文章编号： 1672-8785(2017)08-0008-06

基于透射变换和二维指向镜的大视场光谱成像研究

徐映宇 [1,2] 秦侠格 [1,2] 徐 睿 [1,2] 何志平 [1,2] 王建宇 [1,2]

(1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
2. 中国科学院空间主动光电重点实验室，上海 200083)

摘 要：为了对大视场范围内的目标进行光谱成像，人们通常采用二维指向镜和面阵凝视光谱仪相结合的技术途径。当用二维指向镜对近距离目标进行成像时，在不同方位角与俯仰角下产生的像旋和畸变等都不同，从而给后续处理带来了困难。因此需要先建立目标实际坐标系、探测器图像坐标系和俯仰方位角三者之间的光学传递模型。根据该模型即可得到透射畸变图像与真实图像之间的变换关系。然后通过透射变换对透射畸变图像进行正视校正，便可对大视场图像进行拼接。外场实验结果表明，该方法可行性强，简单易行，稳定性好。

关键词：二维指向镜；凝视成像；透射变换；大视场成像

中图分类号： TP73 **文献标志码**： A **DOI**: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.08.002

Study of Large Field Spectral Imaging Based on Transmission Transform and Two-dimensional Pointing Mirror

XU Ying-yu [1,2], QIN Xia-ge [1,2], XU Rui [1,2], HE Zhi-ping [1,2], WANG Jian-yu [1,2]

*(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

Abstract: To achieve the spectral imaging of an object in a large field of view, the technology path which combines a two-dimensional pointing mirror with a staring spectrometer is usually used. However, when the two-dimensional pointing mirror is used to image close objects, the image rotation and distortion generated at different azimuths and pitch angles are different. Therefore, it is necessary to establish an optical transfer model among the actual object coordinate system, the detector image coordinate system and the azimuth and pitching angle firstly. According to the optical transfer model, the transformation relationship between the transmission distortion image and the real image can be obtained. Then, after the transmission distortion image is corrected by perspective transmission, image stitching can be implemented on the large field-of-view image. The experimental results show that the method is feasible, easily implemented and stable.

Key words: two-dimensional pointing mirror; staring imaging; transmission transform; large field-of-view imaging

收稿日期：2017–04–05
基金项目：国家自然科学基金项目 (21105109)
作者简介：徐映宇 (1991-)，男，安徽亳州人，博士研究生，主要研究方向为成像光谱技术。
E-mail: xuyingyua@126.com

0 引言

为了实现对目标的大视场范围的光谱成像，对于一些体积和重量受限过多，同时瞬时视场较小的光学系统来说，通常采用二维指向镜 [1−3] 和面阵凝视系统相结合的技术方案。二维指向镜具有负载轻、转动惯量小等特点。通过连续步进扫描成像即可对目标进行大视场成像。

在用二维指向镜进行近距离扫描成像时，由于光轴会随俯仰角和方位角的变化而变化，不同位置成像的像旋和畸变等也都不同。这种畸变会导致目标失真。若不对其进行校准，则无法进行后续的图像拼接、目标跟踪与识别等操作。因此，需要建立目标实际坐标系、探测器图像坐标系和俯仰方位角三者之间的光学传递模型。根据该模型就可得到透射畸变图像与真实图像之间的变换关系。然后通过透射变换对透射畸变图像进行正视校正，便可进行大视场图像的拼接。本文以月球矿物分析仪为实验样机进行了外场实验。结果表明，该方法可行性强，简单易行，稳定性好。

1 光学传递模型的建立

声光可调谐滤光器 (Acousto–Optic Tunable Filter, AOTF) 型光谱分析仪的探测原理是 [4−6]，来自目标的反射光或者目标发出的光入射到光谱分析仪的视场内，经 AOTF 分光后，形成某一波长的准单色光，然后会聚到面阵探测器上，得到目标的光谱图像。通过改变 AOTF 的调制频率，可以调整透过 AOTF 的光波波长，最终获得所需的光谱曲线以及指定波长的光谱图像。同时，基于集成设计的二维转动指向机构，按要求转动指向镜，可实现对采样点的指向调整探测，从而满足对采样区进行多点探测的任务需求。二维指向机构由扫面镜、两组“超声电机 + 角度传感器”以及配套的驱动电路构成。当扫描镜与水平面平行时，方位角为 0°，俯仰角为 30°，方位电机的转动范围为 −22.5° ∼ 22.5°，俯仰角度为 0° ∼ 30°。

图 1 所示为二维指向镜、折转镜、等效像面和地面实际目标之间的关系。其中，入射光向指向镜传递，再由折转镜向主体光学光路传播。主体光学光路包含“望远镜 → 格兰棱镜 → AOTF → 格兰棱镜 → 分色片 → 反射镜 → 探测器”，可作为等效像面来分析。根据光路可逆原理，光线传输模型从等效像面沿主光轴出发，以视场角为仿真边界，经折转镜和指向镜反射后，形成坐标映射。

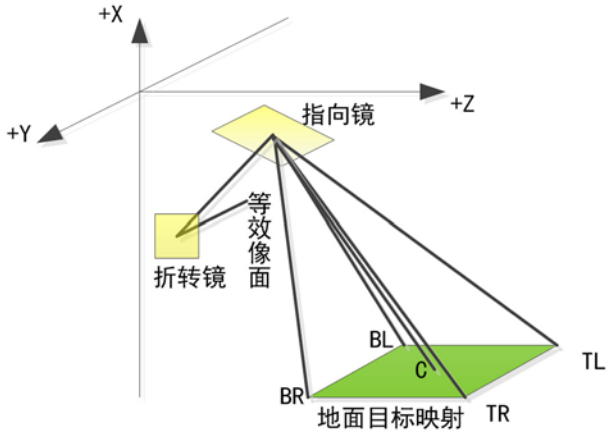


图 1　二维指向镜、折转镜、等效像面和地面实际目标之间的关系

如图 1 所示，等效像面位于成像镜上，设定初始化主光轴与视场边界光线。光线沿 +X 方向传输。通过计算折转镜的镜面位置与法线，可以仿真经镜面反射后的主光轴与视场边界光线。根据轴心位置和指向镜零位状态的法线向量对二维指向机构进行初始化。先依照俯仰角绕 X 轴旋转指向镜法线，再依照方位角绕 Y 轴旋转指向镜法线，最后添加镜面厚度，形成反射镜面。仿真经过指向镜后的主光轴与视场边界光线。对于目标成像区域，需要设定目标面的高度与法线向量信息，从而获取主光轴与视场边界光线在目标平面上的投影。图 2 所示为仿真过程。图 3 所示为光路仿真模型。

当二维指向镜运动时，系统的视轴指向与两轴的转动角度是非线性的。对于成像系统来说，若线性驱动两轴，则扫描轨迹是非线性的，这样在扫描中就会出现缝隙和空洞。同时，当二维指向镜的方位角和俯仰角不同时，探测器图

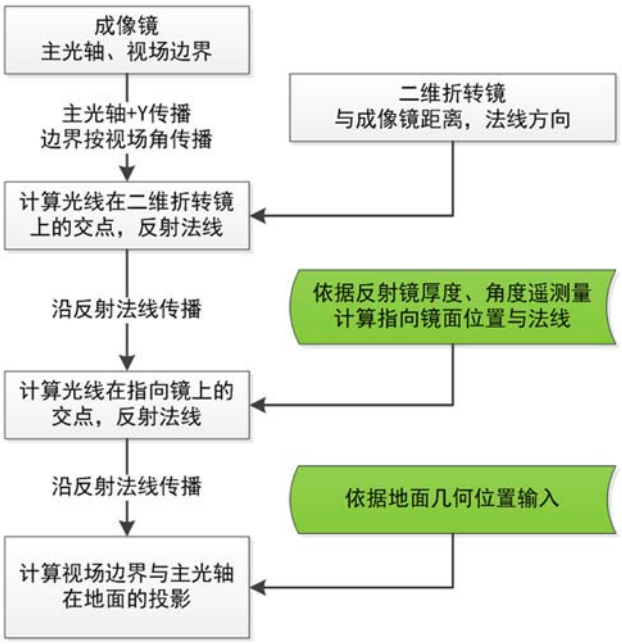


图 2 光学传递模型的处理过程

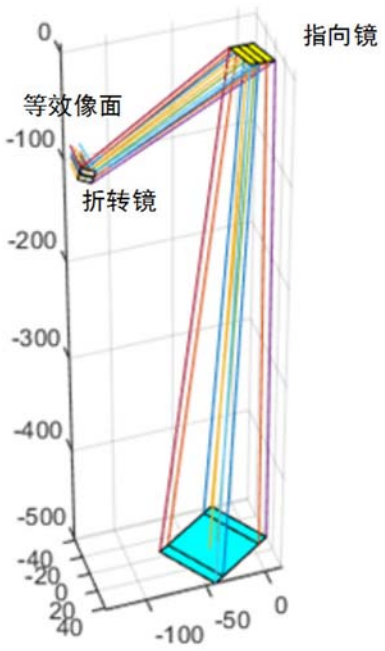


图 3 光路仿真模型

像也会发生不同的旋转，即产生像旋 [1] 。像旋会对后续的拼接操作产生重大影响。因此，对二维指向镜系统的像旋进行分析是十分必要的。

根据成像的光路可逆原理，我们可将一个面阵探测器的光敏面视为物面，分析光敏面经过二维指向镜在物平面上所成的像 [1] 。此时即可看出该二维指向系统会造成像旋 (见图 4) 。

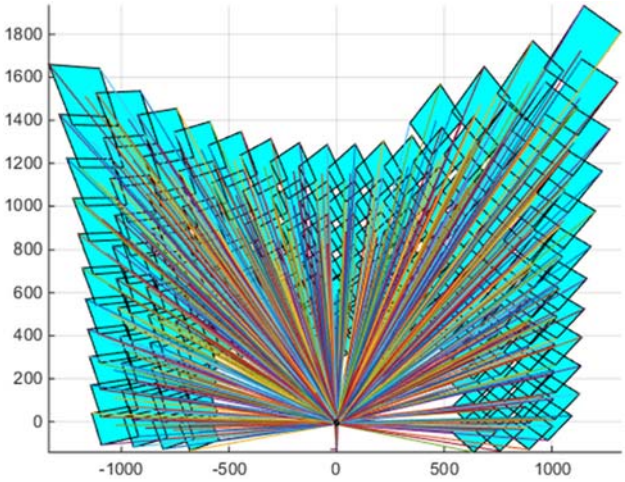


图 4 不同区域的像旋和畸变情况

2 透射变换

地面图像与探测器图像之间在本质上是一种图像透射变换关系 [7−8] 。常见的图像透射变换形式包括平移、旋转和缩放等。这些变换模型都可以用自由度为 8 的透射变换矩阵表示，其形式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，(x, y) 和 (x', y') 分别为探测器所获图像的坐标和地面目标的实际坐标；H 为自由度为 8 的变换矩阵。表 1 列出了矩阵 H 中 $h_0 \sim h_7$ 各自表示的含义。

表 1 变换矩阵的参数含义

参数	参数作用
h_2	水平方向位移
h_5	垂直方向位移
h_0, h_4	尺度变化
h_1, h_3	旋转量
h_6, h_7	水平和垂直方向上的变形量

将式 (1) 改写为

$$x' = \frac{h_0 x + h_1 y + h_2}{h_6 x + h_7 y + 1} \tag{2}$$

$$y' = \frac{h_3 x + h_4 y + h_5}{h_6 x + h_7 y + 1} \tag{3}$$

可以发现，利用四组对应的 (x,y) 和 (x',y') 即可算出 $h_0 \sim h_7$。通过变换式 (2) 和式 (3) 可得 [9−10]：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \end{bmatrix} \tag{4}$$

利用光学传递模型可以得到地面图像四个顶点与探测器图像四个顶点之间的对应关系。将这八个点标记为 (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3), (x_4,y_4) 和 (x'_1,y'_1), (x'_2,y'_2), (x'_3,y'_3), (x'_4,y'_4)，则有

$$\begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & x'_2 & y'_2 & x'_3 & y'_3 & x'_4 & y'_4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_2x_2 & -x'_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -y'_2x_2 & -y'_2y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_3x_3 & -x'_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -y'_3x_3 & -y'_3y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_4x_4 & -x'_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -y'_4x_4 & -y'_4y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式 (5) 改写为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \times \mathbf{H} \tag{6}$$

则

$$\mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{B} = \mathbf{H} \tag{7}$$

利用式 (7) 即可计算出 $h_0 \sim h_7$ 各个值的大小。此后便可逐点对探测器图像进行变换。在变换过程中，由于实际图像的大小往往大于探测器图像，变换后会出现“孔洞”。此时需要对其进行差值处理，并选择最邻近差值。

3 精度测试及外场大视场验证

利用实验室定标灯和黑白棋盘格来辅助完成图像映射及精度测试。将仪器安装在支架上，如图 5 所示。在地面上建立直角坐标系，依次对表 2 中九个区域的棋盘格进行成像，并评价月球光谱分析仪观测视场的匹配精度。

基于平台高度、方位与俯仰电机位置遥测，利用光路仿真模型，反演计算测试数据图像的映射关系 (见图 6)。

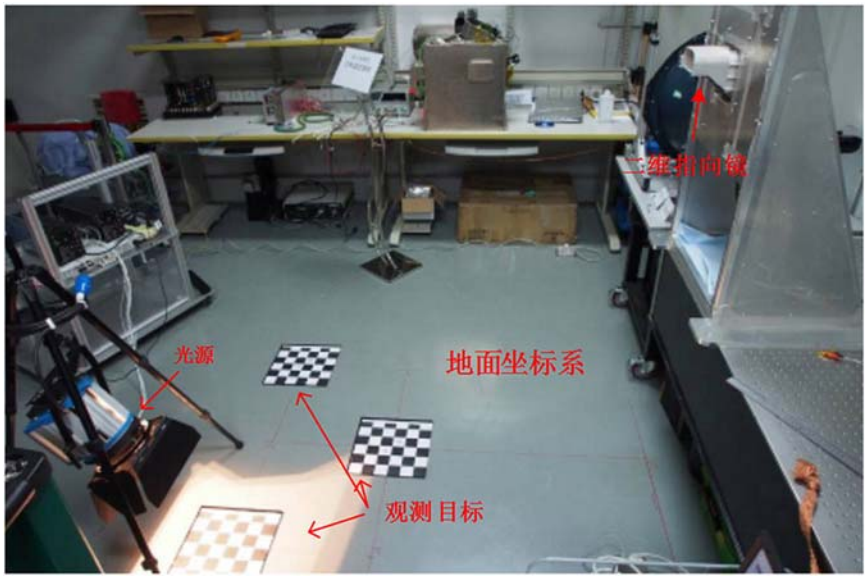


图 5　图像映射及精度分析测试

表 2 图像映射测试内容

测试序号	地面位置 (左右/m 、纵深/m)
1	(0.0, 1.0)
2	(–0.5, 1.5)
3	(0.5, 1.5)
4	(0.0, 1.5)
5	(0.5, 1.0)
6	(–0.5, 2.0)
7	(–0.5, 1.0)
8	(0.5, 2.0)
9	(0.0, 2.0)

通过计算映射投影图像上的目标中心位置 (标记有 A 和 B 的黑白格中心) 与实际位置的偏差，再结合观测距离即可计算出光谱分析仪在不同观测条件下的指向。如表 3 所示，经过统计分析，指向定位精度约为 $0.079FOV$ ，其中 FOV 为视场角大小。

图 7 所示为经过几何变换后的成像举例。其中，左图为原始图像，右图为几何校正后的图像。所有图像的像旋和形变均会随观测视场变化。

外场验证实验拟观测的特征目标有两种：(1) 全视场靶纸 (黑白棋盘格)，铺置平整。(2) 沙地与石块，外场定标场地自带或者人工铺置；目标不全在同一个平面上，具有典型的起伏特征。

按照图 5 所示的光学传播模型、图像映射关系以及像旋逐个进行校正，并将其全部拼接映射到一幅新的图像中 (结果见图 8)。

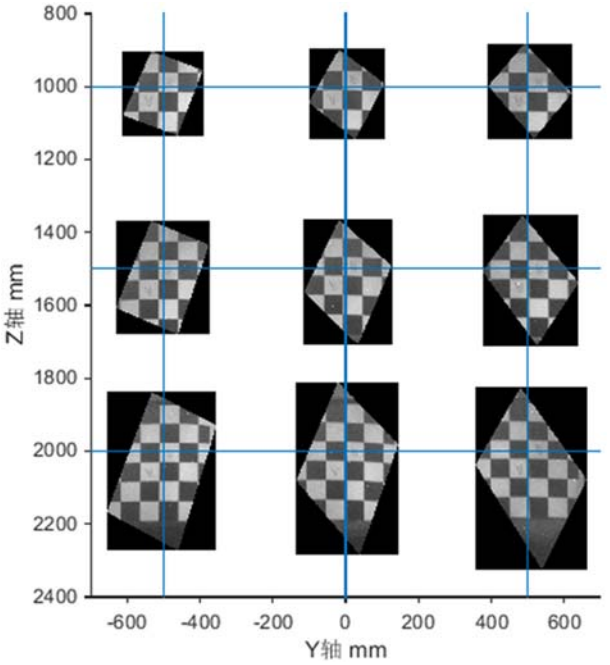


图 6 测试数据在目标平面上的映射投影

4 结束语

为了对大视场范围内的目标进行光谱成像，人们通常采用二维指向镜和面阵凝视光谱仪相结合的技术途径。在用二维指向镜对近距离目标进行成像时，主光轴会随不同的方位角和俯仰角而产生变化。因此，成像的像旋和畸变等都不同。基于此，本文首先建立了目标实际坐

表 3 指向精度的测试分析数据

实测靶心 mm (OYZ)		映射贴图靶心 mm (OYZ)		偏差 mm	观测距离 mm	角度分辨率 mm/pixel	指向定位精度 *FOV*
–500	1000	–510.4	1008	13.12	1990.71	0.576	0.089
0	1000	–9.157	1002	9.37	1920.36	0.555	0.066
500	1000	497.2	1008	8.48	1990.71	0.576	0.058
–500	1500	–509.9	1519	21.42	2307.87	0.667	0.125
0	1500	–6.216	1509	10.94	2248.33	0.650	0.066
500	1500	500.4	1518	18.00	2307.87	0.667	0.105
–500	2000	–507.9	2016	17.84	2685.36	0.777	0.090
0	2000	–1.475	2014	14.08	2634.99	0.762	0.072
500	2000	500	2008	8.00	2685.36	0.777	0.040

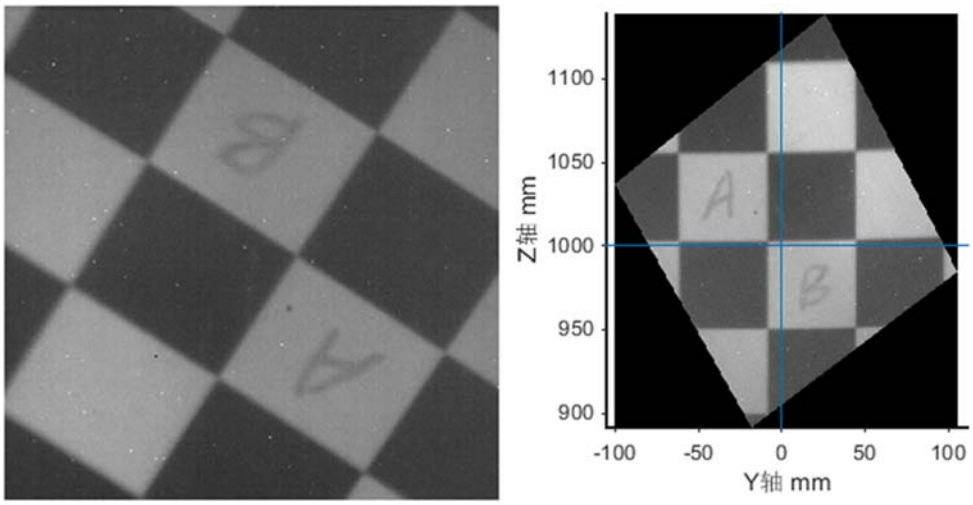


图 7 几何映射后的图像 (Point1)

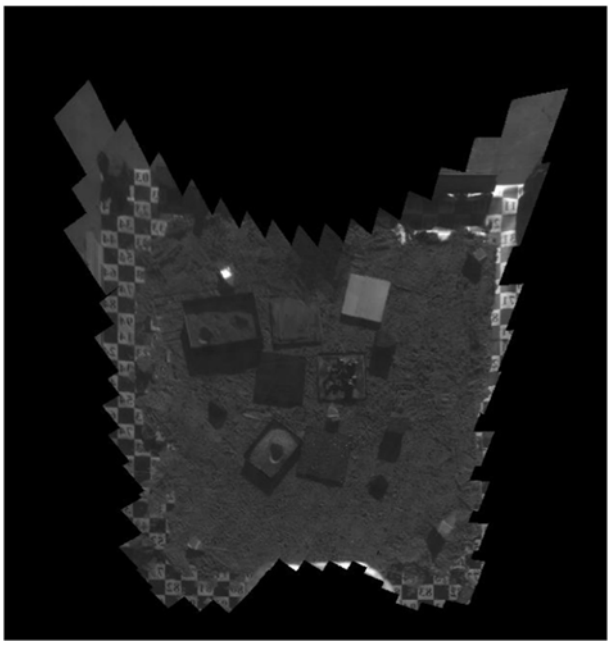


图 8 外场实验中的大视场光谱成像校正结果

标系、探测器图像坐标系和俯仰方位角三者之间的光学传递模型，然后根据该模型得到了透射畸变图像与真实图像之间的变换关系，并通过自由度为 8 的透射变换对透射畸变图像进行了正视校正。接着在实验室内测试和计算了图像映射的精度。结果表明，指向定位精度约为 $0.079FOV$ ，满足 $FOV/10$ 的应用需求。最后开展了外场实验，成功获取了外场大视场图像和相对反射率曲线。实验结果表明，该方法可行性强，简单易行，稳定性好。

参考文献

[1] 吴超，张冬冬，刘云猛．二维指向镜系统成像特性研究 [J]. **电光与控制**, 2011, **18**(12): 5–8.

[2] 李淑英，周世椿．二维指向镜的成像特性分析 [J]. **光电工程**, 2008, **35**(5): 17–22.

[3] 吴凡，王大鹏．二维指向镜的定域扫描方式的扫描特性分析 [J]. **光电技术应用**, 2009, **24**(4): 16–20.

[4] He Z P, Wang B Y, Gang L. Operating Principles and Detection Characteristics of the Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer in the Chang′e–3 [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, **14**(12): 1567–1577.

[5] 常凌颖，赵葆常，邱跃洪，等．声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计 [J]. **光学学报**, 2010, **30**(10): 3021–3026.

[6] He Z, Shu R, Wang J Y. Imaging Spectrometer Based on AOTF and Its Prospects in Deep-space Exploration Application [C]. *SPIE*, 2011, **8196**: 819625.

[7] 欧为军．基于 Hough 变换和透视变换的红外图像校正 [D]. 北京：北京科技大学，2009.

[8] 唐维，任国强．基于射影矩阵变换的名片透视图像矫正 [J]. **电脑知识与技术**, 2013, **25**(9): 5711–5715.

[9] 张勇，金学波．基于先验信息和射影几何变换的车牌图像矫正 [J]. **计算机应用研究**, 2008, **25**(7): 2210–2212.

[10] 代勤，王延杰，韩广良．基于改进 Hough 变换和透视变换的透视图像矫正 [J]. **液晶与显示**, 2012, **27**(4): 552–556.