

一种机载面阵摆扫成像视轴路径规划与重叠率计算的新方法

王崇儒^{1,2}, 韩贵丞¹, 金祥博^{1,2}, 刘军¹, 周成林¹, 王跃明^{1,2,3*}

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要:机载面阵摆扫式成像系统需要足够高的帧间重叠率来避免因扫描过程中视轴的控制误差而导致的漏扫, 这制约了成像系统在大速高比条件下的适应能力, 限制了系统的成像幅宽。论文提出了一种视轴路径规划模型与重叠率计算的新方法, 通过像球面投影的几何分析方法优化设计了成像系统视轴的扫描路径, 并依据像球面中像面投影的方位旋转角度, 建立了一种重叠率计算的新模型。经理论分析与仿真实验验证, 在 40° 侧向凝视成像时, 视轴稳定精度由 2.93° 提高到 0.15°, 相同速高比、单行 5 帧摆扫成像时, 作业效率提高约 32%。论文研究工作对推动机载摆扫成像技术向着宽视场、大速高比、高分辨率方向的进一步发展具有重要意义。

关键词:航空遥感; 摆扫成像; 像移; 重叠率; 视轴稳定

中图分类号: P237

文献标识码: A

A new method for LOS path planning and overlap rate setting of airborne area-array whisk-broom imaging

WANG Chong-Ru^{1,2}, HANG Gui-Cheng¹, JIN Xiang-Bo^{1,2}, LIU Jun¹,
ZHOU Cheng-Lin¹, WANG Yue-Ming^{1,2,3*}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, 310024, China)

Abstract: Airborne area array whisk-broom imaging systems require a high enough overlap rate between frames to avoid missed scans caused by the control error of the line of sight (LOS) during the scanning process, which restricts the imaging system's adaptability under conditions of high speed height ratio, and limits the imaging swath of the system. This paper proposes a new method of LOS path planning model and overlap rate calculation. The scanning path of the LOS of the imaging system is optimal designed through the geometric analysis method of the image spherical projection, and based on the azimuth rotation angle of the image plane projection in the image sphere, a new model for overlap rate calculation is developed. Theoretical analysis and simulation experiments have verified that the stabilization accuracy of the LOS is increased from 2.93° to 0.15° when the lateral gaze imaging is performed at 40°, and the operation efficiency is increased by about 32% when the same speed height ratio and single-line 5-frame whisk-broom imaging are performed. The research work of this thesis is of great significance to promote the further development of airborne whisk-broom imaging technology toward the direction of wide field of view, high speed height ratio, and high resolution.

Key words: airborne remote sensing, whisk-broom imaging, image motion, overlap rate, LOS stabilization

收稿日期: 2022-07-03, 修回日期: 2022-11-03

Received date: 2022-07-03, Revised date: 2022-11-03

基金项目: 上海市产业协同创新基金(HCXBCY-2021-001)

Foundation item: Shanghai Industrial Collaborative Innovation Fund (HCXBCY-2021-001)

作者简介(Biography): 王崇儒(1993—), 男, 山西文水人, 博士研究生, 主要研究领域航空面阵扫描系统、视轴稳定系统. E-mail: wangchongru-cas@foxmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn

引言

如今,机载光电成像技术一直在朝着大视场、高分辨率成像的方向发展,越来越多的航空相机采用了摆扫成像技术^[1-3],以期解决有限面阵下的大视场和高分辨率成像无法兼顾的问题。但是在高速高比工作条件下,系统没有多余的时间去增加单行摆扫成像的次数,为了进一步提高成像幅宽,提高系统工作效率,就必须对视轴扫描路径进行精准的控制,最大程度保持重叠率的稳定并对重叠率进行精确的设定。

在视轴控制的相关研究当中,关于目标定位和像移研究的文献很多,几乎都采用坐标变换法来进行计算^[4-7],文献^[4-5]使用坐标变换的方法系统地建立了从成像系统像面坐标系到地面目标坐标系的目标定位数学模型,并较为全面地分析了影响定位精度的各种误差因素,文献^[6-7]在目标定位的基础上进一步建立了成像像移计算模型,并同样可以进行误差分析,以上模型均能精确计算地物目标的位置、速度信息,指导成像系统视轴的运动指向,但是完全使用坐标变换的计算方法计算量很大,难以在载机高动态运动情况下的机上实时高速运算补偿,影响控制性能,造成补偿的滞后。此外也有文献^[8-9]介绍了实际工程当中使用的正交分解的方法,这种方法虽然计算简单,但孤立地分析各个方向的角速度,没有考虑不同方向角度之间的互相影响,更没有考虑不同旋转系统之间的换算,在成像角度较大时计算误差较大。而针对重叠率分析的文献就比较稀少了^[10-11]。可能的原因一方面早期稳定平台技术不成熟以及相机曝光时间较长,导致像移成为影响成像质量的主要因素;另一方面是之前主流的航空相机固定下视成像,成像视角小,不需要考虑大倾斜角度下的多帧图像拼接问题。但是随着机载光电成像技术的进步,为了追求大视场的高效率成像,越来越多的航空相机采用了摆扫成像技术。然而至今,仍然没有一篇文献结合像移补偿和重叠率控制,对视轴运动路径进行系统设计与误差分析。

首先通过建立五个坐标系,将载机位移运动、载机姿态变化运动和系统运动执行机构摆扫运动统一到同一旋转参考系,之后使用一种基于像球面投影的几何分析方法,结合像移补偿与扫描运动,系统设计了相机视轴的运动路径,再针对两轴下视相机,通过坐标变换法计算出执行机构运动角度,

最后依据像球面中像面投影的方位旋转角度设计了一种有效重叠率的计算方法并进行了实验验证与误差分析。

1 坐标系的建立

1.1 地面地理坐标系 D-DxDyDz 与载机地理坐标系 S-SxSySz

地面地理坐标系与载机地理坐标系的 x, y, z 轴方向相同,分别指向正北、正东、地心方向, S 点位于载机质心, D 点位于载机附近物点平面,如图 1 所示。

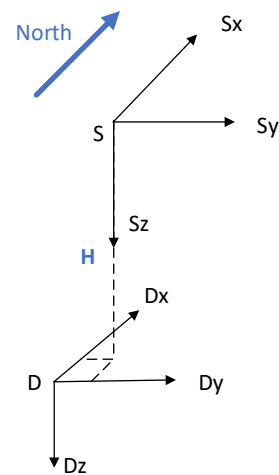


图1 地面地理坐标系 D-DxDyDz 与载机地理坐标系 S-SxSySz
Fig. 1 Geographic coordinate system of the ground D-DxDyDz and geographic coordinate system of the vehicle S-SxSySz

1.2 载机机体坐标系 A-AxAyAz 与成像系统坐标系 C-CxCyCz

载机机体坐标系 A_x 轴指向机头方向, A_y 轴指向机右翼方向, A_z 轴指向载机正下方, 坐标系原点 A、C 与 S 点重合, S 坐标系先后绕 z, y, x 轴逆时针旋转(内旋)^[12]姿态方位角 ψ 、姿态俯仰角 θ 、姿态横滚角 ϕ 后得到 A 坐标系, A 坐标系再先后绕 x, y 轴逆时针旋转(内旋)机构横滚角 α 、机构俯仰角 β 后得到成像系统坐标系(以横滚外框架、俯仰内框架为执行机构的两轴成像系统为例), 成像系统视轴指向为 C_z 轴方向, 如图 2 所示。

1.3 摄影坐标系 R-RxRyRz

另外建立摄影坐标系来进行视轴运动路径和重叠率的分析。设载机进入航带线时的初始方位角为 ψ_0 , 摄影坐标系由 S 坐标系绕 z 轴逆时针旋转 ψ_0 得到, 每条航带开始时重新初始化 ψ_0 。成像系统视

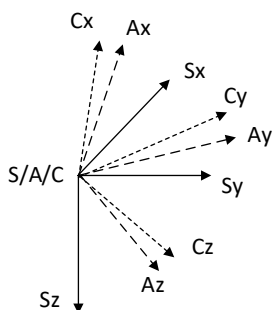


图2 载机机体坐标系 A-Ax Ay Az 与成像系统坐标系 C-Cx-Cy-Cz

Fig. 2 Coordinate systems of the vehicle body A-Ax Ay Az and coordinate systems of the camera C-Cx Cy Cz

轴在 R 坐标系下的姿态角用俯仰 φ 、横滚 ω 、方位 κ 表示,即 R 坐标系先后绕 y、x、z 轴逆时针旋转(内旋) φ 、 ω 、 κ 后可得到 C 坐标系,如图 3 所示。

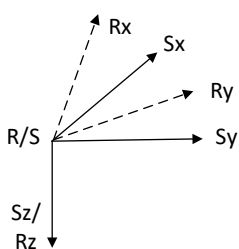


图3 摄影坐标系 R-Rx Ry Rz

Fig. 3 Coordinate systems of photography R-Rx Ry Rz

图 4 为摆扫成像示意图,以 R_x 轴方向作为该航带摄影基线,视轴地面路径垂直于 R_x 轴摆扫成像,虚线为飞机航线方向。

2 基于像球面投影的视轴路径规划与重叠率计算

视轴运动路径的规划,要同时考虑载机的飞行平移运动、载机的姿态旋转运动以及成像系统运动执行机构的摆扫旋转运动,又因为视轴运动为中心旋转运动,故需要将以上运动都归转到同一坐标系内同一中心的旋转运动。此外航空对地摄影属于中心平面投影,由于投影变换带来的形变,投影在地平面的像面均为不规则的四边形,很难进行重叠率的计算。所以本文使用一种基于像球面投影的视轴运动路径规划与重叠率计算方法。在摄影坐标系中,像面绕投影中心的三维旋转组成一个以投影中心为球心的像球面,将飞行过程中地物目标相对投影中心的平面运动转化为角度旋转运动,结合摆扫运动

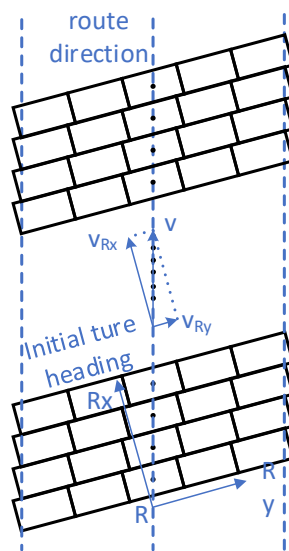


图4 摆扫成像示意图

Fig. 4 The schematic diagram of whisk-broom imaging

设计出成像系统的视轴运动路径,最终通过坐标变换结合载机姿态角解算出执行机构的运动角度,来进行视轴控制。此外在像球面上的像面投影大小形状均一致,也更加适合进行重叠率的计算。

2.1 视轴运动路径设计

2.1.1 视轴旋转系统的选择

视轴 OU 与其在坐标系 xOz 、 yOz 平面上的投影以及 Oz 轴围成了 a、b、c、d 四个角,如图 5 所示,其中任意两个角便可决定 OU 的指向,不同的角度表达代表了不同的旋转系统,PR(俯仰-横滚)旋转系统使用的是 a、d 角,RP(横滚-俯仰)旋转系统使用的是 b、c 角。

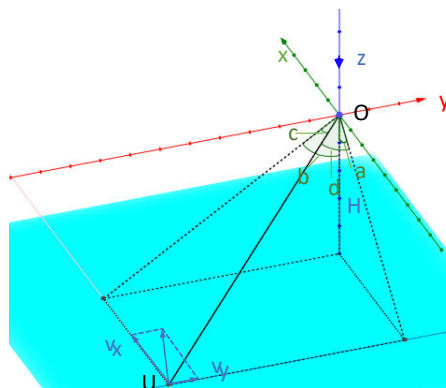


图5 视轴 OU 与其四个定位角

Fig. 5 LOS OU and its four positioning angles

为了方便重叠率的设计,像移补偿运动不能影响扫描轴的扫描中心。此外,像移运动主要发生 x

轴方向上,为了方便之后的简化运算,视轴运动设计采用PR旋转系统,即使用a、d角来表示,对应摄影坐标系为 φ 、 ω 角。如图6所示,绿色球面为像球面,球面红色小圆为俯仰角度变化时视轴在球面交点的运动路径,蓝色大圆为横滚角度变化时的运动路径,当地物目标相对投影中心的位移被补偿后,投影在像球面的目标点相对视轴投影点就是相对静止的。

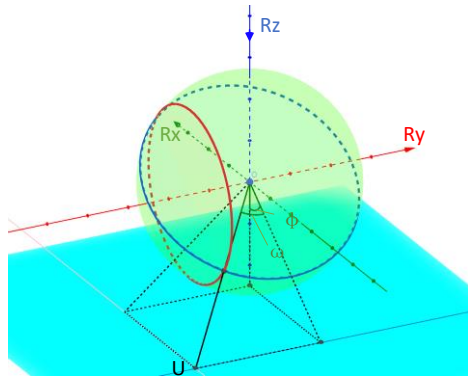


图6 R坐标系下PR旋转系统

Fig. 6 PR rotary system in R coordinate systems

2.1.2 视轴运动规划角计算

经几何计算分析,可得视轴俯仰角及角速度运动表示为:

$$\begin{aligned}\varphi &= \arctan\left(\frac{H \cdot \tan \varphi_0 + v_{Rx}t}{H}\right) \\ &= \arctan\left(\tan \varphi_0 + v_{Rx}t/H\right) \\ \dot{\varphi} &= \frac{v_{Rx}/H}{1 + (\tan \varphi_0 + v_{Rx}t/H)^2}\end{aligned}, \quad (1)$$

视轴横滚角及角速度运动表示为:

$$\begin{aligned}\omega &= \arctan\left(\frac{H \tan \omega_0 / \cos \varphi_0 - v_{Ry}t}{H / \cos \varphi}\right) + \omega' \\ &= \arctan\left(\frac{\tan \omega_0 \cos \varphi}{\cos \varphi_0} - \frac{v_{Ry}t \cos \varphi}{H}\right) + \omega' t \\ \dot{\omega} &= \frac{\dot{\varphi} \tan \omega_0 \sin \varphi - v_{Ry}(\cos \varphi - t \dot{\varphi} \sin \varphi)}{\cos \varphi_0} \cdot \frac{H}{1 + \left(\frac{\tan \omega_0 \cos \varphi}{\cos \varphi_0} - \frac{v_{Ry}t \cos \varphi}{H}\right)^2} + \frac{\omega_{total}}{T_{scan}}\end{aligned}, \quad (2)$$

其中 ω_0 、 φ_0 为初始角度, ω' 为扫描角, ω_{total} 为总扫描行程, T_{scan} 为一个摆扫成像周期,目标相对载体移动速度 v_R 为(v_s 为载体速度):

$$\begin{bmatrix} v_{Rx} \\ v_{Ry} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & \sin \psi_0 \\ -\sin \psi_0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{Sx} \\ v_{Sy} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.1.3 公式简化解耦

我们发现 ω 角计算公式较为复杂,且与 φ 角耦合,不利于实时机上运算及运动控制,影响控制响应速度和两轴控制独立性,故此接下来尝试对计算公式进行简化并说明其中的误差:

1. φ 角变化会引起的 ω 角度变化,但由于一般实际当中 φ 角变化幅度都不大,约 $\pm 10^\circ$ 以内, $\cos \varphi \in (-0.9848, 0.9848)$, $\cos \varphi \approx \cos \varphi_0 \approx 1$,故另 $\cos \varphi = \cos \varphi_0$,对 ω 角(前半部分)造成的误差不超过0.8%;

2. $\omega_{total} = \arctan(\tan(\omega_{total, \varphi=0}) \times \cos \varphi)$, ω_{total} 也会受 φ 角变化影响,若另 $\cos \varphi = 1$,对 ω_{total} 角造成的误差不超过1%。

故以上两处简化,对最终 ω 角计算结果的误差不会超过1%,工程使用可以进行简化,简化后的扫描公式为:

$$\begin{aligned}\omega &= \arctan\left(\frac{H \tan \omega_0 / \cos \varphi_0 - v_{Ry}t}{H / \cos \varphi_0}\right) + \omega' \\ &= \arctan(\tan \omega_0 - v_{Ry}t/H) + \omega' t \\ \dot{\omega} &= \frac{-v_{Ry}/H}{1 + (\tan \omega_0 - v_{Ry}t/H)^2} + \frac{\omega_{total}}{T_{scan}}\end{aligned} \quad (4)$$

2.2 机构运动角度解算

已知载体初始方位角 ψ_0 以及姿态方位角 ψ 、俯仰角 θ 、横滚角 Φ ,和规划视轴俯仰角 φ 、横滚角 ω ,以及待求的执行机构横滚角 α 、俯仰角 β 及视轴方位角 κ ,通过坐标变换列出矩阵等式:

$$\begin{aligned}R\beta \cdot R\alpha \cdot R\phi \cdot R\theta \cdot R(\psi - \psi_0) &= \\ R\kappa \cdot R\omega \cdot R\varphi & \\ \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} & \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} & \\ \begin{bmatrix} \cos(\psi - \psi_0) & \sin(\psi - \psi_0) & 0 \\ -\sin(\psi - \psi_0) & \cos(\psi - \psi_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \cdot (5) \\ \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} & \\ \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} & \end{aligned}$$

经过变换可得坐标变换矩阵R为:

$$R\omega \cdot R\varphi \cdot R'(\psi - \psi_0) \cdot R'\theta \cdot R'\phi = R'\kappa \cdot R\beta \cdot R\alpha = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\kappa) & \cos(\kappa)\sin(\beta)\sin(\alpha) - \cos(\alpha)\sin(\kappa) & -\sin(\kappa)\sin(\alpha) - \cos(\kappa)\cos(\alpha)\sin(\beta) \\ \cos(\beta)\sin(\kappa) & \cos(\kappa)\cos(\alpha) + \sin(\beta)\sin(\kappa)\sin(\alpha) & \cos(\kappa)\sin(\alpha) - \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\kappa) \\ \sin(\beta) & -\cos(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta)\cos(\alpha) \end{bmatrix} = R' \quad (6)$$

最后可求得机构横滚角 α , 俯仰角 β 以及视轴方位角 κ 为:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan2(-R(3,2), R(3,3)) \\ \beta &= \arctan2(R(3,1), \sqrt{(R(3,2))^2 + (R(3,3))^2}) \quad (7) \\ \kappa &= \arctan2(R(2,1), R(1,1)) \end{aligned}$$

2.3 基于 κ 角旋转的重叠率计算

由上节计算可以看出, 两自由度补偿系统无法完全补偿三自由度视轴, 最后留下一个视轴方位角无法补偿, 但不影响视轴指向, 只是影响视轴旋转, 当视轴发生旋转时, 必然导致像面在像球面投影无法平行对齐。为了方便讨论重叠率, 我们在此对旋转后的像面投影进行裁切, 使其再次对齐, 并计算其有效视场角和有效重叠率。

L, W 为成像系统翼展、飞行方向视场角(假设飞行方向沿短边), 当一帧图像有角度 κ 的旋转时, 我们对其进行最大化切割, 如图 7 所示。

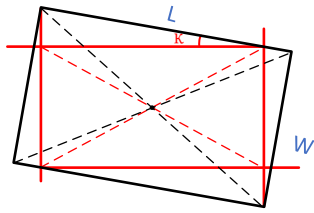


图 7 κ 角旋转后像面投影的最大化切割示意图
Fig. 7 The schematic diagram of maximized cutting of image plane projection after κ -angle rotation

通过简单的几何推导可得, 其有效视角变为:

$$\begin{aligned} L' &= L \cos|\kappa| - W \sin|\kappa| \\ W' &= W \frac{1 + \sin^2|\kappa|}{\cos|\kappa|} - L \sin|\kappa| \quad (8) \end{aligned}$$

裁切对齐后的相邻像面投影如图 8 所示, S 为两相邻帧夹角。

相邻帧之间的有效重叠率为:

$$\delta_l' = \frac{(L_1' + L_2')/2 - S}{(L_1' + L_2')/2} \quad (9)$$

3 实验验证

3.1 实验输入数据

以某型吊舱长焦相机为实验对象, 其单帧视场角为 $20.18^\circ \times 15.21^\circ$, 在飞行高度 6 000 m, 速高比

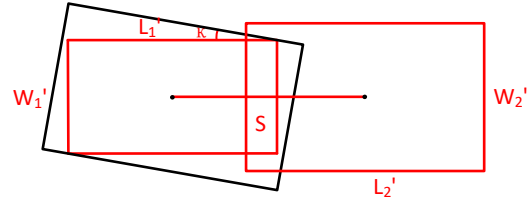


图 8 裁切对齐后重叠率计算示意图
Fig. 8 The schematic diagram of calculation of overlap ratio after cropping and alignment

0.042, 单行摆扫成像 5 帧情形下, 截取其载机实际作业时单条航带内的姿态角度变化曲线, 如图 9 所示, 从中选取部分具有代表性的成像点位数据来进行后续的实验分析。后续两节通过使用经验证的坐标变换的目标定位方法^[4], 计算像面中心点与四角点在地面地理坐标系的坐标, 来进行在线仿真验证, 以此来验证本方法的理论正确性。

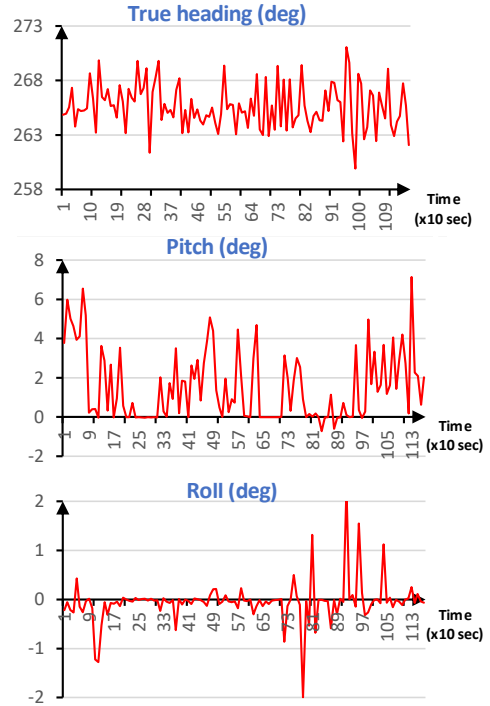


图 9 载机姿态角度变化曲线
Fig. 9 Aircraft attitude angle change curve

3.2 定点凝视模式下的视轴稳定性验证

首先通过定点凝视(初始视轴角横滚 -40° 、俯

仰 5°)成像模式来验证方法的视轴稳定性。图10为载机飞行过程中,一个成像周期内对一定点目标进行多次成像后,像面中心点在摄影坐标系的坐标点位置图,以此来反映视轴稳定效果。图10(a)为本文方法取得的视轴稳定效果,视轴偏差仅发生在y轴,最大偏差约20 m,视角误差约为 0.15° ,占总角度的 0.37% ,符合之前的分析结果;图10(b)为现在工程上使用的正交投影方法视轴稳定效果,最大直线误差约400 m,对应视角误差 2.93° 。本方法在视轴定位精度上由传统方法的 2.93° ,提高到 0.15° 。

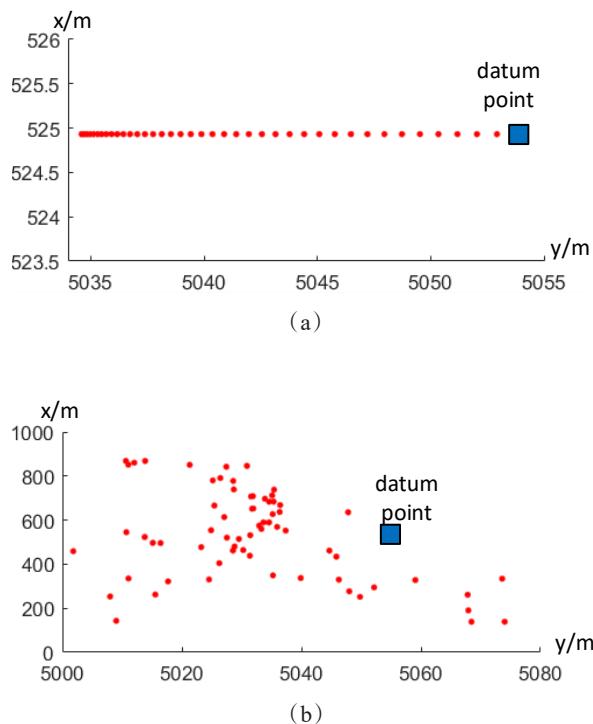


图10 视轴稳定效果图(a)本文方法稳定效果,(b)传统方法稳定效果

Fig. 10 Stabilizing effects of LOS (a) Stabilizing effects of this method, (b) Stabilizing effects of traditional method

3.3 摆扫成像模式下重叠率设定验证

接下来进行摆扫成像工作模式下的重叠率设定验证。经计算,在当前姿态扰动输入下, $|k|$ 波动范围位于 4.60° 之内,要保证有效重叠率大于0,即成像工作时无漏扫发生,翼向、航向重叠率应至少设置为 6.37% 、 9.67% ,按设定重叠率模拟成像效果如图11(a),可以实现测区全覆盖。相比传统正交投影方法的成像效果如图11(b),其重叠率设置使用了通常实际测绘工作时的 20% 的经验值,可以看

到其扫描视轴还是存在明显的偏移, 20% 的重叠率设定也是合理的。在此情境下,本文方法相比传统方法,在理论上可提高约 32.14% 的工作效率。

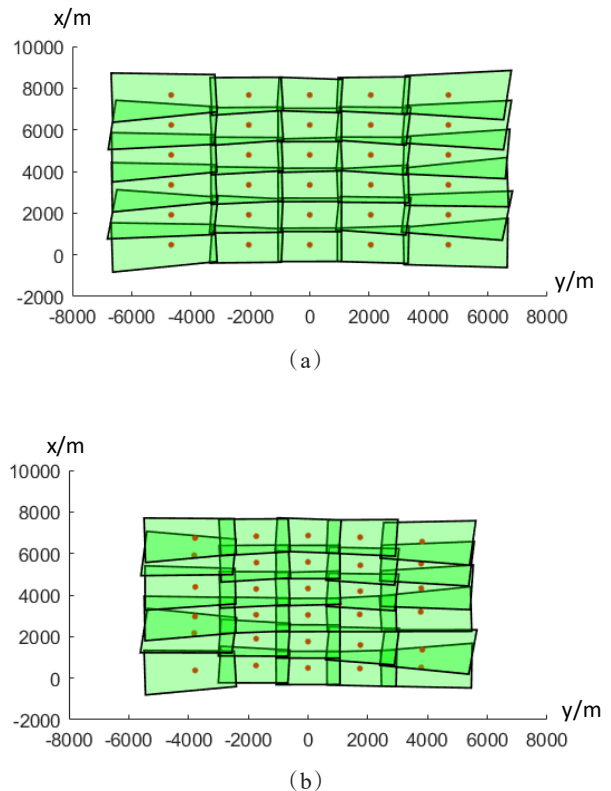


图11 模拟成像效果图(a)本文方法成像效果,(b)传统方法成像效果

Fig. 11 Simulate imaging effects (a) Imaging effects of this method, (b) Imaging effects of traditional method

4 误差分析

以上模拟仿真在理想情况下对视轴角度和重叠率进行了计算。但实际成像系统还存在系统误差:如模型误差,以及随机误差、测量误差和控制误差等,势必会对实际视轴角与重叠率造成影响。现以飞行某一 $|k|$ 值较大的时刻数据进行分析,将模型误差、测量误差、控制误差全部纳入分析,均以正态分布函数来模拟参数误差分布,然后使用蒙特卡洛法来计算最终结果的误差分布,以此来估计实际情况下的工作状态。

计算过程如表1所示,先通过姿态角和规划视轴角,求出规划机构角,再通过姿态角和叠加控制误差后的实际机构角,求出实际视轴角,对比规划视轴角与实际视轴角,即可计算出实际视轴控制误

表 1 误差计算表

Table 1 Error calculation table

	误差源	均值 $\mu(^{\circ})$	标准差 $\sigma(^{\circ})$	误差类型
输入 1	姿态方位角 ψ	-3.58	0.03	随机误差:来自 POS_AV610(SPS)数据
	姿态俯仰角 θ	2.12	0.01	
	姿态横滚角 Φ	-0.52	0.01	
	规划视轴俯仰角 φ	5.00	0.00	系统误差:模型误差
	规划视轴横滚角 ω	-40.00	0.07	
输出 1	规划机构横滚角 α	-39.70	0.07	
	规划机构俯仰角 β	-0.10	0.02	
	视轴方位角 κ	-4.59	0.02	
输入 2	姿态方位角 ψ	-3.58	0.03	随机误差:来自 POS_AV610(SPS)数据
	姿态俯仰角 θ	2.12	0.01	
	姿态横滚角 Φ	-0.52	0.01	
	实际机构横滚角 α'	-39.70	0.09	随机误差:目标机构角叠加系统实际控制误差
	实际机构俯仰角 β'	-0.16	0.04	
输出 2	实际视轴俯仰角 φ'	4.92	0.06	
	实际视轴横滚角 ω'	-40.00	0.09	
	实际视轴方位角 κ'	-4.54	0.05	

差,再叠加实际视轴方位角旋转带来的重叠率损失,即可计算实际的重叠率误差。

经以上计算分析,最终摆扫过程当中的视轴定位精度(μ 残差加 2 倍 σ):俯仰角误差($-0.20^{\circ} \sim 0.04^{\circ}$)、横滚角误差($-0.18^{\circ} \sim 0.18^{\circ}$), $|\kappa|$ 值范围位于 4.64° 之内,综合考虑视轴误差与 κ 角旋转,重叠率应设置为 6.42%、9.75%,所以考虑误差来讲,相比传统方法 20% 重叠率仍可提高约 31.96% 以上工作效率。

5 结论

为了进一步提高机载摆扫成像系统的作业效率,本文针对传统视轴控制方法稳定精度低以及重叠率大问题,在综合考虑计算精度和工程可实现性的情况下重新设计了视轴运动路径控制方法,并针对重叠率进行了精确计算。经过实验验证,本方法将视轴定位精度由 2.93° 提高到 0.15° ,并通过精确设定重叠率,可将作业效率提高约 32%。

值得注意的是,本文重叠率设定仍有较大冗余,因为只有少数情况才会出现较大的 κ 角旋转,实际成像过程当中可酌情减小重叠率设定,并在机上进行实时 κ 值监测,防止漏扫情况的发生,可以进一步提高系统的作业效率。本文控制方法已在某型吊舱相机上得以实现,对推动机载摆扫成像技术向着宽视场、大速高比、高分辨率方向的进一步发展具有重要意义。

References

- [1] WANG C R, YANG L F, CAO X, *et al.*. Recent progress of airborne infrared remote sensing technology in SITP[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(1): 007.(王崇儒,杨利峰,曹汛,等.航空红外光电遥感技术最新进展[J].*红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1): 007.
- [2] LIU Y B, WANG Y K, HAN C G, *et al.*. Aviation wide field thermal imaging technology based on array detector sweep-stop pattern[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2017, **36**(3): 330~335.(刘毓博,王义坤,韩贵丞,等.基于摆扫模式的航空大视场面阵热成像技术[J].*红外与毫米波学报*), 2017, **36**(3): 330~335.
- [3] LI S, HU Y, GONG C L, *et al.*. A step-by-step geometric correction and error analysis of swing-swept array thermal infrared aerial image[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, **39**(2): 242~250.(李赛,胡勇,巩彩兰,等.面阵摆扫热红外航空影像分步几何校正方法[J].*红外与毫米波学报*), 2020, **39**(2): 242~250.
- [4] SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(6): 912.(孙辉.机载光电平台目标定位与误差分析[J].*中国光学*), 2013, **6**(6): 912.
- [5] WANG J Q, JIN G, YAN C X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 105~116.(王家骥,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].*光学精密工程*), 2005, **13**(2): 105~116.
- [6] SUN H, ZHANG S M. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system[J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(11): 2492~2499.(孙辉,张淑梅.机载成像系统像移计算模型与误差分析[J].*光学精密工程*), 2012, **20**(11): 2492~2499.

- [7] WANG J Q, YU P, YAN C X, *et al.*. Space Optical Remote Sensor Image Motion Velocity Vector Computational Modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1585. (王家骥, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*), 2004, **24**(12): 1585.
- [8] WANG Y K, HAN G C, QI H X, *et al.*. Investigation of image motion compensation technique based on real-time LOS tracking [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2015, **34**(6): 0757. (王义坤, 韩贵丞, 齐洪兴, 等. 基于实时视轴跟踪的像移补偿技术研究[J]. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(6): 0757.
- [9] Hong S Y, Wang Y K, Han G C, *et al.*. Study on Real-Time LOS Stabilization Technique Based on Dual Reflectors in the Airborne Remote Sensing Imaging System [J]. *Aero Weaponry*, 2020, **27**(5): 86-90. (洪声艺, 王义坤, 韩贵丞, 等. 基于双反射镜的航空遥感成像系统实时视轴稳定技术研究[J]. *航空兵器*), 2020, **27**(5): 5.
- [10] ZHOU G, ZHAI L P, WANG D J, *et al.*. Research of the Scanning Angle of Panoramic Aerial Camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2473-2478. (周刚, 翟林培, 王德江, 等. 全景式航空相机的扫描角研究[J]. *光学精密工程*), 2008, **16**(12): 2473-2478.
- [11] LI J, HUANG H T, XIU J H, *et al.*. Effect and compensation of overlap influenced by flight parameter of oblique aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, **28**(6): 1254-1264. (李军, 黄厚田, 修吉宏, 等. 载机飞行参数对倾斜成像重叠率影响及补偿[J]. *光学精密工程*), 2020, **28**(6): 1254-1264.
- [12] LIU F, LI G P. A Brief Analysis of the Definition and Application of Euler Angles [J]. *Mathematics Learning and Research*, 2021(2): 3. (刘锋, 李国平. 浅析欧拉角的定义及应用[J]. *数学学习与研究*), 2021(2): 3.