基于临空无人机位姿运动估计的无缝扫描成像控制

王 雪 李 乐 刘志明 刘重阳 王 彪

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033

摘 要:我国致力于建设基于空间卫星、飞艇和飞机的高分辨率对地观测系统,远距离高分辨大视场成像 技术在深空、临空探测领域具有重要意义,为实现高分辨宽视场无缝成像,本文提出一种基于临空无人机位姿 运动估计的无缝扫描成像控制算法。首先,根据临空探测器成像系统的成像方式及工作原理,建立图像与地面 场景映射模型,对序列图像对应的地面区域中心地理信息进行解算,并建立补偿机构的解算模型。然后,针对 成像方式的特点,利用多步卡尔曼滤波算法对载机的位姿进行估计,将估计数据带入补偿机构解算模型,使指 令计算数值逐次逼近实际值。最后,再采用多步卡尔曼滤波算法对模型进行仿真,结果显示对临空无人机的姿 态单步估计误差不大于 0.1°,位置误差不大于 5 m。实际飞行试验结果表明,本文方法的帧间重叠度控制误差 不大于 8%,能够有效实现高分辨宽视场无缝成像,该方法为进一步探索深空领域的应用提供基础。

关键词: 位姿运动估计; 成像区域规划; 无缝扫描; 视轴矢量控制 中图分类号: TN209 文献标识码: A **doi**: 10. 14016/j.cnki.jgzz. 2022. 05. 013

Seamless scanning imaging control based on UAV pose motion estimation

WANG Xue , LI Yue , LIU Zhiming , LIU Chongyang , WANG Biao

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: Long range high-resolution large field of view imaging technology is of great significance in the field of deep space , airborne and aerial exploration. In order to realize high-resolution wide field of view seamless imaging , a seamless scanning imaging control algorithm based on UAV pose motion estimation is proposed in this paper. Firstly , according to the imaging mode and working principle of UAV imaging system , the mapping model between image and ground scene is established , the geographic information of ground area center corresponding to sequence image is solved , and the solution model of compensation mechanism is established. Then , according to the characteristics of imaging mode , this paper expounds the necessity of predicting the position and attitude of the carrier , estimates the position and attitude of the carrier by using multi-step Kalman filtering , brings the estimated data into the solution model of the compensation mechanism , and makes the command calculation value approach the actual value step by step. Finally , the multi-step Kalman filtering is used to simulate the model. The results show that the single-step attitude estimation error of UAV is no more than 0.1° , and the position error is no more than 5 m. The actual flight test results show that the inter frame overlap control error of this method is no more than 8% , and can effectively realize high-resolution and wide field of view seamless imaging. This method provides a basis for further exploring the application of near space and deep space.

Key words: pose motion estimation; imaging area planning; seamless scanning; los vector control

收稿日期: 2022-02-09 基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2018YEB0504600、2018YFB 0504603)、国家自然科学基金(No.52105537)

作者简介:王雪(1985-),女,硕士研究生,主要从事光电载荷成像控制 方面的研究。E-mail: 9750872@qq.com 通信作者:刘志明(1982-),男,博士研究生,研究员,主要从事光电成

像控制方法研究。Email: liuzhiming@ ciomp.ac.cn

1 引言

为建设全天候、全天时、全球覆盖的对地观测系统 统 我国正开展基于空间卫星、飞艇、飞机的高分辨对 地观测系统研究。以临空无人机遥感技术^[1-4]为突破 口 在大倾角、远距离无人机遥感成像的使用约束下,

同时满足高分辨率与宽视场的要求成为无人机遥感 成像的难点^[5]。高分辨率远距离成像约束了光学镜 头的瞬时视场,通常在此约束条件下,光学镜头的瞬 时视场小于1°[6]。若要同时满足高分辨、宽视场成 像 须克服单孔径视场小的缺点。史成勇、邓华夏等 人采用仿生复眼系统的同时 利用多幅成像拼接方式 实现 但其成本、体积和重量带来的附加约束限制了 其在无人机平台上的应用^[7-8];黎荆梅等采用单目系 统分时步进式扫描分幅成像方式 采集具有重叠的影 像条带通过拼接处理形成具有大宽幅的影像 但其步 进式视轴控制方式导致了成像帧频较低 限制了摄影 效果和视场扫描宽度^[9];张祥等采用单目系统连续扫 描分幅成像方式,对序列图像进行无缝拼接,该方式 相对步进式成像可以大大提高成像帧频和效率,有效 地扩大扫描视场和缩短区域扫描时间[10-12],但是文 中在扫描过程中仅对载机的位姿态运动进行了实时 速率补偿 未考虑执行机构的滞后 ,可能因此产生图 像拉缝。

为实现高分辩宽视场无缝成像,本文提出一种基 于临空无人机位姿运动估计的无缝扫描成像控制算 法,为进一步探索临空、深空领域的应用提供基础。 本算法首先说明无人机成像系统模型、成像方式及工 作原理,建立图像与地面场景映射模型,成像方式及工 作原理,建立图像与地面场景映射模型,对序列图像 对应的地面区域中心地理信息进行解算,并建立补偿 机构的解算模型。然后,针对成像方式的特点,说明 对载机位姿预测的必要性,利用多步卡尔曼滤波对载 机的位姿进行估计,将估计数据带入补偿机构解算模 型,使指令计算数值逐次逼近实际真值,让伺服系统 渐进跟踪外部变化带来的指令变化,提高系统对载机 姿态变化的鲁棒性,实现无缝扫描成像控制。

2 对地区域无缝扫描成像算法

2.1 基于地形数据的临空无人机成像模型

临空无人机载光电设备通常是以中心投影方式 进行成像,理想情况下,地物点、投影中心、像点在同 一直线上。在垂直对地成像时,视轴垂直向下,图像 为正射图像,单帧图像中的比例失真度小,且图像对 地形起伏的投影失真不敏感。但倾斜成像时,图像就 会相应的产生几何畸变,图像变为非正射图像,比例 失真及地形起伏投影失真随倾角增大而明显变化。 为了实现成像区域无缝扫描,基于共线方程,建立成 像模型。

本文通过框架坐标系(S)、载机坐标系(AC)、地 理坐标系(NED)和大地坐标系(ECEF)四个坐标系的 转换 将像点在框架坐标系下的坐标转换到大地坐标 系下。连同地物点、投影中心在大地坐标系下的坐标 建立共线方程,并结合地球椭球模型、参考地形数据 求解像点对应的地物点位置。

如图 1 所示,以 WGS-84 坐标系定义的地球椭球 模型表示。



图 1 地球椭球、地理坐标系、载机坐标系与框架坐标系模型

2.2 序列图像地面区域中心地理坐标规划

通过规划宽视场区域面积 ,确定宽视场区域中心 的地理坐标信息 ,依据载机的航向 ,求解区域四角的 地理坐标。首先 ,依据载机的航向确定区域的方向 , 航向坐标系(LL)的原点为载机质心 , O_1X_4 指向与载 机航向角一致 , O_1Z_4 垂直当地参考椭球的切线指向 地心 , O_1Y_4 与其他两轴组成右手坐标系。根据载机航 向角建立地理坐标系向航向坐标系变换矩阵 C_{NED}^{LL} =

 $\begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。利用蒙特卡洛方法^[13]、依次求解

得到区域四角的地理坐标。然后,对宽视场区域进行 静态分割,并计算序列图像各中心位置的地物点坐标 分布。最后,根据区域四角求解其像点在框架坐标系 下的坐标。得到序列图像地面区域中心的地理坐标 后,根据瞬时视场的大小,通过仿真模拟画出序列图 像对应的地面区域分布,仿真结果如图2所示,黑色 粗框为宽视场目标区域,序号1~32代表序列图像的 编号和扫描顺序,仿真结果表明通过相邻序列图像间 重叠度的合理规划,实现了临空无人机位姿虚拟静止 下的宽视场区域无缝扫描。



图 2 各瞬时视场对地区域中心地理坐标规划模拟图

3 临空无人机位姿运动估计算法

临空无人机的飞行姿态受大气湍流、侧风等影响 其模型在大时间尺度上通常为机动性运动模型, 模型中参杂强非线性 强非线性对于载机位姿建模而 言难度很大 相邻幅间的时间间隔约 150 ms,单步线 性预测模型可根据当前的位姿位置和位姿速率对 150 ms 后的位姿进行线性估计,其估算方程为:

X	<i>k</i> +1) =
		/

$\begin{bmatrix} 1\\0\\0\\0\\0 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} \Delta T \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$	0 0 1 0	$0 \\ 0 \\ \Delta T \\ 1 \\ 0$	0 0 0 0	$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Lambda T \end{array}$	$X(k) + \Gamma(k) W(k)$ (1)
0 0 0	0 0 0	0 0 0	1 0 0	0 1 0	$\begin{array}{c} 0\\ \Delta T\\ 1 \end{array}$	

由于组合惯导的测量噪声,当前位姿速率信息具 有随机性加上加速度扰动,150 ms 时间尺度的线性估 计可以引起不可忽视的误差。为使载机运动符合非 机动性运动模型,采用分步预测的方式提高时间分辨 率,将150 ms 的时间尺度分成30段,每5 ms 对载机 的位姿估计一次,由当前位姿状态,及下一时刻的测 量值估计下一时刻的位姿状态,逐次预测,30次后平 滑、精准的逼近临空无人机的真实姿态。

根据卡尔曼滤波理论 X(k) 的估计值 $\hat{X}(k)$ 和其 协方差矩阵 P(k) 的求解过程如下所示。

一步状态预测:

$$\hat{X}_{_{k+1|k}}$$
= $oldsymbol{\Phi}_{_{k+1|k}}\hat{X}_{_k}$ (2)
-步状态协方差矩阵预测:

$$P_{k+1|k} = \Phi_{k+1|k} P_k \Phi_{k+1|k}^T + \Gamma_{k+1|k} Q_{k+1} \Gamma_{k+1|k}^T$$
(3)
滤波增益矩阵:

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^{T} (H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^{T} + R_{k+1})^{-1}$$
(4)
状态量估计:

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1} (Z_{k+1} - H_{k+1} \hat{X}_{k+1|k})$$
 (5)
状态量协方差估计:

$$\boldsymbol{P}_{k+1} = (\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{K}_{k+1} \boldsymbol{H}_{k+1}) \boldsymbol{P}_{k+1|k} (\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{K}_{k+1} \boldsymbol{H}_{k+1})^T + \boldsymbol{K}_{k+1} \boldsymbol{R}_{k+1} \boldsymbol{K}_{k+1}^T$$
(6)

其中: I_n 为 $n \times n$ 阶单位矩阵。

可以看出只要给定初始时刻的初始状态估计量 \hat{X}_1 和其协方差矩阵 P_1 ,就可根据k+1时刻的观测量 Z_{k+1} 采用递推计算的方式得到k+1时刻的状态估计量 \hat{X}_{k+1} 和其协方差矩阵 $P_{k+1}(k=1,2,\cdots)$ 。

图 3 为卡尔曼滤波算法的流程图,从图中可看出 卡尔曼滤波有两个明显的回路:状态量估计回路和状 态量协方差估计回路。其中状态量估计回路需要依

赖状态量协方差估计回路中的增益矩阵。



4 飞行验证

为验证多步卡尔曼滤波预测算法的有效性,采用 临空远距离无人机进行外场实验。该临空无人机相 机焦距为 1.3 m,像元尺寸为 9 μm,采用动态扫描的 方式对目标区域进行成像。同时记录成像时临空无人 机的位置姿态、内、外框架角等注释信息。飞行试验 验证了单步预测和多步卡尔曼滤波预测两种算法,获 取了大量航空遥感图像,我们选取其中 2 组进行分 析,验证该方法在工程应用中的有效性。

成像时临空无人机飞行高度 18 261 m ,成像角度 为 70°。采用多步卡尔曼滤波算法 ,每 5 ms 对姿态进 行一次状态估计 ,并提前一个周期解算内、外框架角 位置 ,对临空无人机姿态的实际采样和预测数据如图 4 所示。经 30 步预测后 ,航向角的估计误差约 0.01° 俯仰角的估计误差约为 0.02° ,横滚角的估计 误差约为 0.01°。如图 5 所示 ,采用多步卡尔曼滤波 预测算法解算的内框架角与理论计算位置误差小于 0.05° ,解算的外框架角与理论计算位置误差小于 0.1°。对目标区域 1 的连续扫描遥感图像如图 6 所 示 ,选取连续 12 张图像进行人工拼接 ,不存在扫描遗 漏区域 ,实现了无缝扫描成像。

5 结论

本文针对临空无人机对地区域无缝扫描成像的 要求 根据临空无人机成像系统和工作原理,提出了 多步卡尔曼滤波预测的方法。建立了图像与地面场

景映射模型,对序列图像对应的地面区域中心地理信 息进行解算,并建立补偿机构的解算模型。然后,针 对成像方式的特点,说明对载机位姿预测的必要性, 利用多步卡尔曼滤波对载机的位姿进行估计,将估计 数据带入补偿机构解算模型,使指令计算数值逐次逼 近实际真值。仿真和飞行试验结果证明:多步卡尔曼 预测算法,可以对临空无人机的位姿运动进行估计, 将框架角的指令估计精度控制在0.1°以内,可以实现 对地区域的无缝扫描。



图 4 对临空无人机姿态的实际采样和预测数据



图 5 内、外框架角的理论位置和预测数据位置对比



图 6 采用多步卡尔曼滤波预测算法飞行成像拼接图

本文方法,初步验证了在 1.8 万公里以上临近空 间高分辨率对地观测领域的有效性,可进一步应用于 深空高分辨探测。

参考文献

- [1] 姜鑫 陈武雄, 聂海涛, 郝志成. 航空遥感影像的实时舰船目标检测 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2360-2369.
- [2] 杜蒙蒙 Ali Roshanianfard 刘颖超.可见光波段无人机遥 感图像的小麦茎蘖密度定量反演 [J].光谱学与光谱分 析 2021 A1(12):3828-3836.
- [3] 姚园,许永森,丁亚林,等.大视场三线阵航空测绘相机 光学系统设计[J].光学精密工程,2018,26(9):2334-2343.
- [4] 贾平等. 无人机系统光电载荷技术 [M]. 北京: 国防工业 出版社 2019.
- [5] 吴雄雄. 基于多尺度成像原理的宽视场高分辨光学系统 设计与研制[D]. 西安: 西安电子科技大学 2018.
- [6] Jia JX, Wang YM, Chen JS, et al. Status and application of adcanced airborne hyperspectral imaging technology: a review [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 104: 103115-103115.
- [7] SHI C Y , WANG Y Y , LIU C Y , et al. SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view [J]. Optics Express , 2017 , 25(26): 32333-32345.
- [8] DENG H X , GAO X C , MA M C , et al. Catadioptric planar compound eye with large field of view [J]. Optics Express , 2018 , 26(10): 12455-12468.
- [9] 黎荆梅,范永祥,王宁,等. 航空推扫式外拼接成像系统 子视场相对定向方法[J]. 光学学报,2021,41(18):93-102.
- [10] 张祥 薜向尧, 王光, 马亚坤等. 单镜头大视场拼接成像 方法及实现 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1346-1353.
- [11] 支政,曲宏松,李静,张贵祥等. 锥摆扫一体化空间相机 成像模式设计[J]. 光学精密工程,2021,29(3):536-546.
- [12] 杨立保 ,李艳红 ,王晶 ,等. 多镜头成像拼接方法在经纬 仪系统中的应用 [J]. 光学精密工程 ,2010 ,18(5):1048 -1053.
- [13] 朱本仁. 蒙特卡洛方法引论[M]. 济南: 山东大学出版 社,1987.