	像素位 置/pixel	标准 波长/nm	标定 波长/nm	偏差 /nm
275	557.00	556.87	-0.13	691	819.00	818.78	-0.22
324	587.10	587.21	0.11	706	829.81	828.41	-1.40
599	760.15	760.02	-0.13	741	850.90	850.92	0.02
614	769.45	769.57	0.12	782	877.70	877.37	-0.33
640	785.48	786.15	0.67	807	892.90	893.56	0.65
679	810.44	811.09	0.65				

3 结论

为了获取准确有效的光谱数据, 研究确定了线扫描高光谱成像系统的组装校正顺序和方法。

1) 集成组装和校正顺序为: 确定观察区域、聚焦、对齐光谱仪和 CCD 相机、定位扫描线位置、计算图像不变形速度、校正导轨偏转角、标定光谱图像空间维和光谱维形变、校正波长点位置。

2) 导轨速度和光谱图像中棋盘方格边长乘积为定

值。当空间轴 X 、 Y 同分辨率时, 导轨速度与当前速度及 Y 方向方格边长成正比, 与 X 方向方格边长成反比。

3) 导轨的偏转会产生光谱图像切向变形, 且变形前后存在约束关系。偏转角度可由棋盘方格光谱图像中对应边的倾斜角度计算获得。

4) 经二项校正公式标定的波长与氮气灯标准值基本一致, R^2 达到 0.99997, 绝对偏差基本小于 0.7 nm。

[参 考 文 献]

- [1] Harvey, R B. The x-ray inspection of internal defects of fruits and vegetables[J]. Proc. Am. Soc. Hort. Sci., 1937, 35: 156—157.
- [2] Birth G S. A nondestructive technique for detecting internal discolorations in potatoes[J]. Amer. Potato J., 1960, 37(2): 53—60.
- [3] Fan G. Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(4): 416—420.
- [4] Noh H K, Lu R. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(2): 193—201.
- [5] Peng Yankun, Lu R. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images[J]. Postharvest biology and technology, 2006, 41(3): 266—274.
- [6] Kawano S, Watanabe H, et al. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interreflectance mode[J]. J. Japan. Soc. Hort. Sci., 1992, 61(2): 445—451.
- [7] Dull G G, Birth G S, et al. Near infrared analysis of soluble solids in intact cantaloupe[J]. J of Food Science, 1989, 54(2): 393—395.
- [8] 张喜杰, 李民赞. 基于反射光谱的温室黄瓜叶片磷素含量分析与预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2404—2408. Zhang Xijie, Li Minzan. Analysis and Estimation of the Phosphorus Content in Cucumber Leaf in Greenhouse by Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis October, 2008, 28(10): 2404—2408. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冯雷, 方慧, 何勇, 等. 基于多光谱视觉传感技术的油菜含氮量诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1749—1752. Feng Lei, Fang Hui, Zhou Weijun, et al. Nitrogen stress measurement of canola based on multi-spectral charged coupled device imaging sensor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis September, 2006, 26(9): 1749—1752. (in Chinese

with English abstract)

- [10] 吴迪, 朱登胜, 何勇, 等. 基于地面多光谱成像技术的茄子灰霉病无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1496—1500. Wu Di, Zhu Dengsheng, He Yong, et al. Nondestructive detection of grey mold of eggplant based on ground multi-spectral imaging sensor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(7): 1496—1500. (in Chinese with English abstract)
- [11] Norris K H. Design and development of a new moisture meter[J]. Agric. Eng., 1964, 45(7): 370—372.
- [12] Lu R, Chen Y R. Hyperspectral imaging for safety inspection of food and agricultural products[J]. Proc. SPIE, 1998, 3544: 121—133.
- [13] Haralick R M, Hlavka C A, Yokoyama R, and Carlyle S M. Spectral-temporal classification using vegetation phenology[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Trans., 1980, GE-18(2): 167—174.
- [14] Qin J, Lu R. Detection of pits in tart cherries by hyperspectral transmission imaging[J]. Transactions of the ASAE., 2005, 48(5): 1963—1970.
- [15] Lawrence B, Park W R, et al. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 513—521.
- [16] 洪添胜, 乔军, Ning Wang, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151—155. Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 151—155. (in Chinese with English abstract)
- [17] Newport. Oriel pencil style calibration lamps[EB/OL]. <http://www.newport.com/CatalogPDF/e5395.pdf>, 2010-11-10.
- [18] Bart M N, Katrien B, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review[J]. Postharvest biology and technology, 2007, 46(2): 99—118.
- [19] 张连蓬, 陶华学, 刘国林, 等. 遥感图像几何校正的非线性有理逼近模型[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 140—144. Zhang Lianpeng, Tao Huaxue, Liu Guolin, et al. The model of nonlinear rational approximation for geometric correction of remote-sensing image[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 140—144. (in Chinese with English abstract)

Integrated calibration of line-scan high spectral imaging system for agricultural products

Wang Haihua¹, Li Changying², Mei Shuli¹, Li Minzan^{1*}

(1. Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research of MOE, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. University of Georgia, Department of Biological and Agricultural Engineering, Georgia 31793, USA)

Abstract: Hyperspectral imaging (HSI) technology has been used widely in agriculture and food industry. The paper discussed the integration and calibration methods for a line-scan HSI system, such as the sequence of the system adjustment, scanning speed and position control of the linear slide, spectral accuracy calibration, and spatial distortion calibration of the spectral image. Detailed methods and steps were provided to ensure the high fidelity of the image. The “smile” and “keystone” distortions of the spectral images were also taken into account. The calibration results showed that the spectral and spatial errors were 1.26 nm and 0.03 mm, respectively. A quadratic equation was used to correct the wavelength positions based on the standard spectrum of a Krypton lamp. It is proved that this method provided preferences to prepare image acquisition system quickly and efficiently.

Key words: scanning, calibration, deformation, hyperspectral imaging, integration