



DOI: 10.12086/oe.2018.170725

静轨图像消旋算法及其验证方法

王梅竹^{1,2,3}, 黄小仙^{1,2,3}, 冯旗^{1,2,3*}¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室(上海技术物理研究所), 上海 200083;³中国科学院大学, 北京 100049

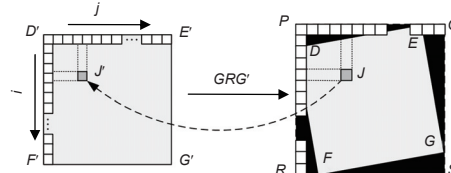
摘要: 我国正处于海洋高频观测的发展阶段, 作为海洋观测的一个重要途径, 静止轨道海洋成像辐射计的发展具有重要的战略意义。本文分析了静止轨道二维指向面阵成像光学系统所引入的像旋误差, 提出了针对面阵误差的图像消旋算法, 并且给出了消旋算法有效性的验证方法。经验证, 本文提出的消旋算法, 消除了 39% 像面旋转的影响, 可以大大提高二维指向成像的地理定位精度, 提升遥感仪器的准确度, 因此本工作为二维指向面阵成像系统后续图像处理奠定了基础。

关键词: 静止轨道; 像旋; 二维指向镜; 消旋验证; 几何定位

中图分类号: TP73

文献标志码: A

引用格式: 王梅竹, 黄小仙, 冯旗. 静轨图像消旋算法及其验证方法[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170725



Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method

Wang Meizhu^{1,2,3}, Huang Xiaoxian^{1,2,3}, Feng Qi^{1,2,3*}¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Our country is at a developing stage in the area of high-frequency observation of oceans. As an important approach of observation of ocean, the development of the geostationary ocean radiometer is of great significance. In this paper, we analyze the image rotation errors introduced by the optical system of plane imaging with two-dimensional pointing reflection mirror, propose the image rotation elimination method for two-dimensional scanning and the verification method. It is proved that the proposed rotation elimination method can reduce 39% of image rotation. This indicates that the algorithm greatly improve the accuracy of two-dimensional directional imaging and improve the accuracy of remote sensing instruments. Therefore, the work lay a good foundation for image processing in two-dimensional pointing plane imaging system.

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-03-01

基金项目: 全球变化与海汽相互作用专项(GASI-03-03-01-01)

作者简介: 王梅竹(1991-), 女, 博士研究生, 主要从事海洋遥感、图像消旋和图像拼接的研究。E-mail: wangmeizhu2013@163.com

通信作者: 冯旗(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事航天光电遥感系统方面的研究。E-mail: fengqi168@vip.sina.com

Keywords: geostationary; image rotation; two-dimensional pointing mirror; image rotation elimination verification; geostationary positioning

Citation: Wang M Z, Huang X X, Feng Q. Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170725

1 引言

我国是一个海洋大国, 拥有 1.8 万公里海岸线, 海洋对我国气候、农业、军事等有着至关重要的影响。目前, 我国对海洋还处于极地轨道观测阶段, 重访周期为 1~2 天, 然而, 潮汐、海流、风暴潮、溢油、军事活动等往往在一天内会发生很大变化, 因此发展静止轨道海洋成像辐射计势在必行。

静止轨道海洋成像辐射计可以对地面进行高分辨率的观测, 然而, 静止轨道的弊端在于受光学系统的影响, 视场小, 需加入额外的扫描设备来扩大扫描视场。本文采用了二维指向镜配合面阵凝视成像。二维指向镜体积小, 重量轻, 旋转灵活。然而, 由于二维指向镜绕俯仰、方位两轴旋转, 系统成像会有像旋误差。

参考静止轨道卫星高分四号的位置, 取星下点经度为 105° E, 为完整覆盖我国海域, 设置卫星指向中心 115° E、20° N, 指向角(10° 东西, 20° 南北), 中心图像像旋角为 1.54°, 即探测器边缘绕中心转动 1.54°, 那么地面误差约为 7 km。由此可见, 静止轨道卫星的像面旋转会引起 7 km 量级的几何定位偏差, 消像旋在二维指向面阵成像系统后续图像处理中是十分必要的。

像旋误差存在于绕两轴旋转的光学扫描系统中, 分为光机消旋和图像消旋。在光机消旋上, 张铿^[1]、王岱^[2]等人分别采用 K 镜补偿和 CCD 相机旋转的方法直接消除像旋。光机消旋对光学系统有着特殊的需求, 如 K 镜补偿是针对极地轨道卫星平台上以固定转速旋转的扫描镜配合线性探测器引起的像旋。图像消旋方面, 李淑英^[3]、惠彬^[4]、王武^[5]、吴凡^[6]、王淦泉^[7]等人完成了像旋模型的建立, 孙德新^[8]给出了线阵像旋的消除方法, 消像旋效果明显, 但并未给出定量的验证方法。随着探测器和光机扫描技术的发展, 以及高效对地对海探测的需求, 面阵探测器配合二维指向机构在航天工程中的应用也越来越广。本文首次提出针对二维指向镜的面阵成像消旋算法及其验证方法。

本文将在第 2 节通过二维指向镜成像原理阐明像旋产生的原因; 第 3 节通过分析物像的对应关系, 给

出了消像旋的流程及每个流程的内容; 第 4 节通过相邻画幅的特征点的斜率差提出消旋算法的验证方法; 最后, 文章用实验图像验证了第 3 节给出的消旋算法的正确性。

2 像旋产生原理

静止轨道二维指向面阵成像系统的工作原理如图 1 所示, 右侧圆形为指向镜, 指向镜分别绕俯仰轴、方位轴旋转, 指向镜的中心指向为图中的 IFOV 足迹, 其对应的角度为指向镜的视轴角。

图 1 中, 指向镜电机转角分别为: α —绕方位轴 Z 转动, 方位转角; β —绕俯仰轴 Y 转动, 俯仰转角。 α 、 β 的正方向均符合右手螺旋定则。

指向镜在初始位置时法向量:

$$N = [\sqrt{2}/2 \quad 0 \quad -\sqrt{2}/2]^T,$$

因此指向镜反射矩阵^[9]为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (1)$$

当指向镜绕 Z 轴转动 α , Y 轴转动 β 时, 坐标转换矩阵 G_{10} 为

$$G_{10} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

假设 A 经由已转动 α 、 β 角的二维指向镜反射, 其出射矢量:

$$A' = (G_{10} \cdot R \cdot G_{10}^{-1}) \cdot A。 \quad (3)$$

本文用视轴 OP 的偏转角作为像旋角, 视轴为

$$OP = [-1 \quad 0 \quad 0]^T,$$

则:

$$OP' = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha \sin 2\beta - \sin^2 \alpha \\ -\sin 2\alpha (\sin 2\beta - 1)/2 \\ -\cos \alpha \cos 2\beta \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

OP' 与 Z 轴正方向的夹角 δ 为像旋角, 像旋角的正负由正切值决定:

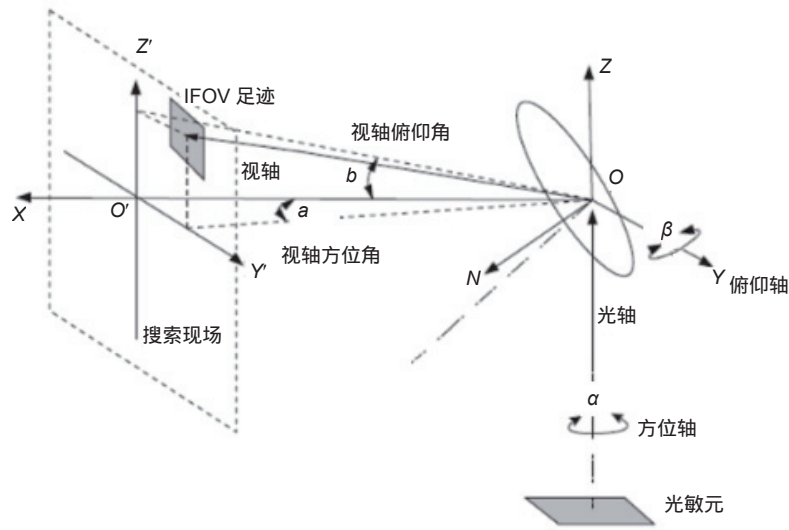


图 1 二维指向镜工作原理

Fig. 1 Operating principle of 2-dimentional pointing mirror

$$\tan \delta = \frac{OP'_y}{OP'_z} = \frac{\sin \alpha (\sin 2\beta - 1)}{\cos 2\beta} \quad (5)$$

图 2 中, 2(a)为探测器平面, 2(b)为沿 X 轴正向观察的指向平面, 2(c)为沿 X 轴负向指向平面^[10]。

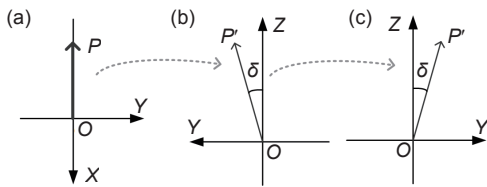


图 2 像旋角 δ 示意图

Fig. 2 Sketch map of rotation angle δ

3 消像旋算法

二维指向镜的转动引入了像面旋转的误差, 影响遥感图与地面位置对应和后续图像拼接。本文提出的消像旋流程如图 3 所示, 其原理主要是基于物像的对应关系。

3.1 相关参数

由像旋产生原理中可以得知, 当指向镜不存在初始偏置角时, 造成像面旋转的主要有两个因素: 方位转角 α , 俯仰转角 β 。另外, 光学系统的参数: 焦距 f , 物面距离 d_{obj} , 探测器规模 $M \times N$ 和探测器像元尺寸 l_{pixel} 对消像旋有一定影响, 详见 3.3 图像元素对应关系。

本文实验中所用的静止轨道遥感样机光学系统参数如表 1 所示。



图 3 消像旋流程图

Fig. 3 Flow chart of image rotation elimination

表 1 本文用到的系统参数

Table 1 System parameters in this paper

内容	参数
波段	可见近红外
轨道高度/km	35800
探测器像元大小	12 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
面阵规模	2048 \times 2048
子图像个数	5 \times 5
焦距/mm	1714
角分辨率/ μrad	7
子图像视场	0.82 $^\circ \times 0.82^\circ$

3.2 消旋图像的轮廓

绘制出待消旋和已消旋的图像轮廓是消像旋的基础。根据合适的图像轮廓和探测器规模, 无像旋图像

内部的点可以被一一表示出来。

在对地遥感中，探测器得到的方形图像是带有像旋的，如图 4 所示， D' 、 E' 、 F' 、 G' 是方形图像的四个顶点，这四个点可经由指向镜在物面中找到对应的四个物点，分别是 D 、 E 、 F 、 G 。

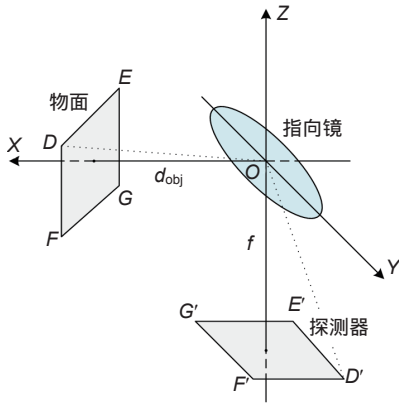


图 4 二维指向镜的物面对应关系

Fig. 4 Corresponding relation of object and image of 2-dimentional pointing mirror

他们的对应关系如下：

$$\mathbf{OX}_{temp} = (\mathbf{G}_{10} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}_{10}^{-1}) \cdot \mathbf{OX}' \quad (6)$$

$$t_1 = d_{obj} / \mathbf{OX}_{temp}(1) \quad (7)$$

$$\mathbf{OX} = t_1 \times \mathbf{OX}_{temp} \quad (8)$$

式中： X' 是探测器方形图像第 i 行、第 j 列的点，探测器总共有 M 行、 N 列， X 是物面与 X' 对应的点，行列方向的物理距离分别表示为 d_i 、 d_j ， R 是指向镜转动前的反射矩阵， G_{10} 是指向镜转动后的坐标转换矩阵。 t_1 是为了 OX 的 X 方向归一化为物距 d_{obj} 。

$$\mathbf{OX}' = [(i - M/2) \times l_{pixel} \quad (j - N/2) \times l_{pixel} \quad f]^T$$

$$\mathbf{OX} = [d_{obj} \quad d_i \quad d_j]^T$$

由于二维指向镜转动的作用点在镜子的中心，与

探测器的中心、光轴在同一条直线上，所以在 OX 的表示中加入了 $-M/2$ 、 $-N/2$ 的偏置。

将探测器方形图像四个顶点的行列坐标带入式 (6)，可得到物面 D 、 E 、 F 、 G 四个对应的顶点。然而，这四个顶点是旋转了的四边形，取四个顶点的外接长方形 $PQSR$ 为已消旋的图像轮廓，如图 5 所示。

3.3 图像元素对应关系

已消旋的图像轮廓 $PQSR$ 中的每一个离散点 J ，在 $D'E'F'G'$ 中到对应的点 J' 。 J 与 J' 的对应关系如下：

$$\mathbf{OJ} = [d_{obj} \quad r_j \quad c_j]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{OJ}'_{temp} = (\mathbf{G}_{10} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}_{10}^{-1}) \cdot \mathbf{OJ} \quad (10)$$

$$t_2 = -f / \mathbf{OJ}'_{temp}(3) \quad (11)$$

$$\mathbf{OJ}' = t_2 \times \mathbf{OJ}'_{temp} = [x_{j'} \quad y_{j'} \quad -f]^T \quad (12)$$

$$r_{j'} = -x_{j'} / l_{pixel} + N/2 \quad (13)$$

$$c_{j'} = y_{j'} / l_{pixel} + M/2 \quad (14)$$

式中： r_j 、 c_j 是 J 点在物面上的离散坐标； $x_{j'}$ 、 $y_{j'}$ 是 J' 点在像面上行、列方向的物理距离； r_j 、 c_j 是 J' 点在探测器上对应的行列，一般都不是离散的值，求 J' 点的灰度值，需要下一步插值来完成。 t_2 是为了 OJ' 的 Z 方向归一化为焦距 f 。

3.4 图像灰度插值，得到消旋后的图像

由于 r_j 、 c_j 不是整数，所以需要探测器对探测器的像旋图像进行插值来获得 J' 的灰度值^[8]，从而得到与之对应的 J 点灰度值，这样，通过像旋图像 $D'E'F'G'$ 反演出非像旋图像 $PQSR$ ，如图 6(a) 所示。然后，对 $PQSR$ 周围的无灰度值点进行剪裁，如图 6(b) 所示，防止 $DEGF$ 与无像素点交界处梯度值大，被视为特征点，影响后续的消旋算法验证。

用双线性插值法求网格内一点 (u, v) 灰度的计算

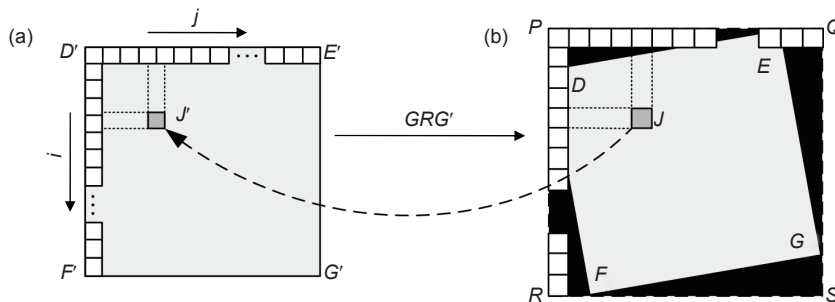


图 5 待消旋和已消旋的图像轮廓示意图

Fig. 5 Sketch map of image outline before (a) and after (b) image rotation elimination

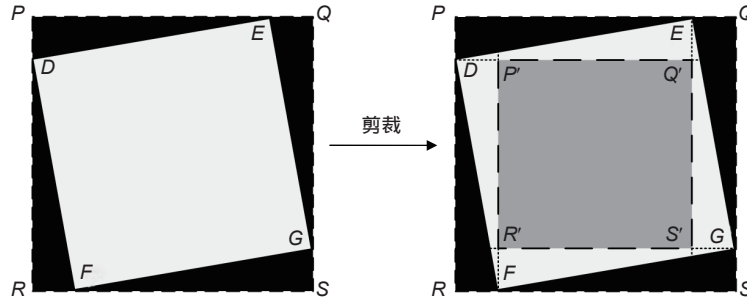


图 6 像旋矫正后的裁剪示意图

Fig. 6 Sketch map of cutting image after image rotation elimination

公式可表示为

$$f(u, v) = A \cdot B \cdot C \quad (15)$$

式中 $f(u, v)$ 为 (u, v) 点的灰度值,

$$A = [I(v), I(1-v)] \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} f(i, j) & f(i, j+1) \\ f(i+1, j) & f(i+1, j+1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = [I(u), I(1-u)]^T \quad (18)$$

用双线性插值方法可得到满意的插值结果, 没有灰度不连续的缺点。但是这种方法求的像元间的灰度具有低通滤波的效果, 使图像的高频分量受损, 图像内轮廓分明的边缘将变得模糊。插值方法如图 7 所示。

4 消像旋算法验证方法

用上述方法对像旋图像进行的处理, 能否真正消除像旋影响, 使图像的点与地理位置更好地对应, 本文提出了消像旋验证方法。

首先, 选取两幅有重叠区域的像旋图像 I_{O1} 、 I_{O2} , 通过本文的消像旋算法得到如图 6 中 $P'Q'S'R'$ 的旋图

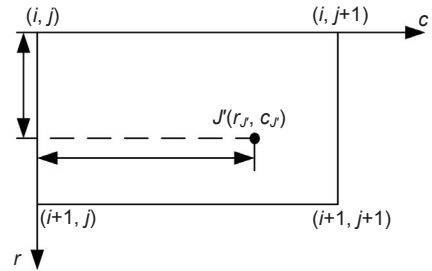


图 7 双线性插值示意图

Fig. 7 Sketch map of bilinear interpolation

像, 分别为 I_{R1} 、 I_{R2} 。

提取 I_{O1} 、 I_{O2} 、 I_{R1} 、 I_{R2} 四幅图像的 SIFT 特征点^[11], 分别对 I_{O1} 和 I_{O2} 、 I_{R1} 和 I_{R2} 进行配准, 用随机抽样一致性(RANSAC)^[11]算法剔除误匹配, 得到 I_{O1} 和 I_{O2} 共有 N_O 对匹配点, I_{R1} 和 I_{R2} 共有 N_R 对匹配点。

如图 8(a)、8(b)所示, I_{O1} 的 A_{O1} 、 B_{O1} 分别与 I_{O2} 的 A_{O2} 、 B_{O2} 匹配, I_{O1} 中 $A_{O1}B_{O1}$ 连线的斜率角为

$$\varphi_{O1} = \arctan \frac{Y_{B_{O1}} - Y_{A_{O1}}}{X_{B_{O1}} - X_{A_{O1}}} \quad (19)$$

I_{O2} 中 $A_{O2}B_{O2}$ 连线的斜率角为 φ_{O2} , 有像旋原始图

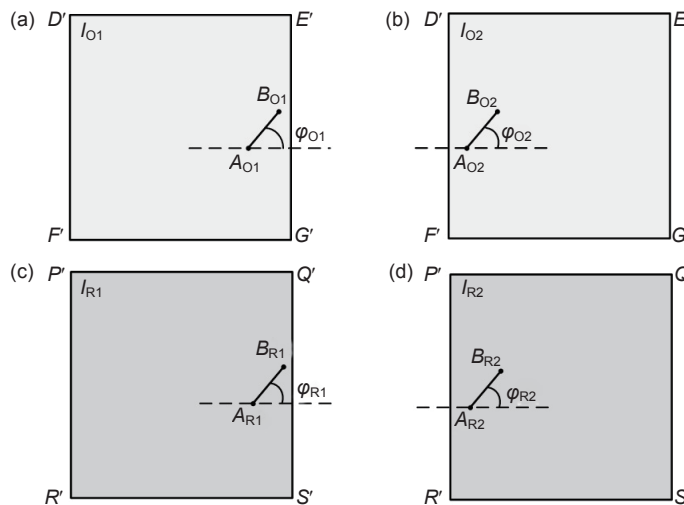


图 8 消旋前后相邻图像的配准点和配准点连线斜率角示意图

Fig. 8 Sketch map of image outline before and after image rotation elimination

像的斜率角差值为

$$\Delta\varphi_O = \varphi_{O2} - \varphi_{O1} \quad (20)$$

相应地,消旋图像如图 8(c)、8(d)所示, I_{R1} 的 A_{R1} 、 B_{R1} 分别与 I_{R2} 的 A_{R2} 、 B_{R2} 匹配, I_{R1} 中 $A_{R1}B_{R1}$ 连线的斜率角为

$$\varphi_{R1} = \arctan \frac{Y_{BR1} - Y_{AR1}}{X_{BR1} - X_{AR1}} \quad (21)$$

I_{R2} 中 $A_{R2}B_{R2}$ 连线的斜率角为 φ_{R2} , 消像旋后图像的斜率角差值为

$$\Delta\varphi_R = \varphi_{R2} - \varphi_{R1} \quad (22)$$

由于像旋角 δ 的正切值为

$$\tan \delta = \frac{OP'_y}{OP'_z} = \frac{\sin \alpha (\sin 2\beta - 1)}{\cos 2\beta} \quad (23)$$

当二维指向镜绕 Z 轴、 Y 轴分别转动 α 、 β 角度时,像旋存在,相邻两幅图像的像旋角不同^[12]。因此,像旋矫正可以消除每幅图像的旋转误差,改善相邻图像的相对旋转,即 $\Delta\varphi_R < \Delta\varphi_O$ 。

实际上,两幅相邻的图像中匹配的特征点很多,假设有 N 个,需要特征点两两组合计算 $\Delta\varphi$, 求出 $N \times (N-1)/2$ 个的平均值 $\Delta\varphi$ 再进行比较。

5 实验与结果

按照图 3 所示的流程,首先进行图像消旋。如图 9 所示,9(a)为未消旋的原图像,对应图 5 中 $D'E'G'F'$; 9(b)是消旋后未经剪裁的图像,对应图 5 中 $PQSR$, 圆圈内包含无像素点; 9(c)是消旋后经剪裁的图像,对应图 5 中的 $P'Q'S'R'$ 。

接着,分别对消旋前后的相邻图像进行配准,配准结果如图 10、图 11 所示。图 10 是一组消旋前的图像,图 11 是消旋后的图像。

为验证消旋算法的效果,根据本文上节的方法得到了消旋前后的 $\Delta\varphi$, 如表 2、图 12 所示。由表 2 数据可知,每组 $\Delta\varphi_R$ 均小于对应的 $\Delta\varphi_O$, 即校正像旋之后相邻图像的相对旋转较校正前平均减小了 39%。

6 结论

本文通过分析电机转角引入像旋的原理,反向提出静轨图像的消旋算法,根据相邻图像的像旋角存在差异,提出消旋算法的验证方法。根据实验的结果,可以看到本文提出的消旋算法,有效地改善了相邻图像间相对旋转,将旋转误差降低了 39%,能够有效提

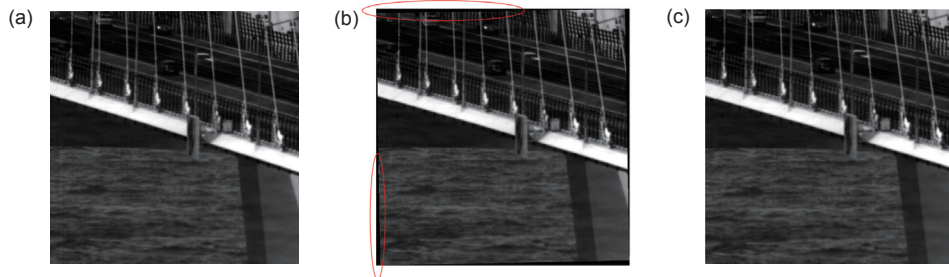


图 9 消像旋前后的图像。(a) 未消旋的原图像; (b) 消旋后未经剪裁的图像; (c) 消旋后经剪裁的图像
Fig. 9 Images before and after image rotation elimination. (a) Original image before image rotation elimination; (b) Uncut image after image rotation elimination; (c) Cut image after image rotation elimination

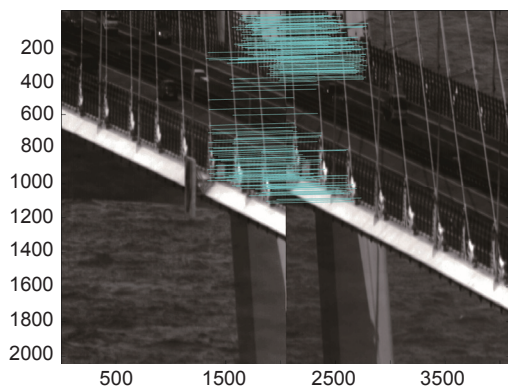


图 10 消旋前的配准图像

Fig. 10 Image registration picture before image rotation elimination

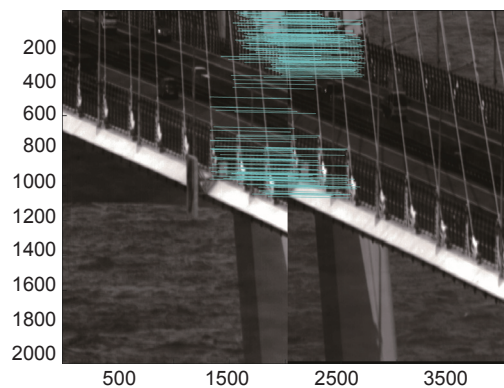


图 11 消旋后的配准图像

Fig. 11 Image registration picture after image rotation elimination

高载荷的空间准确度，使遥感得到的信息与地理位置更好地对应上。

表 2 消旋前后的 $\Delta\varphi$

Table 2 $\Delta\varphi$ for image rotation elimination unfinished and finished

组数	$\Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi_R$	减小比例/%
1	0.7613	0.4992	34.43
2	0.5702	0.2993	47.51
3	0.5175	0.2812	45.66
4	0.5866	0.4196	28.47

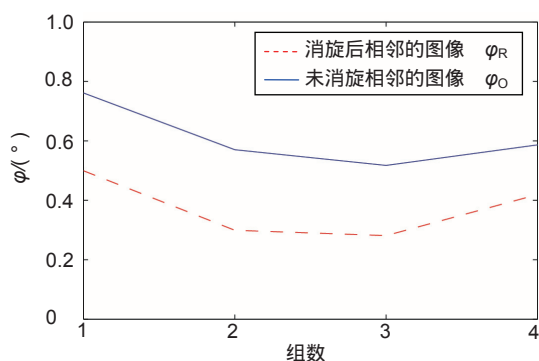


图 12 消旋前后的 $\Delta\varphi$ 分布图

Fig. 12 Distribution diagram of $\Delta\varphi$ before and after image rotation elimination

另外，考虑到电机转角遥测误差约为 $2 \sim 3$ ，根据卫星轨道位置及成像区域，通过像旋角计算公式可知，遥测像旋误差在 10^{-5} 度量级，该误差与像旋角度相差至少 4 个角度量级，可暂时忽略。但是 1.54° 的像旋可以引起 7 km 的定位偏差， 10^{-5} 的遥测像旋误差还是会引引起 3 m 的定位偏差，所以，在今后的工作中，可以循环微调电机转角值遥测值，使得 $\Delta\varphi$ 稳定在最小的范围内，从而更大地降低旋转误差。

参考文献

[1] Zhang E, Gong H X. Research and application of system for offsetting image rotation from 45° rotating scan mirror[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **18**(2): 125–132.
张锴, 龚惠兴. 消除 45° 旋转扫描反射镜像旋系统的研究及应用[J]. *红外与毫米波学报*, 1999, **18**(2): 125–132.

[2] Wang D, Li X Y, Wu Q Z. Design of eliminating image rotation on opto-electronic imaging tracking and measuring device[J]. *Op-*

to-Electronic Engineering, 2012, **39**(1): 108–112.
王岱, 李晓燕, 吴钦章. 某光测设备上消像旋的设计[J]. *光电工程*, 2012, **39**(1): 108–112.

[3] Li S Y, Zhou S C. Analysis of the imaging characteristics of the two-dimensional pointing mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 17–22.
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.

[4] Hui B, Pei Y T, Wang G Q. Optical analysis of space two-axis scanning mirror[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(5): 810–813.
惠彬, 裴云天, 王淦泉. 二维扫描镜扫描特性理论分析[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(5): 810–813.

[5] Wang W, Hong P, Wang B, et al. Characteristic analysis of two-dimensional scanning mirror rotating[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, **13**(2): 82–86.
王武, 洪普, 王波, 等. 二维扫描镜像旋特性分析[J]. *光学与光电技术*, 2015, **13**(2): 82–86.

[6] Wu F, Wang D P. Analysis of scanning traces characteristics of the two-axis pointing mirror in the mode of scanning in given area[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(4): 16–20.
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.

[7] Wang G Q, Chen G L. Two-dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2): 429–433.
王淦泉, 陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(2): 429–433.

[8] Sun D X, Wang J Y. Scan track of system using 45° mirror and its effect on the correction of image rotation[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(1): 19–22.
孙德新, 王建宇. 45° 镜系统扫描轨迹分析及其对像旋校正的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(1): 19–22.

[9] Lian T S. *Conjugate Theory Of Reflecting Prism*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 1–3.
连铜淑. 反射棱镜共轭理论: 光学仪器的调整与稳象[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 1–3.

[10] Wang M Z, Huang X X, Feng Q. Two judging methods of seamless stitching for frame sensor on the geostationary orbit: Grid method and the geometric intersection method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, **21**(6): 871–880.
王梅竹, 黄小仙, 冯旗. 高轨无缝面阵扫描判断方法: 栅格法和几何相交法[J]. *遥感学报*, 2017, **21**(6): 871–880.

[11] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91–110.

[12] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Readings in Computer Vision*, 1987, **24**(6): 726–740.

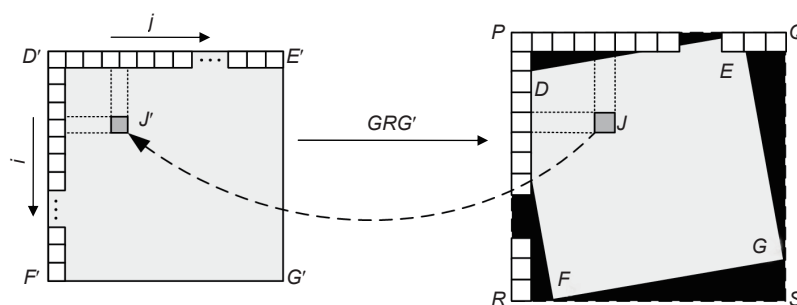
Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method

Wang Meizhu^{1,2,3}, Huang Xiaoxian^{1,2,3}, Feng Qi^{1,2,3*}

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Sketch map of image outline for image rotation elimination unfinished and rotation elimination finished

Overview: China has 18000 km coastline and the oceans have a vital impact on our climate, agriculture and military. At present, the observation of the oceans in our country is still in the polar orbit observation stage with a revisit cycle of 1 ~ 2 days. However, tides, currents, storm surges, oil spills and military activities often change greatly in one day. Therefore, the development of Geostationary Ocean Radiometer is imperative. The geostationary ocean radiometer can perform high-frequency observations of a specific area of ocean. However, due to the influence of the optical system, the observing field is small and additional scanning equipment is needed to expand the observation field. Two-dimensional pointing mirror with plane detector and staring imaging is a better way. Two-dimensional pointing mirror has small size, light weight, and can rotate flexibly. However, the rotation of two-dimensional pointing mirror about its tilt and azimuth axes introduces errors in imaging system, including non-linear errors and image rotation errors.

The purpose of this paper is to eliminate the image rotation errors introduced by two-dimensional pointing mirrors. The image rotation elimination method has also been proposed before, including optical method and image processing method. They are often used in the image rotation of polar orbiting satellites, aimed at linear array detectors and have obvious effects of image rotation elimination, but no quantitative verification method is given. The proposed image rotation elimination method is aimed at the image rotation errors introduced by the two-dimensional pointing plane imaging optical system of geostationary orbit. In this paper, we analyze the image rotation errors, propose the elimination method according to the correspondence between objects and images, give the image rotation elimination formula, and use the bilinear interpolation method to get the refined image. At the same time, we extract the SIFT feature points of the test images, give the corresponding quantitative verification method based on the degree of rotation between feature points of adjacent images. According to images taken by the Geostationary Ocean Radiometer model machine, it is proved that the proposed rotation elimination method can reduce 39% of image rotation errors. This indicates that the algorithm greatly improve the geographical accuracy of two-dimensional directional imaging and improve the accuracy of remote sensing instruments. Therefore, the work lay a good foundation for image processing in two-dimensional pointing plane imaging system.

Citation: Wang M Z, Huang X X, Feng Q. Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170725

Supported by Global Climate Alteration and Sea-air Interaction Special Fund (GASI-03-03-01-01)

* E-mail: fengqi168@vip.sina.com