

# 专业学位硕士学位论文

## 基于光电吊舱和惯性导航的海面目标定位研究

Research on Sea Surface Target Localization Based on  
Optoelectronic Pod and Inertial Navigation

作者姓名: 蔡文沛

学科专业: 电子与通信工程

学号: 1120201273

指导教师: 董丽丽

学位类别: 工程硕士

培养单位: 大连海事大学

答辩时间: 2023.6

大连海事大学

Dalian Maritime University

## 摘 要

近年来, 航运事业不断发展, 海上交通日益繁荣, 伴随而来的是海上交通事故频发, 一套可以快速获得目标位置的装置对于方便搜救工作的进行具有重要意义。本文研究的内容依托于国家科技支撑计划课题“船载海面遇险目标快速搜寻技术研究及装置开发”, 该课题通过研制一套机载红外搜寻系统以实现海面遇险目标的检测、定位与跟踪的需求。本文围绕该系统的定位功能展开研究, 首先建立了海面目标定位算法, 然后分析定位中存在的误差以及误差对定位精度的影响, 并以此为根据设计了精度提升方法, 最后通过实验验证本文提出的定位算法以及精度提升方法。

本文建立了一种海面目标定位算法, 由目标在红外图像中的像素坐标、吊舱采集到的姿态角、惯导采集到的定位系统的位姿信息、相机参数等信息, 计算目标的经纬高。这个过程需要建立一系列的坐标系, 包括东北天坐标系、图像坐标系、相机坐标系、地心坐标系等, 通过齐次坐标转换, 计算目标在地心坐标系下的坐标, 再将其转换为经纬度。

本文从地球椭球模型、安装角误差和光轴姿态角随机误差三个方面分析了定位过程中存在的误差。定位算法中的地球椭球模型存在误差, 会对定位精度产生影响。如果定位平台中光电吊舱和惯性导航存在安装角, 那么定位结果会存在误差, 需要先标定安装角再将其补偿。光轴姿态角存在的随机误差也会对定位精度产生影响, 通过卡尔曼滤波消除。除了分析定位中的存在的误差, 还结合实际采集数据, 分别分析经纬高、光轴姿态角以及像素点误差对定位精度的影响。

从补偿安装角和消除光轴随机误差两方面提升定位精度。对于安装角误差, 通过标定得到安装角的数值, 并带入定位算法进行补偿。选择不同数量的目标点进行标定安装角并分别带入定位算法计算定位误差, 从而对比不同数量目标点对标定精度的影响, 实验结果表明, 补偿安装角可以提升定位精度, 选择更多的目标点标定安装角对定位精度的提升更明显。建立自适应卡尔曼滤波模型, 以消除光轴姿态角的随机误差。实验结果表明, 消除光轴姿态角随机误差可以有效提升定位精度。最后通过完整的定位实验, 验证定位算法以及精度的提升。

**关键词:** 地球椭球模型; 海面目标定位; 误差分析; 安装角标定; 卡尔曼滤波

## Research on Sea Surface Target Localization Based on Optoelectronic Pod and Inertial Navigation

### Abstract

In recent years, the development of shipping and marine transportation has been increasingly rapid, accompanied by the frequent occurrence of marine accidents. A device that can quickly obtain targets is of great significance for facilitating search and rescue operations. The research content of this article is based on the National Science and Technology Support Project topic "Research and Development of Fast Search and Rescue Technology for Ship-mounted Seawater Emergency Targets", which aims to develop an onboard infrared search system for detecting, positioning, and tracking seawater emergency targets. This article focuses on the research of the positioning function of the system, and first establishes a sea target positioning algorithm. Then, it analyzes the errors existing in the positioning process and the impact of errors on positioning accuracy, and designs accuracy improvement methods based on this. Finally, the article proposes the positioning algorithm and accuracy improvement methods through experimental verification.

The hardware part of the sea target positioning system consists of an optical and mechanical platform and inertial navigation. This article establishes a sea target positioning algorithm based on the pixel coordinates of the target in the infrared image, the attitude angles collected by the platform, the position and attitude information collected by the inertial navigation system, and the camera parameters. The target's meridian and vertical coordinates are calculated through the integral coordinate transformation. This process requires the establishment of a series of coordinate systems, including the North Celestial Pole coordinate system, the image coordinate system, the camera coordinate system, and the Earth's center coordinate system. Through the coordinate transformation, the target's coordinates in the Earth's center coordinate system are calculated, and then they are converted into meridian and vertical coordinates.

This article analyzes the errors existing in the positioning process from three aspects: the Earth ellipsoid model, the installation error of the installation angle, and the random error of the optical axis attitude angle. The Earth ellipsoid model has errors, which will affect the accuracy of positioning. If the installation angle of the optical and mechanical platform and the inertial navigation system is not calibrated, it will cause positioning errors. The method of compensating for the installation angle can eliminate the installation angle error. The random error of the optical axis attitude angle will also affect the accuracy of

positioning, which can be eliminated by using the Kalman filter. In addition to analyzing the errors existing in the positioning process, the article also analyzes the impact of different amounts of target points on the accuracy of positioning, and compares the effects of different target point amounts on calibration accuracy. The experimental results show that compensating for the installation angle can improve the accuracy of positioning, and choosing more target points for calibration makes the improvement more significant. An adaptive Kalman filter model is established to eliminate the random error of the optical axis attitude angle. The experimental results show that effectively eliminating the random error of the optical axis attitude angle can effectively improve the accuracy of positioning. Finally, through a complete positioning experiment, the positioning algorithm and accuracy improvement methods are verified.

**Key Words:** Earth ellipsoid model; Sea surface target positioning; Error analysis; Installation angle calibration; Kalman filtering

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 研究现状.....	1
1.2.1 目标定位技术发展现状.....	1
1.2.2 定位精度提升方法研究现状.....	4
1.3 本文的主要工作.....	5
2 海面目标定位算法 .....	7
2.1 海面目标定位系统硬件组成 .....	7
2.2 海面目标定位输入参数.....	8
2.3 海面目标定位算法.....	10
2.3.1 计算光轴姿态角 .....	11
2.3.2 计算定位平台地心坐标系下坐标.....	13
2.3.3 计算目标像素在相机坐标系下坐标.....	15
2.3.4 计算目标像素在地心坐标系下坐标.....	17
2.3.5 计算目标在地心坐标系下坐标.....	17
2.3.6 计算目标经纬高.....	19
2.4 海面目标定位算法模型对比 .....	20
2.5 海面目标定位过程中存在的误差 .....	20
2.6 本章小结.....	21
3 海面目标定位误差分析 .....	22
3.1 目标定位误差来源.....	22
3.1.1 地球椭球模型误差分析.....	22
3.1.2 吊舱、惯导安装角误差分析.....	23
3.1.3 光轴姿态角随机误差分析.....	24
3.2 定位参数误差对定位精度的影响 .....	25
3.2.1 光轴姿态角真实值计算方法.....	25
3.2.2 经纬高误差对定位精度的影响.....	29
3.2.3 光轴姿态角误差对定位精度的影响.....	30
3.2.4 像素点误差对精度的影响.....	32
3.3 本章小结.....	33
4 海面目标定位精度提升方法 .....	34
4.1 标定安装角提升定位精度 .....	34
4.1.1 标定安装角流程.....	34
4.1.2 求解方程计算安装角.....	35

4.1.3 安装角带入定位算法.....	36
4.2 验证标定安装角对定位精度的提升 .....	37
4.2.1 标定定位平台安装角.....	37
4.2.2 安装角标定对定位精度的提升.....	42
4.3 卡尔曼滤波提升定位精度 .....	45
4.3.1 建立自适应卡尔曼滤波模型.....	45
4.3.2 卡尔曼滤波参数自适应.....	46
4.4 验证卡尔曼滤波对定位精度的提升 .....	47
4.5 本章小结.....	49
5 定位软件以及实验验证 .....	50
5.1 定位软件组成.....	50
5.1.1 定位软件的设计流程.....	50
5.1.2 定位数据时间匹配.....	51
5.1.3 定位软件界面.....	53
5.2 定位测试软件组成.....	53
5.2.1 定位系统测试软件的设计流程.....	54
5.2.2 定位系统测试软件界面.....	55
5.3 海面目标定位方法验证.....	55
5.3.1 验证海面目标定位算法.....	56
5.3.2 验证标定安装角对定位精度的提升.....	57
5.3.3 验证卡尔曼滤波对定位精度的提升.....	58
5.3.4 海面目标定位精度分布.....	58
5.4 本章小结.....	59
结论.....	60
参考文献.....	61

## 图表目录

### 图目录

图 2.1 海面目标定位算法原理示意图 .....	7
图 2.2 海面目标定位硬件组成 .....	8
图 2.3 硬件连接示意图 .....	8
图 2.4 含有目标的红外图像 .....	10
图 2.5 海面目标定位算法框图 .....	11
图 2.6 东北天坐标系示意图 .....	12
图 2.7 地球椭球模型示意图 .....	14
图 2.8 图像像素坐标系 .....	15
图 2.9 图像物理坐标系 .....	16
图 2.10 相机坐标系 .....	16
图 2.11 相机坐标系到地心坐标系的转换示意图 .....	18
图 2.12 AOP 算法计算误差 .....	20
图 2.13 海面目标定位误差来源示意图 .....	21
图 3.1 大地水准面、椭球面示意图 .....	23
图 3.2 吊舱、惯导连接示意图 .....	24
图 3.3 采集数据存在的随机误差示意图 .....	25
图 3.4 高精度 gnss .....	25
图 3.5 求姿态角真实值方法 .....	26
图 3.6 实地采集的红外图像 .....	27
图 3.7 高度误差对定位误差的影响示意图 .....	29
图 3.8 航向角误差对目标定位的影响 .....	31
图 3.9 俯仰角误差对目标定位的影响 .....	31
图 3.10 像素误差引起的误差示意图 .....	32
图 4.1 安装角标定流程图 .....	34
图 4.2 海面实验现场拍摄照片 .....	38
图 4.3 海面实验采集的红外图像 .....	38
图 4.4 标点前后三维坐标示意图 .....	40
图 4.5 标定前后三维坐标示意图 .....	42
图 4.6 定位实验采集的红外图像 .....	42
图 4.7 卡尔曼滤波算法原理图 .....	45

图 4.8 卡尔曼滤波基本模型 .....	45
图 4.9 航向角滤波前后变化 .....	47
图 4.10 俯仰角滤波前后变化 .....	48
图 4.11 横滚角滤波前后变化 .....	48
图 4.12 定位实验采集的红外图像 .....	48
图 4.13 卡尔曼滤波前后定位误差 .....	49
图 5.1 定位软件设计框图 .....	50
图 5.2 时间匹配示意图 .....	51
图 5.3 时间匹配流程图 .....	52
图 5.4 定位软件界面 .....	53
图 5.5 定位测试软件设计框图 .....	54
图 5.6 定位测试软件界面 .....	55
图 5.7 定位实验采集的红外图像 .....	56
图 5.8 计算目标定位精度分布 .....	58



## 表目录

表 3.1 高精度定位定向接收机设备参数 .....	26
表 3.2 采集数据信息 .....	27
表 3.3 姿态角真实值计算结果 .....	29
表 3.4 高度误差引起的定位误差 .....	30
表 3.5 航向角误差引起的定位误差 .....	31
表 3.6 俯仰角误差引起的定位误差 .....	32
表 3.7 横向像素坐标误差引起的定位误差 .....	33
表 3.8 纵向像素坐标误差引起的定位误差 .....	33
表 4.1 参数列表 .....	39
表 4.2 东北天坐标系下坐标 .....	39
表 4.3 吊舱坐标系系下坐标 .....	40
表 4.4 标定参数 .....	40
表 4.5 目标点数值 .....	41
表 4.6 标定参数 .....	41
表 4.7 采集参数 .....	43
表 4.8 定位计算结果 .....	43
表 4.9 定位计算结果 .....	44
表 4.10 定位计算结果 .....	44
表 5.1 采集数据参数 .....	56
表 5.2 定位计算结果 .....	57
表 5.3 定位计算结果 .....	57
表 5.4 定位计算结果 .....	58

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

海运是世界贸易的重要组成部分，也是我国经济发展的重要支撑。国务院将海运业发展上升为国家战略，提出了大力推进海运业高质量发展的指导意见<sup>[1]</sup>。然而，随着海运业的发展，海上事故也时有发生，给人员生命和财产安全带来严重威胁。根据欧洲海事安全局的统计数据，2021 年收到了 2637 起人员伤亡及海事事故报告<sup>[2]</sup>。在海上事故发生后，为了减少损失和伤亡，要快速的检测到海面遇险目标，并确定其精确位置。因此，研究海面目标定位技术对提升我国打捞水平有重要意义。

本课题来源于工信部项目“深远海多功能救助船工程开发与专用救助装备研制”专题四中的子专题 3“船载海面遇险目标快速搜寻技术研究及装置开发”，该专题旨在开发一套信息处理系统，为直升机搭载的海面遇险目标搜寻设备提供技术支持。主要研究内容涵盖图像预处理技术、图像配准、图像融合、目标检测、目标定位、目标跟踪等七个方面，其中要求目标定位精度在 6% 以内。本文的主要研究其中的目标定位模块，主要是通过目标在红外图像中的位置，结合光电吊舱和惯性导航采集的数据，计算海面遇险目标的地理位置。

## 1.2 研究现状

目标定位技术是指利用安装在载体上的光电设备（如相机、激光测距仪等）获取目标位置的技术，通常包括定位算法和定位精度提升两部分，通过载机姿态、相机姿态、目标距离等信息，计算目标的位置，再通过滤波、标定、多传感器融合等方法提升定位精度。

### 1.2.1 目标定位技术发展现状

近年来，国内外众多学者提出了多种目标定位方法，接下来本文总结几种研究成果丰富、有参考价值和应用价值的定位算法。

#### （1）基于激光测距仪的目标定位方法

基于激光测距仪的目标定位方法是利用激光测量目标到定位平台的距离和角度，来计算目标在空间中的位置和方向的方法。该方法主要分为距离向量估计法和三角测量法两种类型。其中，距离向量估计法将激光测距仪测量到目标点的距离转换成向量，再计算目标点在空间中的位置和方向，该方法具有计算简单、精度高等优点。三角测量法则是通过测量激光测距仪到目标点的两个角度来确定目标点的位置和方向，该算

法利用三角函数的方法计算目标点的位置，并通过极坐标系的方法计算目标点的方向。为了提高算法的精度和可靠性，采用多传感器数据融合、机器学习等方法来增强算法的鲁棒性和准确性。

2009年，王晶等人<sup>[3]</sup>提出一种主要通过坐标变换得到目标位置的目标定位方法，首先建立地理坐标系、载机坐标系、基座坐标系、望远镜坐标系等坐标系，然后通过齐次坐标转换，计算目标位置。

2013年，徐诚等人<sup>[4]</sup>提出了一种基于激光测距仪信息的目标定位方法。根据目标从空间直角坐标系到光电传感器坐标系的映射关系，结合目标距离信息，构建系统总体结构，建立目标定位模型。

2015年，展凤江等人<sup>[5]</sup>提出一种基于的光电平台目标定位算法。利用目标定位数学模型和误差模型，分析了影响目标定位精度的因素，建立了参数误差对于定位精度影响的数学仿真模型。

2022年，孙辉<sup>[6]</sup>提出一种基于机载光电电荷的目标定位方法。在机载光电平台中内置激光测距机、红外热像仪、减震器等设备，通过传感器数据，建立描述各个系统运动的基准坐标系，在此基础上获得目标定位模型。此外，作者设计了一种基于飞行数据的误差分析方法以提升定位精度。

基于激光测距仪的目标定位方法，在理想状况下，有较高的定位精度，但是激光测距仪的信号容易受到环境因素的影响，如天气状况，海面起伏等，且对于远距离目标，测量精度较低，因此该方法难以应对海面目标定位。

## （2）基于多机交互的目标定位方法

基于多机交互的目标定位方法是利用多个定位平台协同工作，通过目标在各个定位平台的方位，结合平台位置，计算目标位置。

2011年，孙超等人<sup>[7]</sup>提出一种空间两点交会无人机定位方法，利用自身位置及姿态信息，构建空间三角形，通过坐标转换，求解目标坐标。

2015年 Xiang H T<sup>[8]</sup>通过放置相位定位设备短程观测站，将前观测站测得的几何关系测量数据引入后观测站，当前后观测站之间的距离满足数据计算需求时，可以实现后观测站对远程高精度测距目标的定位，从而实现双重协作侦察和绘图工作。

2017年，白冠冰等人<sup>[9]</sup>提出一种基于机载光电平台的双机交会定位方法，通过构建辅助坐标系，对视轴向量进行齐次坐标转换，建立双机交会定位模型。

2017年 Bai G、Liu J、Song Y<sup>[10]</sup>等人提出了一种基于机载光电平台的双无人机交叉定位系统，结合光电经纬仪的交叉角定位方法，建立辅助坐标系，将 LOS（从无人机到目标的视线）向量转换为齐次坐标，并建立了双无人机交叉定位模型。

基于多机交互的目标定位方法优点是适用于多种场景，可以测量地面、海面或者空中目标的位置。缺点是，对于待测目标要同时出现在多个无人机的视野中，在实际使用中，测量范围小且无法保证实时性。

### （3） 图像特征辅助目标定位

图像特征辅助目标定位是指使用图像中的特征来帮助确定目标物体的位置。这种方法通常使用计算机视觉技术来提取图像中的特征，然后使用这些特征来帮助确定目标物体的位置。采用图像特征辅助定位的方法也得到了广泛的验证<sup>[11-18]</sup>。

Gao F Q 等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于移动摄像机的视觉定位信息驱动的轨迹规划算法，该算法通过最大化位置估计和摄像机运动之间的交互信息来优化运动方向。

Hosseinpoor H R<sup>[12-13]</sup>等提出了一种基于搭载 GPS 的无人机获取的热红外图像和视频的地面目标地理定位方法。在图像采集过程中，通过传统的摄影测量光束平差方程实现目标的精确地理定位，最终达到厘米级的测量精度。然而，这种方法只能在垂直向下视角的低空飞行平台上使用。

图像特征辅助目标定位方法通常需要大量的标注数据或先验知识，例如 3D 模型、地图信息等，适用的场景有限，而且对于海面目标定位的场景，图像特征提取的效果不具有区分性。

### （4） 基于地球椭球的目标定位方法

基于地球椭球的目标定位方法是一种常用的地球空间目标定位方法，该方法利用地球椭球表面的几何特征来确定目标的位置。地球的形状可以视作一个椭球体，用长半轴、短半轴等参数来表示地球椭球模型。通过地球椭球模型获得目标的高程信息，结合惯性导航、像素坐标等数据，计算目标位置。

2018 年，Qiao C、Ding Y、Xu Y<sup>[19]</sup>提出一种基于数字高程模型（DEM）的地面目标定位算法，根据机载位置和方向系统测量的平台位置和姿态信息以及编码器的万向节角度信息，通过齐次坐标变换求解地心坐标系中的视线指向矢量，使用全球 DEM 计算目标经纬度。但是该方法依赖高精度 DEM，只适用于特定范围。

2020 年徐士婷<sup>[20]</sup>等人提出一种基于机载光电平台的海面目标定位方法，以地面参考点为原点建立东北天坐标系，通过吊舱、惯导姿态角和目标像素坐标计算相机坐标系下的点在东北天坐标系下坐标，通过一系列的坐标转换计算出目标位置。该方法没有忽略地球表面弧度的影响，当目标较远，或者载机高度较低时，地球表面弧度会对定位精度造成较大影响。

基于地球椭球模型的目标定位算法需要的数据包括载体位置与姿态、相机姿态、相机的红外焦距，不依赖激光测距仪，且不需要多套定位设备，所以抗干扰能力强，

适用于海面目标定位的场景。

### 1.2.2 定位精度提升方法研究现状

定位精度是目标定位的重要指标，同时，定位精度的提升是目标定位的重要组成部分。定位精度的影响因素通常是来自输入数据的随机误差、定位系统硬件存在的系统误差和定位算法中采用的地球椭球模型的误差，对于不同的定位方法，定位算法不同，对于这些误差的解决方法也会有所不同。国内外学者在研究目标定位算法时，通常都会考虑精度的提升，接下来本文总结几种常用的定位精度提升方法。

#### （1）构建更精确的数字高程模型

2013 年 Stich E J 等人<sup>[21]</sup>提出通过更高精度的数字模型的方法提升定位精度，并通过实验进行验证。但是该方法仅限于基于数字模型的定位方法进行精度提升，而这种定位方法本身具有局限性。

#### （2）通过滤波提高定位精度

在基于光电平台目标定位中，由于载机的运动、大气干扰、传感器噪声等因素，采集到的目标数据往往会有较大的误差，影响定位的精度和效率。为了消除或减小误差，提高定位精度，需要对数据进行滤波。滤波是一种信号处理的方法，它可以根据一定的规则或模型，从含有噪声或干扰的信号中提取出有用的信息。在机载光电平台目标定位中，常用的滤波方式有高斯滤波、卡尔曼滤波等。

2011 年 Zhao、W.B<sup>[22]</sup>提出了一种卡尔曼滤波初始化策略，采用交互式多模型卡尔曼滤波（IMMKF）算法进行目标跟踪，该算法能够根据目标的运动状态，自动切换不同的运动模型和滤波器，提高跟踪效率和精度。

2020 年徐士婷<sup>[23]</sup>提出一种基于卡尔曼滤波的定位精度的方法，通过建立卡尔曼滤波模型，对输入参数的随机误差进行消除，从而提升定位精度。并且基于统计学中无偏估计等原理，自适应调节卡尔曼滤波的参数。

2022 年孙辉<sup>[6]</sup>等人提出了一种目标辅助定位方法。首先，利用卡尔曼滤波方法对获得的目标位置测量值进行滤波，得到目标位置的最优估计；然后，基于获得的目标速度，引入距离基线方法对目标轨迹进行二次拟合，以获得运动目标的速度和方向。这种卡尔曼滤波与二次拟合相结合的方法在提高动态目标定位精度方面有显著效果，但对静态目标的效果并不显著。

基于上述研究成果可以看出，卡尔曼滤波能够很好地处理复杂、不确定、多变的实际问题，提高目标定位的精度和效率。

#### （3）通过补偿系统误差提升定位精度

目标定位过程中的系统误差是指由于系统本身的原因导致的定位结果与真实值之

间的偏差。不同的定位方法和系统可能存在不同的误差来源和影响因素，例如，基于多机交互的目标定位方法中，可能存在多机之间的时钟同步误差、通信延迟误差、传感器测量误差等。解决系统误差的方法主要有以下几种：优化系统设计和参数配置，提高系统性能和稳定性，如选择高精度的设备和算法；采用误差模型和补偿方法，根据系统特点建立误差模型，分析误差来源和影响程度，采用相应的补偿方法进行修正，如使用卡尔曼滤波、最小二乘法、神经网络等技术；采用数据融合和优化方法，利用多源数据或多种方法进行信息融合和优化，提高定位精度和鲁棒性，如使用粒子滤波、遗传算法、模糊逻辑等技术。

2017年，Liu C、Liu J、Song Y<sup>[24]</sup>提出了一种用于校正无人机（UAV）与其机载捆绑式光电平台之间相对角位移的系统和方法，以提高定位精度。为了解决角位移对最终精度的影响，将测量系统附加到平台上，实时收集平台基座隔板的纹理图像。通过图像配准，可以计算出平台相对于其隔板的位移矢量，进而确定角位移。在分解并叠加到无人机的三个姿态角之后，角位移可以减少坐标变换误差，从而提高定位精度。但是这种方法依赖图像配准等图像处理方法，计算精度也受到图像处理算法的影响。

2017年，Wang X、Liu J、Zhou Q<sup>[25]</sup>等人提出一种通过多目标提高定位精度的方法，通过实时变焦镜头畸变校正减小镜头畸变对定位的影响。但是这种精度提升方法仅针对镜头存在畸变的情况。

综上所述，通过补偿系统误差可以有效提升定位精度，不同的定位系统中系统误差有不同的表现形式，精度提升方式有针对性。

除了以上三种定位精度提升方法，另外还有学者提出了通过非线性滤波器对定位结果滤波的方法<sup>[26-31]</sup>、基于视频序列的方法<sup>[32-38]</sup>以和消除系统误差的方法<sup>[39-44]</sup>以提升定位精度。

### 1.3 本文的主要工作

本文主要研究内容是海面目标定位，设计了一套海面目标定位的方法，首先建立了基于光电吊舱和惯性导航的海面目标定位算法，然后分析了海面目标定位精度的主要影响因素，并基于此设计了定位精度提升方法，最后通过实验验证了定位方法以及精度提升方法的可行性。

第1章介绍了海面目标定位的研究背景与意义，对目前该领域的研究现状进行了总结阐述，并具体分析了几类研究最多、成果比较丰富的目标定位算法。

第2章建立了基于光电吊舱和惯性导航的海面目标定位算法，通过相机姿态角、惯导姿态角、定位平台位置以及目标所在像素坐标，得到目标的经纬高。在本章中分

析了本文算法相比于同类型算法的改进点，最后提出定位过程中的误差来源。

第3章分析了定位精度的影响因素和输入参数误差对定位精度的影响。从地球椭圆模型、安装角误差和随机误差三个方面分析定位精度的影响因素。

第4章设计了定位精度提升的方法。定位精度提升从两方面进行，首先是标定安装角，然后是卡尔曼滤波消除随机误差。在本章中详细介绍了两种定位精度提升的方法，并通过实验进行验证。

第5章对本文提出的定位方法进行了实验验证，包括海面目标定位算法、补偿安装角提高定位精度以及卡尔曼滤波提升定位精度。实验结果表明，本文提出的定位算法精度优于同类型的其他海面目标定位算法，通过安装角的补偿和卡尔曼滤波可以有效提升定位精度。

## 2 海面目标定位算法

本章提出一种基于光电吊舱和惯性导航的海面目标定位算法。海面目标定位是指，飞机搭载定位平台，飞行在海面上空，红外相机对海面进行扫描，当发现遇险目标时，目标检测模块提取出目标在图像中的像素坐标，定位平台中的各传感器实时采集飞机的位置、姿态、高度等数据，根据目标的像素坐标、飞机的数据和定位算法，计算出目标的经纬高。海面目标定位示意图如图 2.1 所示。

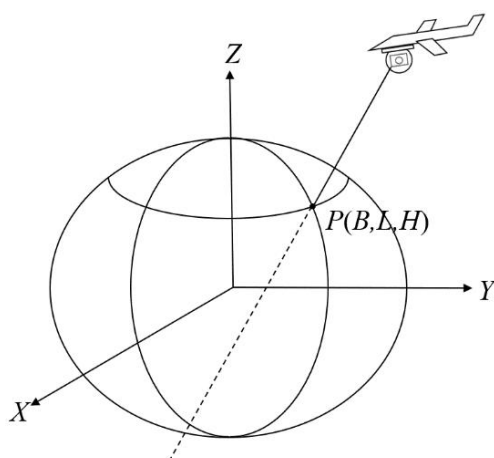


图 2.1 海面目标定位算法原理示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of sea surface target positioning algorithm principle

本章内容包括以下几个方面：（1）定位算法的硬件组成，主要介绍了组成光电平台的硬件设备，具体包括光电吊舱和惯性导航；（2）定位算法的输入参数，主要说明了各个参数的来源、测量方法和误差范围，并给出了一组真实数据作为参考；（3）定位算法的原理，主要介绍了根据输入参数建立相机坐标系、地心坐标系等坐标系，以及坐标之间的变换，并最终求解目标经纬高；（4）定位算法的性能评估，主要内容是与其他定位算法进行对比分析，展示本算法的优势和适用场景；（5）定位算法的误差分析，简要说明了定位过程中存在的误差，包括定位平台的经纬高存在误差、光轴姿态角存在误差。

### 2.1 海面目标定位系统硬件组成

本文采用了一种由光电吊舱和惯性导航系统组成的定位平台，实物图如图 2.2 所示。光电吊舱包含了一个红外相机和一个二维转台，红外相机用于获取含有目标的红外图像，并通过目标检测模块获得目标在图像中的像素坐标；二维转台用于测量相机的航



向角和俯仰角，统称为相机姿态角，或者吊舱姿态角。惯性导航系统由惯性元件和 GPS 构成，用于测量定位平台的经度、纬度、高度、航向角、俯仰角和滚动角，这些参数统称为定位平台位姿，或者惯导位姿。



(a) 光电吊舱



(b) 惯性导航

图 2.2 海面目标定位硬件组成

Fig. 2.2 Hardware composition of sea surface target positioning

为了保证定位平台的稳定性和精度，惯性导航和光电吊舱之间采用了刚性连接的方式，即两者之间没有相对运动。连接方式如图 2.3 所示，惯性导航固定在光电吊舱顶部。

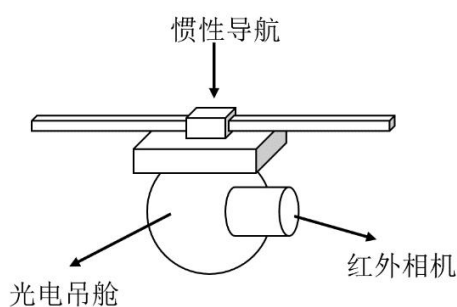


图 2.3 硬件连接示意图

Fig. 2.3 Hardware connection diagram

## 2.2 海面目标定位输入参数

本文采用的海面目标定位算法需要以下输入参数：定位平台的位置和姿态，相机的姿态和焦距，目标在图像中的像素坐标。其中，定位平台的位置由 WGS-84 标准的

经度、纬度和高度表示，定位平台的姿态由其航向角、俯仰角和滚动角表示，相机的姿态由其航向角和俯仰角表示。定位平台的位置和姿态由惯性导航采集得到，相机的姿态由光电吊舱采集得到，目标在图像中的像素坐标由目标检测模块提供。

本文采用的输入参数的测量精度是根据定位平台中各个传感器的设备说明书给出的，这些说明书详细描述了传感器的工作原理、性能指标和误差特性，为定位算法的误差分析提供了依据。输入参数的测量精度如表 2.1 所示：

表 2.1 输入参数测量精度

Tag. 2.1 Input parameter measurement accuracy

参数列表	精度
定位平台经纬度	2cm+1ppm
定位平台高度	10cm+1ppm
定位平台航向角	0.04°
定位平台俯仰角	0.02°
定位平台滚动角	0.02°
相机航向角	0.02°
相机俯仰角	0.02°

海面目标定位算法需要根据相机的参数，即相机的焦距、像元尺寸和像素数，将目标在图像中的像素坐标转换为相机坐标系下的三维坐标。本文选择了一款红外相机作为光电吊舱中的成像设备，相机参数如表 2.2 所示：

表 2.2 红外相机参数

Tag. 2.2 Infrared camera parameters

参数列表	精度
像素数	640×512
像元尺寸	0.015mm
焦距变化范围	25-150mm

为了验证海面目标定位算法的有效性和准确性，本文采用了一张真实的红外图像作为实验数据，该图像由光电吊舱拍摄，将已知经纬度的小岛中某一点作为目标。目标在红外图像中的像素位置示意图如图 2.4 所示，图中用实线框标出了目标的位置，目标的中心点对应的像素坐标为（240，336）。

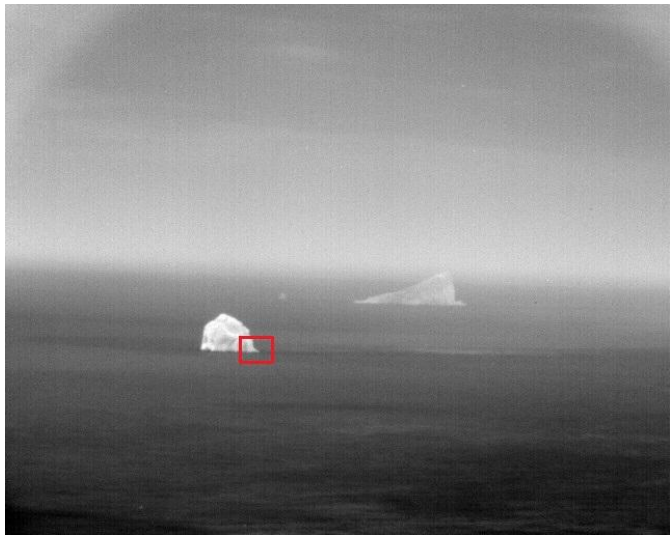


图 2.4 含有目标的红外图像  
Fig. 2.4 Infrared images containing targets

该图像对应的输入参数如表 2.3 所示，包括定位平台的位置、姿态和高度，相机的姿态和焦距，目标在图像中的像素坐标。

表 2.3 输入参数  
Tag. 2.3 input parameter

参数列表	数据
定位平台经度°E	38.864295959
定位平台纬度°N	121.640563965
定位平台高度	86.9m
定位平台航向角	246.54°
定位平台俯仰角	-0.22°
定位平台滚动角	2.09°
相机航向角	36.88°
相机俯仰角	1.82°
相机焦距	50mm
目标像素坐标	(240, 336)

2.3 海面目标定位算法

海面目标定位算法是通过一系列坐标转换和数学计算，得到目标经纬度的过程。第一步，由目标像素坐标，结合相机焦距、像元尺寸和传感器像素数，计算目标像素

在相机坐标系下坐标；第二步：由第一步求得的目标像素在相机坐标系下坐标，结合定位平台、相机姿态角求得的光轴姿态角以及定位平台经纬度，得到目标像素在地心坐标系下坐标；第三步：将第二步求得的目标在地心坐标系下坐标，结合由定位平台经纬高转换到的光心在地心坐标系下的坐标，计算这两点确定的直线与地球椭球模型在地心坐标系下的交点，交点即为目标在地心坐标系下的坐标。第四步：将第三步求得的目标在地心坐标系下坐标转换为目标经纬度。算法框图如图 2.5 所示：

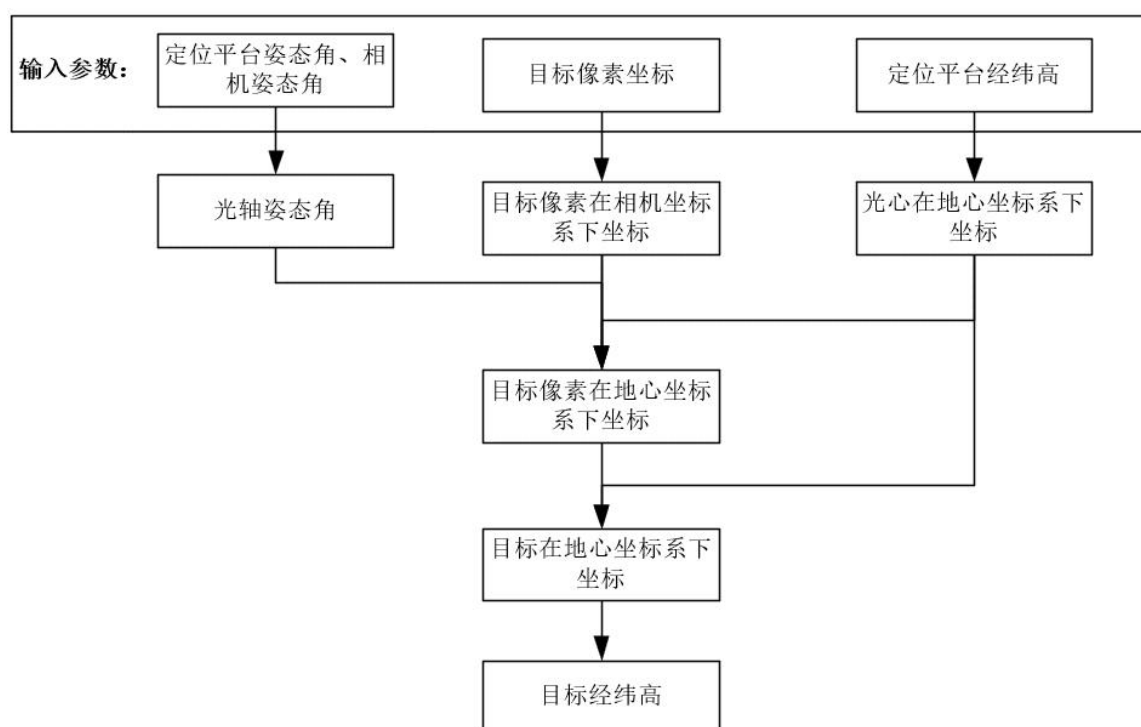


图 2.5 海面目标定位算法框图

Fig. 2.5 Block diagram of sea surface target localization algorithm

在 2.3.1、2.3.2 小节中，分别计算光轴姿态角和定位平台地心坐标系下坐标，在 2.3.3、2.3.4 小节中，结合光轴姿态角、定位平台地心坐标系下坐标，将目标像素坐标转换到目标像素在相机坐标系下坐标、目标像素在地心坐标系下坐标，在 2.3.5 小节中，通过目标像素地心坐标系下坐标和定位平台地心坐标系下坐标，以及地球椭球模型，得到目标在地心坐标系下坐标。在 2.3.6 小节中，将目标的地心坐标系下坐标转换为目标经纬高。

### 2.3.1 计算光轴姿态角

要计算目标像素在地心坐标系下坐标，需要用到光轴姿态角。本小节主要介绍由

定位平台姿态角和相机姿态角计算光轴姿态角的方法。

东北天坐标系是一个三维坐标系，如图 2.6 所示，以  $O_2(B, L, H)$  为坐标原点， $N$  轴指向正北方向， $E$  轴指向正东方向， $U$  轴与椭球法线重合，指向天空。

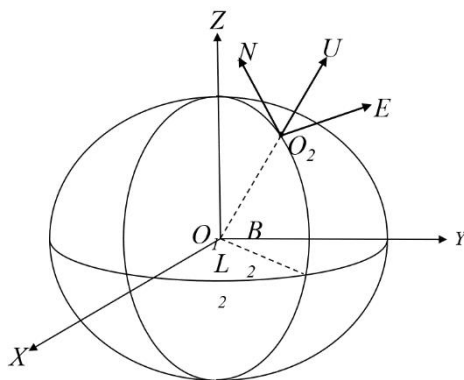


图 2.6 东北天坐标系示意图

Fig. 2.6 Schematic diagram of the Northeast Sky coordinate system

光轴姿态角包括光轴航向角、光轴俯仰角和光轴滚动角，表示的物理意义分别是，相机光轴在东北天坐标系中，相对于  $U$  轴、 $E$  轴和  $N$  轴的旋转角度。

在海面目标定位中，吊舱内置二维转台，采集相机相对定位平台在航向、俯仰方向的姿态，同时惯性导航采集定位平台相对于大地坐标系在航向、俯仰和滚动方向的姿态，吊舱采集的姿态角和惯导采集的姿态角，共同决定了光轴相对于大地的姿态角，即光轴姿态角。要计算光轴姿态角，首先通过相机姿态角、定位平台姿态角求光轴姿态矩阵，再将姿态矩阵分解出光轴姿态角。

计算光轴姿态矩阵，要经过于相机、定位平台姿态角对应的五部旋转矩阵，具体过程是，第一步，绕坐标系  $X_c$  轴旋转相机俯仰角  $\theta'$ ；第二步，绕坐标系  $Z_c$  轴旋转相机航向角  $\psi'$ ；第三步，绕坐标系  $Y_c$  轴旋转定位平台滚动角  $\varphi$ ；第四步，绕坐标系  $X_c$  轴旋转定位平台俯仰角  $\theta$ ；第五步，绕坐标系  $Z_c$  轴旋转定位平台航向角的角度  $\psi$ 。以上的旋转均为逆时针旋转，此五个旋转矩阵的乘积即为光轴姿态矩阵。

设旋转矩阵为  $R_A$ ，可以表示为：

$$R_A = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$R_A$  的计算可以表示为：

$$R_A = R_C R_G \quad (2.2)$$

其中  $R_C$  表达式为:

$$R_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta' & \sin \theta' \\ 0 & -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi' & \sin \psi' & 0 \\ -\sin \psi' & \cos \psi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$R_G$  表达式为:

$$R_G = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$R_A$  是一个 3\*3 的矩阵, 通过矩阵  $R_A$ , 可以得到光轴航向角  $\alpha$ 、光轴俯仰角  $\beta$ 、光轴横滚角  $\gamma$ , 计算方法式 2.5 所示。

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan(a_{01} / a_{11}) \\ \beta &= -\arcsin(a_{21}) \\ \gamma &= -\arcsin(a_{20} / a_{22}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

将表 2.3 中定位平台航向角、定位平台俯仰角、定位平台滚动角、相机航向角、相机俯仰角带入式 2.3~2.6, 可以计算到矩阵  $R_A$  表达式为:

$$R_A = \begin{bmatrix} -0.868659 & -0.49426 & 0.0337533 \\ 0.49441 & -0.869218 & -0.00432319 \\ 0.0314757 & 0.0129326 & 0.999421 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

由式 2.5 可以计算出光轴姿态角, 结果如表 2.4 所示

表 2.4 计算得到的光轴姿态角数据

Tag. 2.4 Calculated optical axis attitude angle data

参数列表	参数
航向角 $\alpha$	209.62°
光轴俯仰角 $\beta$	-0.74°
光轴横滚角 $\gamma$	1.8°

### 2.3.2 计算定位平台地心坐标系下坐标

要计算目标像素在地心坐标系下坐标, 需要用到定位平台在地心坐标系下坐标。本小节主要介绍地心坐标系, WGS-84 椭球模型和由定位平台经纬高计算定位平台地心坐标系下坐标系的方法。

如图 2.7 所示，地心坐标系是一个三维坐标系，用于表示地球某一点的位置。地心坐标系的原点设在地球质心， $X$ 轴与首子午面与赤道面的交线重合，设向东为正方向， $Z$ 轴与地球自转轴重合，设向北为正方向。 $Y$ 轴与  $XZ$  平面垂直构成右手系。

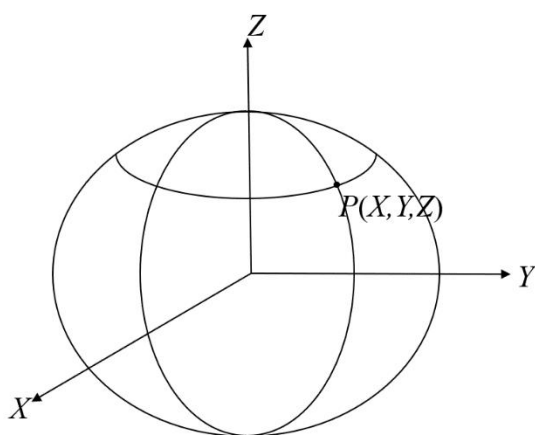


图 2.7 地球椭球模型示意图

Fig. 2.7 Schematic diagram of the Earth ellipsoid model

在三维坐标系中建立地球椭球模型。地球是一个不规则椭球体，地球的南极凹陷，北极凸出<sup>[45]</sup>。在定位导航中，为了方便地表示地球的形状，一般使用简化的地球椭球模型，目前采用较为广泛的是 WGS-84 地球椭球模型。WGS-84 地球椭球模型是一种基于地球几何形状和尺寸的数学模型，被广泛应用于地球测量学、地理信息系统和导航等领域。

WGS-84 地球椭球模型的基本原理是利用椭球体来近似描述地球的形状，椭球体由一组参数来定义。具体而言，WGS-84 模型使用了椭球体的长半轴  $R_e$  和短半轴  $R_p$  来描述地球的形状，同时还采用了一个参考椭球面，即海平面来确定地球的高程。地球椭球模型长半轴半径为  $R_e = 6378.137 \text{ km}$ ，短半轴半径  $R_p = 6356.752 \text{ km}$ 。

地球椭球模型的表述如式 2.7 所示，其中  $X_e$ ， $Y_e$ ， $Z_e$  为椭球模型上一点：

$$\frac{X_e^2}{R_e^2} + \frac{Y_e^2}{R_e^2} + \frac{Z_e^2}{R_p^2} = 1 \quad (2.7)$$

惯性导航可以采集定位平台在 WGS-84 椭球体下的经纬度坐标  $Q(B_G, L_G, H_G)$ ，要将定位平台的经纬度转换为地心坐标系下点  $Q(X_G, Y_G, Z_G)$  的表达式，转换公式如式 2.8、2.9 所示，其中  $N$  为卯酉圈曲率半径， $R_e$  为地球椭球模型长轴半径。

$$N = R_e(1 - e^2 \sin^2 B_G)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} X_G = (N + H_G) \cos B_G \cos L_G \\ Y_G = (N + H_G) \cos B_G \sin L_G \\ Z_G = [N(1 - e^2) + H_G] \sin B_G \end{cases} \quad (2.9)$$

将表 2.2 中定位平台经度、定位平台纬度、定位平台高度带入式 2.9，计算出定位平台地心坐标系下坐标为  $Q(-2608707.52898, 4233674.57048, 3980652.57313)$ 。

### 2.3.3 计算目标像素在相机坐标系下坐标

本小节主要介绍由相机内参（传感器像元尺寸、传感器像素数、相机焦距）和目标像素坐标计算目标在相机坐标系下坐标的方法。要计算目标相机坐标系下坐标，首先由传感器像元尺寸、传感器像素数将目标像素坐标系下坐标转换到图像物理坐标系下坐标，再结合相机焦距转换到相机坐标系下坐标。

图像物理坐标系表示的是目标在相机传感器中实际的物理位置，是由图像像素坐标系变换得到。图像像素坐标系表示待求目标点在图像中的位置，以图像左上方顶点为坐标原点，向右为  $u$  轴，向下为  $v$  轴，单位为像素数，如图 2.8 所示：

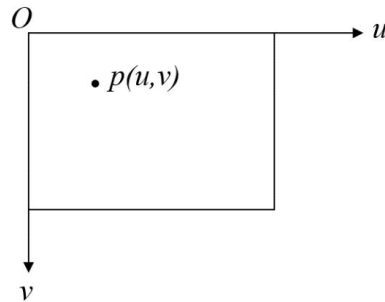


图 2.8 图像像素坐标系

Fig. 2.8 Image pixel coordinate system

图像像素坐标系下坐标  $p(u, v)$  表示在图像中的像素位置，将图像像素坐标系下坐标转换到图像物理坐标系下坐标的示意图如图 2.9 所示，将图像像素坐标系的坐标原点以及坐标系平移到图像中心位置，横轴为  $x$ ，纵轴为  $y$ ，单位为毫米。



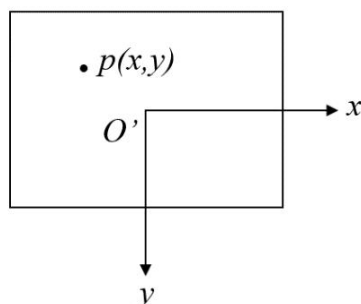


图 2.9 图像物理坐标系

Fig. 2.9 Image physical coordinate system

由图像像素坐标系到图像物理坐标系的转换如式 2.10 所示，其中  $d_x$  是单个像元的长度， $d_y$  是单个像元的宽度， $u_0$  为图像横向像素数， $v_0$  为纵向像素数。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0/2 \\ 0 & 1/d_y & v_0/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

将表 2.2、2.3 中传感器像元尺寸、目标像素坐标分别带入式中，求得目标在图像物理坐标系下坐标  $P(-1.2, 1.2)$ 。

相机坐标系是三维坐标系，由图像物理坐标系扩展而来。以相机光心为原点建立相机坐标系， $X_C$  轴与图像物理坐标系的  $x$  轴平行， $Y_C$  轴为相机光轴， $Z_C$  轴与图像物理坐标系的  $y$  轴平行，相机坐标系与图像物理坐标系的位置示意图如图 2.10 所示。相机坐标系建立的原理是小孔成像模型，将二维图像上的点在三维坐标系中显示出来。

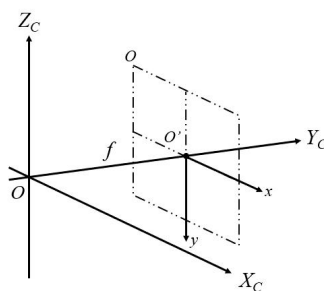


图 2.10 相机坐标系

Fig. 2.10 Camera coordinate system

由相机焦距  $f$ 、目标像素坐标、图像像素数可以目标所在像素点在相机坐标系下的

坐标，由此完成了由二维图像到三维空间的转换，像素坐标在相机坐标系下的坐标  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  即可表示为  $P(x, f, y)$ 。

由表 2.3 可知相机焦距为 50mm，结合计算出的图像物理坐标系下坐标，目标在相机坐标系下坐标为  $P(-1.2, 50, 1.2)$ 。

### 2.3.4 计算目标像素在地心坐标系下坐标

由 2.3.1 中求得的光轴姿态角，结合 2.3.1 求得的目标像素再定位平台坐标系下坐标，以及定位平台经纬高，可以将目标像素在相机坐标系下坐标转换为目标像素在地心坐标系下坐标。首先将相机坐标系通过旋转转换到东北天坐标系下，再将东北天坐标系下的目标像素点转换到地心坐标系。

已知相机坐标系下的点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 、光轴航向角  $\alpha$ 、光轴俯仰角  $\beta$ 、光轴横滚角  $\gamma$  定位平台的经纬度  $Q(B_G, L_G)$  以及定位平台的地心坐标  $Q(X_G, Y_G, Z_G)$ ，求东北天坐标系下  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  的计算方法如式 2.11 所示。

$$R_A = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

其中， $\alpha$  为光轴航向角、 $\beta$  为光轴俯仰角、 $\gamma$  为光轴横滚角，求出的旋转矩阵为  $R_A$ 。

由定位平台经纬度  $Q(B_G, L_G)$ ，计算旋转矩阵  $R_B$  的计算公式，如式 2.12 所示：

$$R_B = \begin{bmatrix} \cos(90 + L_G) & \sin(90 + L_G) & 0 \\ -\sin(90 + L_G) & \cos(90 + L_G) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90 - B_G) & \sin(90 - B_G) \\ 0 & -\sin(90 - B_G) & \cos(90 - B_G) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

由  $R_A$ 、 $R_B$ 、以及定位平台的地心坐标  $Q(X_G, Y_G, Z_G)$ ，可以将相机坐标系下  $P$  点坐标  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  转换为地心天坐标系下坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$ ：

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = R_B R_A \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

将 2.3.1 求出的光轴姿态角，2.2.2 求出的定位平台在地心坐标系下坐标，2.3.3 求出的相机坐标系系坐标，表 2.2 中的定位平台经度、定位平台纬度带入式 2.13，可以求得目标像素在地心坐标系下坐标  $P(-2608702.084, 4233710.93158, 3980618.64485)$ 。

### 2.3.5 计算目标在地心坐标系下坐标

相机光心与目标所在像素的连线如图 2.11 所示，直线经过相机光心，穿过在图像中的所在像素，和地球椭球模型的交点即为目标位置。

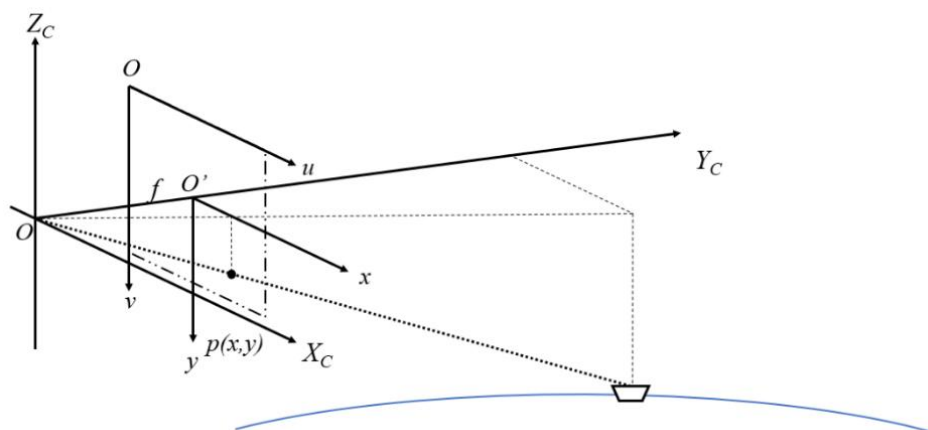


图 2.11 相机坐标系到地心坐标系的转换示意图

Fig. 2.11 Schematic diagram of conversion from camera coordinate system to geocentric coordinate system

在由 2.2.4 小节求出的目标像素在地心直角坐标系下坐标  $P(X_P, Y_P, Z_P)$ ，和定位平台在地心直角坐标系下坐标  $Q(X_G, Y_G, Z_G)$ ，这两点确定的直线与地球椭球模型的交点，即为目标所在位置。在海面目标定位中，当直线与椭球交点不止一个时，取距离相机点近的目标为目标。

已知直线两点  $P(X_P, Y_P, Z_P)$  和  $Q(X_G, Y_G, Z_G)$ ，所以空间中直线  $L$  上任意一点  $L(X_L, Y_L, Z_L)$  的表达式如式 2.14 所示，其中  $t$  为任意值。

$$\begin{cases} X_L = X_P + (X_G - X_P)t \\ Y_L = Y_P + (Y_G - Y_P)t \\ Z_L = Z_P + (Z_G - Z_P)t \end{cases} \quad (2.14)$$

联立公式 2.7 与 2.14，分别将式 2.8 中  $X_L$ 、 $Y_L$ 、 $Z_L$  的表达式带入式 2.7 的  $X_e$ 、 $Y_e$ 、 $Z_e$ ，得到一个关于  $t$  的一元二次方程：

$$\frac{[X_P + (X_G - X_P)t]^2}{R_e^2} + \frac{[Y_P + (Y_G - Y_P)t]^2}{R_e^2} + \frac{[Z_P + (Z_G - Z_P)t]^2}{R_p^2} = 1 \quad (2.15)$$

将解出来的  $t$  带入到式 2.14，即可得到直线与椭球的交点  $T_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 。当交点为 2 个时，通过式 2.15 计算交点  $T_1$ 、 $T_2$  到定位平台在地心坐标系下的位置，取距离最小的点为目标在地心坐标系下的坐标  $T(X, Y, Z)$ 。

将 2.3.2 求出的定位平台地心坐标和 2.3.5 求出的目标像素地心坐标，带入式 2.15，解出两个点  $XJ_1(-2609550.91473521, 4228040.029951263, 3985910.122491)$ ， $XJ_2(-2624235.65023, 4129933.3919, 4077452.72274)$ 。在地心坐标系中分别带入计算两点到定位平台的距离，计算结果为  $XJ_1$  到定位平台 17752 米、 $XJ_2$  到定位平台 2142736 米，

由于点 1 距离定位平台位置更近，因此  $XJ_1(-2609550.9147, 4228040.02995, 3985910.12249)$  为目标在地心坐标系下坐标。

### 2.3.6 计算目标经纬高

由地心坐标  $T(X, Y, Z)$  求经纬度  $T(B, N)$  为超越方程没有解析解，所以一般用迭代的方法数值求解，计算公式如式 2.16、2.17、2.18 所示，首先通过迭代计算纬度，再由地心坐标计算经度。

$$(N)_0 = R_E$$

$$(H)_0 = [(X)^2 + (Y)^2 + (Z)^2]^{\frac{1}{2}} - (R_E R_p)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

$$(B)_0 = \arctan \left( \frac{X[(1-e^2)(N)_0 + (H)_0]}{[(X)^2 + (Y)^2]^{\frac{1}{2}}((N)_0 + (H)_0)} \right)$$

$$(N)_i = \frac{R_E}{(1-e^2 \sin^2(B)_{i-1})^{\frac{1}{2}}}$$

$$(H)_i = \frac{[(X)^2 + (Y)^2]^{\frac{1}{2}}}{\cos(B)_{i-1}} - (N)_{i-1} \quad (2.17)$$

$$(B)_i = \arctan \left( \frac{Z[(1-e^2)(N)_0 + (H)_{i-1}]}{[(X)^2 + (Y)^2]^{\frac{1}{2}}((N)_{i-1} + (H)_{i-1})} \right)$$

式中， $i$  为迭代次数， $(B)_i$  为每次迭代计算得到的纬度值，经过 4 次以上迭代，使得纬度精度优于  $0.00001''$ 。

由  $x_g$ 、 $y_g$  计算  $T$  点经度，即：

$$(L)_o = \arctan \left( \frac{x_g}{y_g} \right) \quad (2.18)$$

由经度的定义可知：

当  $x_g > 0$  时， $L = (L)_o$

当  $x_g < 0$  且  $(L)_o < 0$  时， $L = (L)_o + \pi$

当  $x_g < 0$  且  $(L)_o > 0$  时， $L = (L)_o - \pi$

将 2.3.5 中计算目标地心坐标带入式 2.17、2.18、2.19，得到目标纬度  $38.92577726$ ，目标经度  $121.68292988$ 。

## 2.4 海面目标定位算法模型对比

本章建立了基于光电吊舱与惯性导航的海面目标定位算法，该算法的核心在于地球椭球与直线的交点，该直线由定位平台所在位置以及目标像素位置两点确定。为了说明本文建立的海面目标定位算法的精度，本文还选取另外硬件选择类似的基于机载光电平台的海面目标定位方法(后文简称 AOP)与本文算法(后文简称 IESI)比较。

AOP 是 2020 年徐士婷等人提出的，其主要思想是以飞机起飞位置为坐标原点建立东北天坐标坐标系，将目标所在像素经过坐标转换得到在此坐标系下的坐标，然后转换为地心坐标系下坐标 AOP 算法中，认为定位平台的高度即为目标与定位平台的高度差，与 IESI 相比，该算法忽略地球表面弧度的影响。与 IESI 算法相比 AOP 算法的优点是结构较为简单，缺点是对于较远距离目标，或者定位平台高度较低时，地球表面弧度会对定位精度造成较大影响。AOP 算法计算误差示意图如图 2.12 所示。

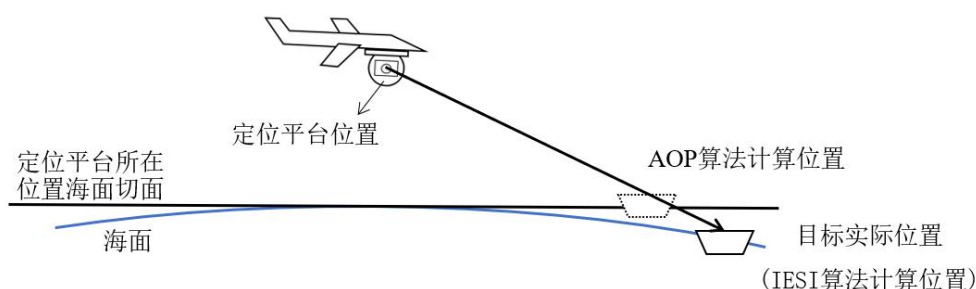


图 2.12 AOP 算法计算误差

Fig. 2.12 AOP algorithm calculation error

## 2.5 海面目标定位过程中存在的误差

如图 2.13 中虚线框所示，在海面目标定位的过程中，存在以下产生误差的地方 (1) 定位平台的高存在误差。海面目标定位中，惯性导航采集的相机高度为定位系统的大地高，而定位算法需要知道定位系统的正常高。通过地球重力场模型 EGM2008 可以进行大地高与正常高的转换，但是转换后依然存在误差。同时受潮汐和固体潮的影响，海面高度会产生一定的高度波动<sup>[46-48]</sup>。在绝大多数情况下，以上因素会对定位平台的高度造成 0.5m 以内的误差，这个误差难以消除。(2) 由吊舱、惯导采集姿态角计算光轴姿态角可能存在误差。吊舱、惯导在安装过程中不一定存在坐标轴对齐，需要标定吊舱、惯导的安装角并带入求光轴姿态。(3) 输入的光轴姿态角存在随机误差。解决光轴姿态角随机误差的方法是对光轴姿态角进行滤波，选择卡尔曼滤波对光轴姿态

角进行处理，可以在满足实时性的同时减小数据中的随机误差。详细的误差分析过程以及解决方法将在第三章进行分析。

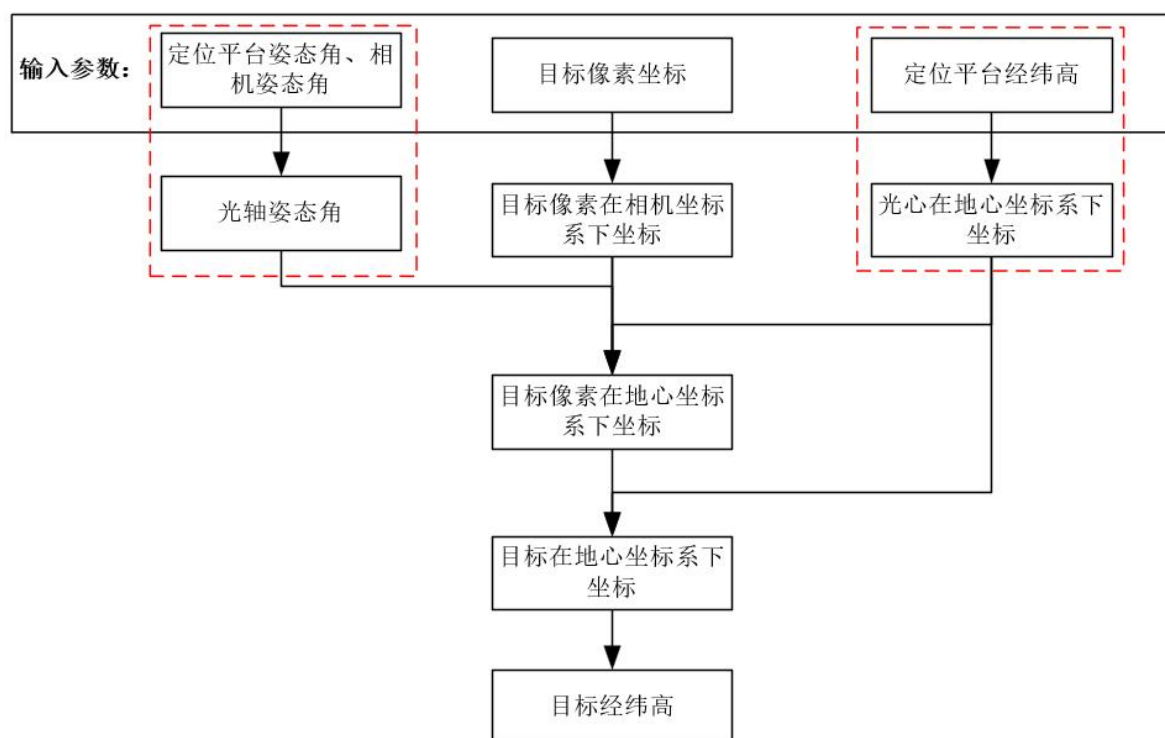


图 2.13 海面目标定位误差来源示意图

Fig. 2.13 Schematic diagram of the source of sea surface target positioning error

## 2.6 本章小结

本章主要介绍了定位系统的硬件组成、海面目标定位算法的输入参数以及算法模型、算法对比以及定位误差分析。硬件组成部分介绍了光电吊舱、惯性导航，并介绍了相关参数。海面目标定位算法模型部分主要内容是，建立一个基于地球椭球模型的海面目标定位模型，通过目标所在像素和相机光心连接所成的直线，与椭球面的交点，计算目标在地心坐标系下的位置，并将结果转换为经纬高。海面目标定位算法模型部分针对算法中出现的坐标系以及地球椭球模型进行了详细定义，对于定位过程中坐标系的转换、以及算法原理进行了详细推导。本章中对比了本文算法与其他海面目标定位算法，本文算法的精度在原理上要优于其他算法。最后简要说明了定位算法中存在的误差。

### 3 海面目标定位误差分析

本章主要内容是海面目标定位误差分析，分为两部分，第一部分是分析定位过程中的误差来源，第二部分是分析定位参数误差对定位精度的影响。第一部分中，从算法模型、设备安装和光轴姿态角的随机误差三方面分析定位过程中存在的误差来源；第二部分中，详细介绍一种光轴姿态角真实值的计算方法，并实际采集数据计算一组光轴姿态角的真实值，分别分析了输入参数的经纬高、光轴的姿态角、像素点产生误差时误差会对定位结果产生的影响。

#### 3.1 目标定位误差来源

定位过程中存在的误差来源包括定位算法本身误差、安装角误差以及光轴姿态角的随机误差。其中定位算法本身误差是指定位算法中所用的椭球模型中存在误差；安装角误差是指吊舱、惯导安装中存在的相对角度对光轴姿态角的影响。本节主要分析这三种误差对定位精度的影响。

##### 3.1.1 地球椭球模型误差分析

在第2章所建立的定位算法模型中，地球的建模采用了WGS-84标准下地球椭球模型，同时惯性导航中用RTK测量的定位系统高程是以参考椭球面为基准的大地高，计算到的目标默认目标高度是在WGS-84坐标系下的0米高。事实上，海面目标应该在大地水准面的高度0的面上。

大地水准面是一个假想的由地球自由静止的海水平面，扩展延伸而形成的闭合曲面。但是由于重力分布的不同，大地水准面和完美椭球体有一定出入。大地水准面通常是被认为是地球真实轮廓，它所包围的形体称为大地体。大地水准面是一个理想化的模型，无法在现实中表示，通常用似大地水准面，近似的表示大地水准面。似大地水准面是人为规定的理想面，用于计算的辅助。

从地面点沿正常重力线量取正常高所得端点构成的封闭曲面，即为似大地水准面，它与大地水准面并不完全吻合。通过数学模型精确确认与大地水准面最拟合的面是地球参考椭球面，似大地水准面到参考椭球面的距离为高程异常。高程异常值可在国家测绘部门存有的高程异常图中查取。似大地水准面是正常高的起算面，在海洋上同大地水准面一致<sup>[49]</sup>。大地水准面、椭球面示意图如图3.1所示。

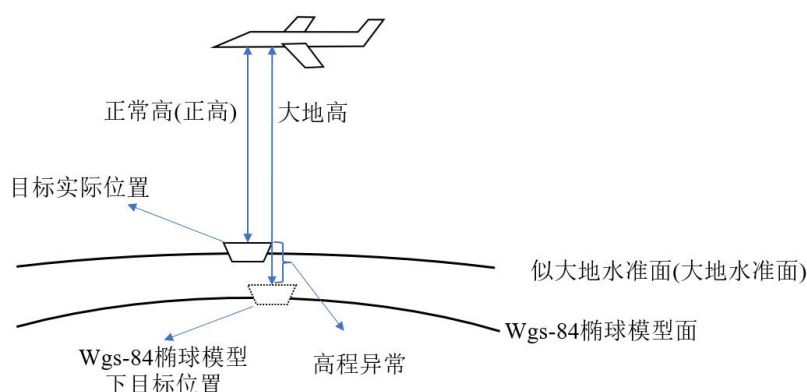


图 3.1 大地水准面、椭球面示意图

Fig. 3.1 Schematic diagram of geoid and ellipsoid

在定位算法中，应将高程异常值带入算法计算目标位置。同时要考虑高程异常值本身的精度对定位精度的影响。地球重力场模型 EGM2008 计算的高程异常在我国大陆的总精度为 20cm，华东华中地区 12cm，华北地区达到 9cm，华南地区达到 13cm，西部地区为 24cm，在沿海区域直接利用 EGM2008 模型在消除系统差后高程异常的精度为 10cm 左右<sup>[46]</sup>。

在地球科学领域中，地球的潮汐现象一直以来都是一个重要的研究方向。除了对高程异常的影响外，地球的潮汐还会对海平面产生影响。一般来说，在绝大多数地区中，潮差都是在 0.3 米之内<sup>[47]</sup>。此外，由于弹性作用，地球的固体部分也存在潮汐效应，幅度约为 10 厘米<sup>[48]</sup>，这些因素都会对定位精度产生重要影响。

### 3.1.2 吊舱、惯导安装角误差分析

惯性导航和光电吊舱都能够采集姿态信息，但两者所采集的姿态角意义不同。惯性导航采集的是绝对姿态角，它表示定位系统相对于大地的姿态角。其中，航向角的  $0^\circ$  表示地理中的正北方向，俯仰角表示定位系统所指方向与大地水平面的夹角，横滚角表示由右手定则确定的方向与大地水平面的夹角。光电吊舱采集的姿态角与惯导采集姿态角的意义不同，光电吊舱采集的姿态角是相对角度，它表示吊舱镜头方向相对于定位系统的水平、俯仰方向的角度。

在定位算法中，要求光电吊舱和惯性导航刚性连接，并且吊舱航向角和俯仰角的  $0^\circ$  方向指向惯性导航天线的方向。具体来说，安装示意图如图 3.2 所示。在以飞机为原点、前进方向为 Y 轴建立的载体坐标系中，Y 轴的方向应是吊舱航向、俯仰为  $0^\circ$  的方向。在惯性导航和光电吊舱联合定位算法中，需要对姿态角进行转换，将吊舱和惯导采集的姿态角转换为载体坐标系中的方向。



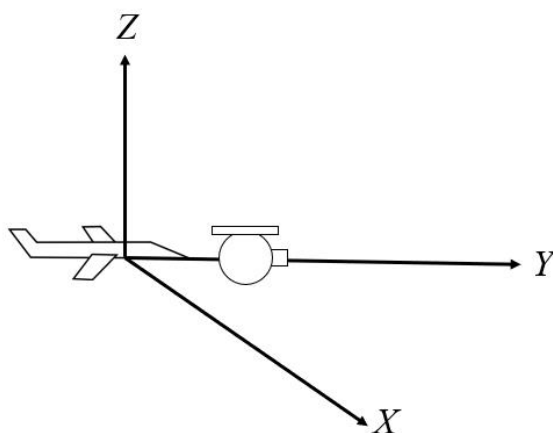


图 3.2 吊舱、惯导连接示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of pod and inertial navigation connection

安装角包含三个角，分别为航向角、俯仰角和滚动角，安装角表示了三维坐标系分别在三个坐标轴的旋转。在定位算法中，吊舱、惯导安装角会影响到光轴姿态角的计算精度。

### 3.1.3 光轴姿态角随机误差分析

随机误差是实验或测量中不可避免的一种误差，它源于多种因素，如设备的不确定性、环境因素的波动等。随机误差通常难以预测和控制，而且可能会对实验或者测量结果产生不可预料的负面影响，因此其在实验或测量过程中扮演着重要的角色。通过对随机误差的分析和建模，可以更好地理解实验或测量的结果，并提高其精度和可靠性。在实际应用中，随机误差的建模和控制是一项重要的技能，对于科学研究、工程应用等领域都具有重要意义。

随机误差是由为数众多影响微小的因素造成，这些因素对于测量结果的影响关系很难控制，例如，实验环境的微小波动，测量工具状态的微小波动，甚至测量者的身体状态，都会都导致随机误差的产生。这些因素本身就具有随机性，所以引起的影响也必然带有随机性。在组合导航系统中，陀螺仪会产生随机误差。海面目标定位通常选择体积更小、重量更轻的 **mems** 陀螺仪。

如图 3.2 所示，将定位平台静置，计算光轴姿态角，可以明显观察到数据存在的随机误差。在海面目标定位中，可以通过滤波的方法减小光轴姿态角中的随机误差，从而提升定位精度。

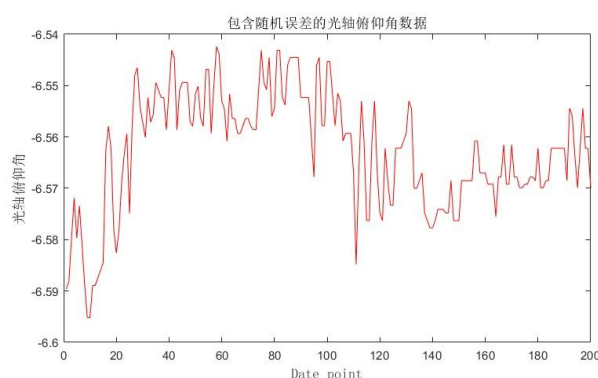


图 3.3 采集数据存在的随机误差示意图

Fig. 3.3 Schematic diagram of random errors in data collection

## 3.2 定位参数误差对定位精度的影响

对于分析海面目标定位中各参数的误差对定位精度的影响，除了理论的分析外，需要结合实际实验数据进行分析。通过实际采集的目标点经纬高推算出真实航向、俯仰和滚动角，在后续的分析参数误差定位精度的影响时，给航向角、俯仰角、滚动角、像素坐标分别加入一个误差值，以分析误差带来的影响。

### 3.2.1 光轴姿态角真实值计算方法

本节介绍一种通过目标经纬高、像素坐标反推姿态角真实值的方法，并通过采集数据计算得到一组姿态角真实值，这组数据为后续误差分析所使用。实验需要采集目标的经纬高，选择高精度差分 gnss 测量目标的实际经纬高。

计算光轴姿态角的真实值所需数据包括：（1）两个目标的经纬高；（2）目标在红外图像中的像素坐标；（3）吊舱、惯导的位置和姿态；（4）相机焦距。

采集目标的经纬高需要用高精度差分 gnss，选择的定位设备是北云 T1 gnss 高精度定位定向接收机，如图 3.4 所示。

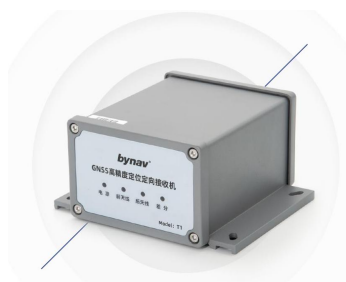


图 3.4 高精度 gnss

Fig. 3.4 High precision gnss

gnss 参数如表 3.1 所示。

表 3.1 高精度定位定向接收机设备参数

Tab. 3.1 High precision positioning and directional receiver equipment parameters

名目	参数
单点定位水平精度	1.5m RMS
单点定位高程精度	2.5m RMS
RTK 定位水平精度	1.0cm+1ppm RMS
RTK 定位高程精度	1.5cm+1ppm RMS
定向精度	0.2 °/m RMS

完成采集后，通过以下步骤计算姿态角的理论真实值：（1），将目标 1 经纬高  $T_1(B_1, L_1, H_1)$ 、目标 2 经纬高  $T_2(B_2, L_2, H_2)$ 、和定位平台经纬高  $G(B, L, H)$  转换为地心坐标系下坐标；（2）由（1）计算出三个点的地心坐标系下坐标，结合焦距  $f$ 、目标 1 像素坐标  $(u_1, v_1)$ 、目标 2 像素坐标  $(u_2, v_2)$ ，列出关于姿态角的方程，通过 matlab 进行求解得到三个姿态角。计算姿态角的理论真实值方法框图如图 3.5 所示。

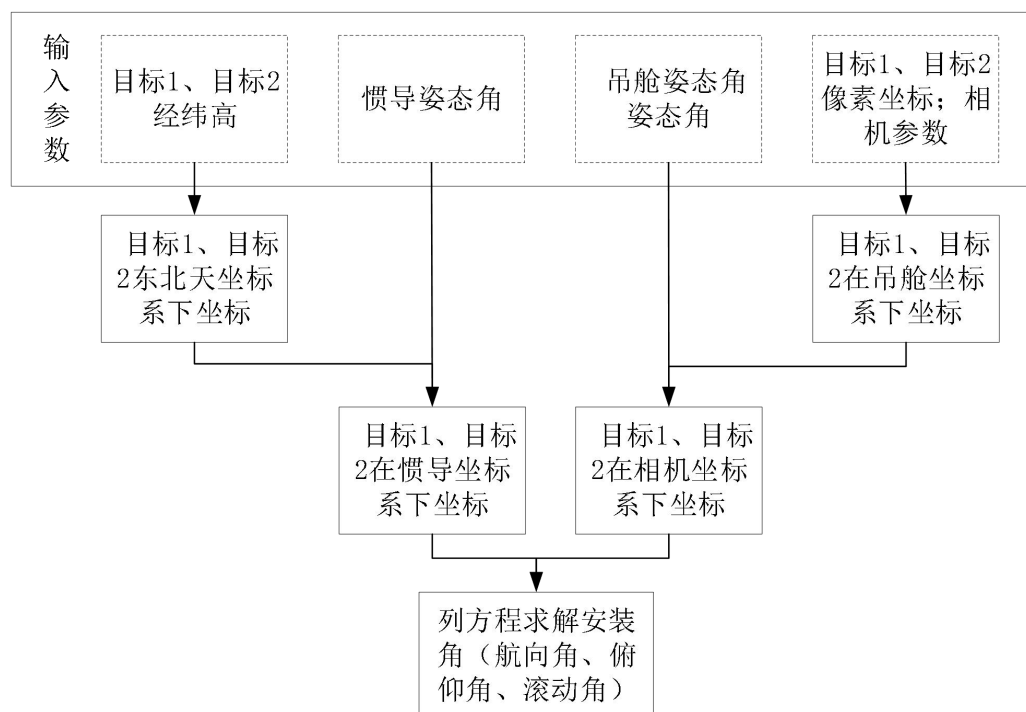


图 3.5 求姿态角真实值方法

Fig. 3.5 Block diagram of the method for obtaining the true value of attitude angle

为了方便实验的进行，实验在陆地进行。为了模拟海面实验的情景，在后续的计算中，认为目标高度为 0，定位平台高度为惯性导航采集高度减去 GPS 采集的目标高度。如图 3.6 所示，两个实线框处分别由高精度 GPS 采集到经纬高，作为目标 1、目标 2 为后续所用。

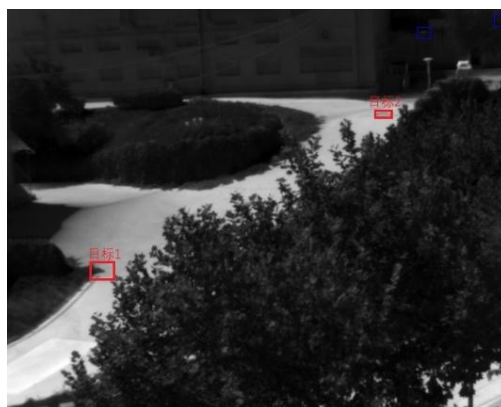


图 3.6 实地采集的红外图像

Fig. 3.6 Infrared images collected on site

采集的目标 1 经纬高、目标 2 经纬高、定位系统所在位置经纬高、目标所在像素以及相机焦距参数如表 3.2 所示

表 3.2 采集数据信息

Tab. 3.2 Collect data information

参数名称	参数值
目标 1 经度°E	38.86464381
目标 1 纬度°N	121.52327085
目标 1 高度	21.29m
目标 2 经度°E	38.86442624
目标 2 纬度°N	121.52306591
目标 2 高度	25.55m
定位系统纬度°E	38.8652436
定位系统经度°N	121.5232941
定位系统高度	35.03m
目标 1 像素坐标	125, 332
目标 2 像素坐标	479, 132
相机焦距	29.1mm

由第 2 章内容可知, 目标 1 经纬高  $TI(B_1, L_1, H_1)$ 、目标 2 经纬高  $TI(B_2, L_2, H_2)$ 、定位平台经纬高  $G(B, L, H)$  可以计算出目标 1 地心坐标系下坐标  $TI(X_{E1}, Y_{E1}, Z_{E1})$ 、目标 2 在地心坐标系下坐标  $TI(X_{E2}, Y_{E2}, Z_{E2})$  和定位平台的地心坐标  $G(X_E, Y_E, Z_E)$ 。由目标 1、目标 2 地心坐标系下坐标, 以及定位平台的地心坐标系下坐标和经纬高, 计算目标 1、目标 2 在以定位平台为坐标原点的东北天坐标系下坐标  $TI(X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1})$ 、 $T2(X_{B2}, Y_{B2}, Z_{B2})$ 。计算公式如式 3.1、3.2 所示, 其中  $i=1, 2$ 。

$$\begin{bmatrix} X_{Bi} \\ Y_{Bi} \\ Z_{Bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(L) & \cos(L) & 0 \\ -\sin(B)\cos(L) & -\sin(B)\cos(L) & \cos(B) \\ \cos(B)\cos(L) & \cos(B)\cos(L) & \sin(B) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Ei} - X_E \\ Y_{Ei} - Y_E \\ Z_{Ei} - Z_E \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

将  $T_i(X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi})$  归一化:

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{X_{Bi}^2 + Y_{Bi}^2 + Z_{Bi}^2} \\ X_{Bi} &= X_{Bi} / L \\ Y_{Bi} &= Y_{Bi} / L \\ Z_{Bi} &= Z_{Bi} / L \end{aligned} \quad (3.2)$$

由第 2 章内容可知, 由目标 1 像素坐标  $T_I(U_1, V_1)$ 、目标 1 像素坐标  $T_I(U_2, V_2)$  计算出目标 1 相机坐标下坐标  $T_I(X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1})$ , 目标 2 相机坐标系下坐标  $T_2(X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2})$ 。将目标 1 东北天坐标系下坐标  $TI(X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1})$ , 目标 2 东北天坐标系下坐标  $T2(X_{B2}, Y_{B2}, Z_{B2})$ , 结合目标 1 相机坐标下坐标  $T_I(X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1})$ , 目标 2 相机坐标系下坐标  $T_2(X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2})$ , 就可以计算采集目标 1、2 时定位平台对应的理论值。通过逆解欧拉角的方法, 求解定位平台姿态的理论值。

设定位平台的滚动角为  $\varphi$ , 俯仰角为  $\theta$ , 航向角的角为  $\psi$ , 列出关于  $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  的方程组:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{B1} \\ Y_{B1} \\ Z_{B1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{B2} \\ Y_{B2} \\ Z_{B2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{c2} \\ Y_{c2} \\ Z_{c2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

通过 matlab 中 `optimset` 函数对式 3.3 进行求解。在采集数据无较大误差的情况下, 经过 4 次以上迭代, 计算精度可以达到误差  $<0.01^\circ$ 。通过计算, 姿态角真实值如表 3.3 所示。

表 3.3 姿态角真实值计算结果

Tab. 3.3 Calculation results of true attitude angle values

参数名称	参数值
航向角 $\psi$	$7.60^\circ$
俯仰角 $\theta$	$9.49^\circ$
滚动角 $\varphi$	$-0.19^\circ$

### 3.2.2 经纬高误差对定位精度的影响

本节分析了定位平台的经纬高误差对定位精度的影响。这些误差来源于惯性导航采集系统，其中经纬度误差影响水平方向，高度误差影响飞机高程。经纬度误差导致东北天坐标系原点偏移，从而引起坐标系平移。差分定位误差很小（在 10cm 以内），可以忽略坐标系旋转的影响。因此，经纬度误差距离与定位系统误差距离相当，可以不予考虑。

高程引起的误差是影响定位误差的重要因素。由于潮汐、固体潮以及似大地水准面测量精度的原因，不可避免的会存在一定的高度误差。高程误差对定位精度的影响示意图如图 3.7 所示：

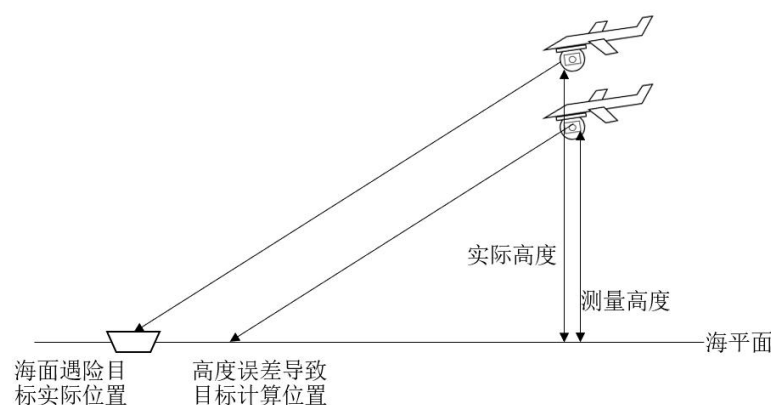


图 3.7 高度误差对定位误差的影响示意图

Fig. 3.7 Schematic diagram of the impact of height error on positioning error

由图 3.7 可知，高度误差与实际高度的比值即为高度引起的定位误差。将表 3.2 和 3.3 数据中，引入一个高度误差，分别计算两个目标在不同航向角误差的定位误差，计算结果如表 3.4 所示。由于存在地球表面弧度、测量参数本身的误差等原因，高度误差与惯导高度的比值与定位误差略有差异。

表 3.4 高度误差引起的定位误差

Tab. 3.4 Positioning error caused by height error

高度误差	目标 1 误差距离	目标 1 定位误差	目标 2 误差距离	目标 2 定位误差
0.1m	0.49m	0.71%	0.98m	1.05%
0.5m	2.44m	3.56%	4.91m	5.24%
1m	4.86m	7.11%	9.82m	10.48%

定位精度的表示方法分为绝对误差和相对误差。绝对误差是指，计算结果与实际位置的距离，通过两点经纬度计算误差距离，由目标检测算法原理可知，定位计算结果与定位测量结果均位于海平面为 0 米的地球表面。已知两个点的经纬度为  $X1(B_1, L_1, H_1)$ 、 $X2(B_2, L_2, H_2)$ ，当  $X1$ 、 $X2$  在同一平面时，计算  $X_1$ 、 $X_2$  两点在空间坐标系下的距离  $l$  的表达式如式 3.4 所示<sup>[60-61]</sup>。

$$l = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{(B_1 - B_2)}{2} + \cos B_1 \cos B_2 \sin^2 \frac{(L_1 - L_2)}{2}} * 6378137 \quad (3.4)$$

当  $X1$ 、 $X2$  在不同一平面时，距离  $D$  的表达式为：

$$D = \sqrt{s^2 + (H_2 - H_1)^2} \quad (3.5)$$

相对误差是定位绝对误差与目标实际位置到定位系统距离的比值。本文中误差距离即为绝对误差，定位误差为相对误差。

### 3.2.3 光轴姿态角误差对定位精度的影响

根据定位算法，航向角决定了定位方向，俯仰角决定了定位距离，而滚动角影响了坐标系旋转。滚动角误差对定位误差的影响，需要综合考虑各个输入参数的具体情况，不能单独分析。因此，在本节中，只分析光轴航向角和光轴俯仰角对定位精度的影响。

#### (1) 航向角误差对定位精度的影响

由目标定位算法原理可知，航向角表示的物理含义是相机光轴在东北天坐标系下的方向，航向角造成的误差主要体现在定位结果方向的偏离，示意图如图 3.8 所示。在图 3.8 中，黑色箭头表示的是目标相对吊舱实际方向，误差是指由于航向角的误差造成的定位误差。当航向角存在误差，且误差为  $n^\circ$  时，引起定位误差  $Er$  的计算公式如式 3.6 所示。

$$Er = 2 \sin(n/2) \% \quad (3.6)$$

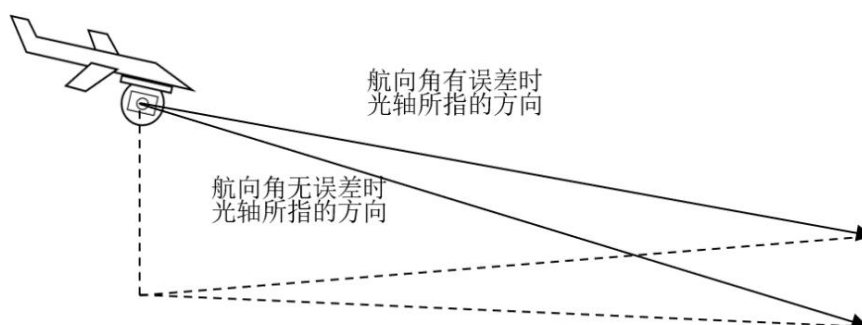


图 3.8 航向角误差对目标定位的影响

Fig. 3.8 The Influence of Heading Angle Error on Target Location

将表 3.2 和 3.3 数据中，引入航向角  $0.02^\circ$ 、 $0.2^\circ$  和  $2^\circ$  误差，分别计算两个目标的定位误差，结果如表 3.5 所示：

表 3.5 航向角误差引起的定位误差

Tab. 3.5 Positioning error caused by heading angle error

航向角误差	目标 1 误差距离	目标 1 定位误差	目标 2 误差距离	目标 2 定位误差
$0.02^\circ$	0.02m	0.03%	0.03m	0.03%
$0.2^\circ$	0.23m	0.34%	0.32m	0.35%
$2^\circ$	2.32m	3.4%	3.2m	3.5%

## (2) 俯仰角误差对定位精度的影响

由目标定位算法原理可知，俯仰角表示的物理含义是，相机光轴在东北天坐标系下，光轴与  $xoy$  平面倾斜程度，这个倾斜程度影响到光轴与地球椭球模型的交点到相机所在位置的垂直距离，示意图如图 3.9 所示。

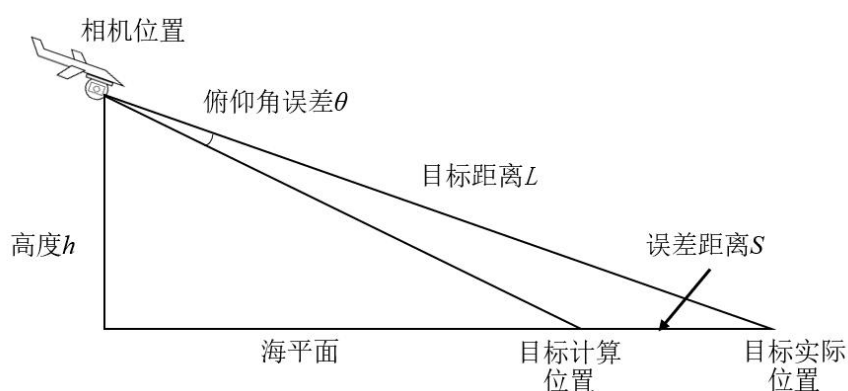


图 3.9 俯仰角误差对目标定位的影响

Fig. 3.9 The Influence of Pitch Angle Error on Target Location



当高度、俯仰角误差大小一定时，距离越远，定位误差越大；当俯仰角误差、距离一定时，高度越低，误差越小；当高度、距离一定时，俯仰角误差越大，定位误差越大。当相机的高度为  $h$ ，目标距离为  $L$ ，采集俯仰角中包含一个大小为  $\theta^\circ$  的误差时，引起的定位误差  $Er$  可以表示为：

$$Er = \sqrt{L^2 - h^2} - \tan(\arcsin \frac{L}{h} - \theta) * h \quad (3.7)$$

将表 3.2 和 3.3 数据中，引入俯仰角  $0.02^\circ$ 、 $0.2^\circ$  和  $2^\circ$  误差，分别计算两个目标在不同俯仰角误差的定位误差，计算结果如表 3.6 所示。

表 3.6 俯仰角误差引起的定位误差

Tab. 3.6 Positioning error caused by pitch angle error

俯仰角误差	目标 1 误差距离	目标 1 定位误差	目标 2 误差距离	目标 2 定位误差
0.02	0.117	0.171%	0.321	0.343%
0.2	1.153	1.691%	3.101	3.314%
2	10.038	14.72%	23.92	25.52%

### 3.2.4 像素点误差对精度的影响

除了姿态角，像素坐标也是影响定位准确性的重要原因。由于目标在图像中所占像素的长度宽度通常大于 1，在像素点的选择可能会出现几个像素点的误差。当出现像素点的误差时，定位的精度也会发生变化。定位算法中需要的目标所在像素具体是指，目标与海面相交的点。如果计算目标位置选择的像素点不是目标与海面相交的点，那么就会产生像素点误差。

横向像素坐标误差和纵向像素坐标误差示意图 3.10 所示，像素点的误差会影响到目标在相机坐标系中的取值，从而影响到后续的定位计算。

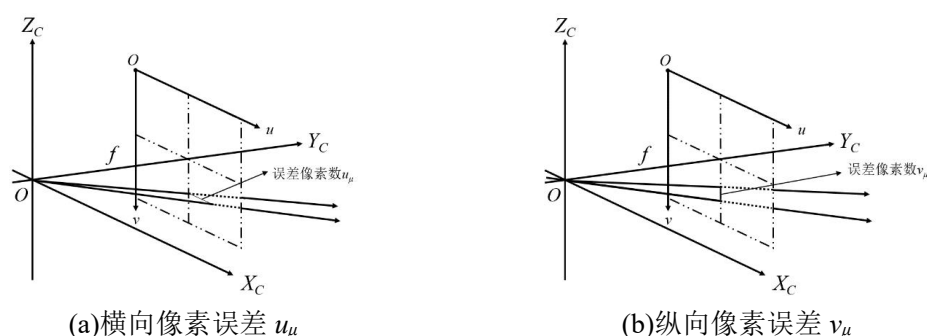


图 3.10 像素误差引起的误差示意图

Fig. 3.10 Pixel Error Caused Error Diagram

横向像素坐标误差引起的定位误差与相机焦距、误差像素数有关。目标在不同的位置，横向像素坐标引起的定位误差大致相同。以目标在图像中间为例，当横向误差像素数为  $u_\mu$ ，焦距为  $f$  时，定位误差  $Er$  为：

$$Er = 0.017 / f * u_\mu \quad (3.8)$$

纵向像素坐标误差引起的定位误差可以转换为俯仰角误差对定位误差的影响。以目标在图像中心为例，当焦距为  $f$ ，纵向像素坐标误差为  $v_\mu$ ，此误差可转换为俯仰角误差  $Er_\theta$  如式 3.9 所示，俯仰角误差引起的定位误差可由式 3.5 进行计算。

$$Er_\theta = \arctan(0.015 / f) \quad (3.9)$$

表 3.2 和 3.3 数据中，引入像素坐标误差，分别计算两个目标在不同像素坐标误差下的定位误差，引入横向像素误差计算结果如表 3.7 所示。

表 3.7 横向像素坐标误差引起的定位误差

Tab. 3.7 Positioning error caused by horizontal pixel coordinate error

横向像素误差	目标 1 误差距离	目标 1 定位误差	目标 2 误差距离	目标 2 定位误差
1	0.034m	0.051%	0.047m	0.051%
3	0.104m	0.153%	0.143m	0.152%
5	0.174m	0.257%	0.238m	0.254%

引入横向像素误差计算结果如表 3.8 所示。

表 3.8 纵向像素坐标误差引起的定位误差

Tab. 3.8 Positioning error caused by vertical pixel coordinate error

纵向像素误差	目标 1 误差距离	目标 1 定位误差	目标 2 误差距离	目标 2 定位误差
1	0.173m	0.253%	0.47m	0.502%
3	0.515m	0.756%	1.394m	1.49%
5	0.854m	1.252%	2.3m	2.459%

### 3.3 本章小结

本章主要分析了海面目标定位过程中定位精度的影响因素，并通过实验数据分析不同参数的误差对定位精度的影响。海面目标定位过程中定位精度的影响因素主要包括地球椭球模型误差、定位平台的安装角以及光轴姿态角的随机误差。不同参数的误差对定位精度的影响主要包括经纬高、光轴姿态角、以及像素点的误差。

## 4 海面目标定位精度提升方法

海面目标定位误差分析的目的是为了定位精度的提升。第3章中分析了海面目标定位误差来源，三种定位误差的来源中，除了地球椭球模型中存在的误差难以消除之外，对于定位平台的安装角引起的定位误差、光轴姿态角中存在的随机误差引起的定位误差均可以进行消除。定位平台的安装角通过标定得到，再将结果带入定位算法中，从而补偿安装角产生的定位误差。光轴姿态角的随机误差通过建立自适应卡尔曼滤波进行消除<sup>[50][51]</sup>。

### 4.1 标定安装角提升定位精度

本节提出一种安装角的标定方法，采集一组目标的实际经纬高和对应的在红外图像中的像素坐标，结合定位平台采集的相机姿态、定位平台位姿，计算定位平台中吊舱和惯导之间的安装角。这种方法需要至少2组目标点，目标点数越多，计算安装角的精度越高。本文提出的海面目标定位方法要求吊舱、惯导刚性连接，因此安装角不会发生改变，仅需标定一次。

#### 4.1.1 标定安装角流程

标定定位平台中吊舱、惯导的安装角所需数据包括：（1）目标的经纬高；（2）目标在红外图像中的像素坐标；（3）吊舱、惯导的位置和姿态；（4）相机焦距。要采集至少2组数据。

设采集目标点数为 $i$ ，要求 $i \geq 2$ ，采集流程图如图4.1所示。

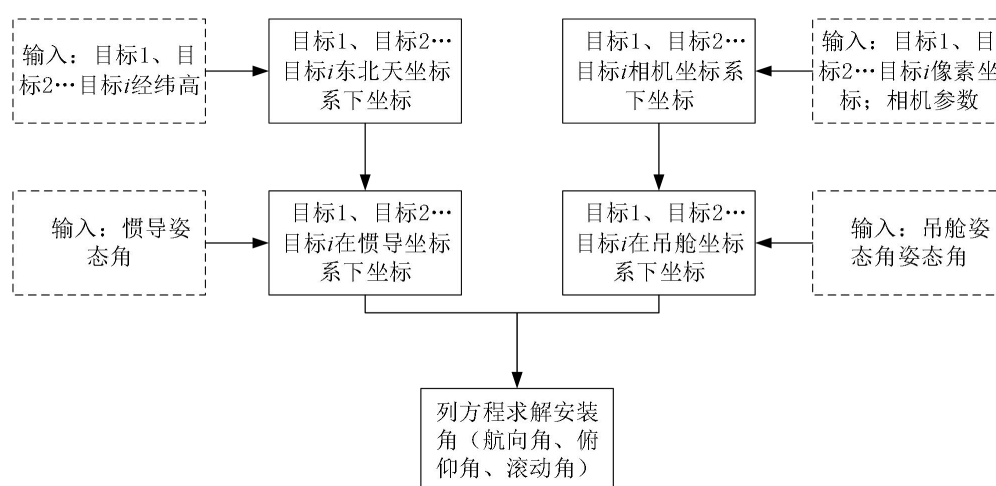


图 4.1 安装角标定流程图

Fig. 4.1 Installation angle calibration flowchart

具体计算方法如下：（1）通过各个目标点的经纬高、定位平台的经纬高以计算各个目标东北天坐标系下的坐标；（2）通过各个点目标东北天坐标系下坐标，结合惯导采集姿态，计算各个目标在惯导坐标系下坐标；（3）通过目标点的像素坐标、相机参数，计算各个目标点相机坐标系下坐标；（4）通过各个目标点相机坐标系下坐标，吊舱采集姿态角，得到目标点对应的吊舱坐标系下坐标；（5）由（2）计算到的目标点在惯导坐标系下坐标，和（4）计算到的目标点在吊舱坐标系下坐标，列方程求解姿态角。

由于采集数据中，不可避免的存在误差，单个数据误差会对定位精度造成较大影响。为了避免采集参数误差对计算安装角的影响，尽可能多的选择目标点进行标定。选择目标点数越多，单个数据的误差对定位精度的影响越小。在后续的实验验证中，用不同数量的目标点标定安装角，并分别比较不同数量的目标点标定结果对定位精度的提升。

#### 4.1.2 求解方程计算安装角

惯导坐标系是指以定位平台为原点，惯导三轴方向为坐标系轴建立的三维坐标系。吊舱坐标系的原点位于定位平台， $Y_{DC}$ 轴指向吊舱航向、俯仰角采集值为 $0^\circ$ 的方向， $X_{DC}$ 轴指向吊舱俯仰角增大的方向， $Z_{DC}$ 轴向上并构成右手直角坐标系。

由第2章内容可知，已知目标点 $i$ 的经纬高 $T_i(B_i, L_i, H_i)$ ，可以计算出归一化的目标点 $i$ 在东北天坐标系下坐标 $T_i(X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi})$ ，在此东北天坐标乘以惯导采集角计算得到的欧拉矩阵的逆矩阵，惯性导航的滚动角为 $\varphi$ ，俯仰角为 $\theta$ ，航向角的角为 $\psi$ ，带入欧拉矩阵时取负值。通过旋转得到惯导坐标系下目标坐标 $T_i(X_{Gi}, Y_{Gi}, Z_{Gi})$ 。计算公式如式4.1所示，其中 $i \geq 2$ 。

$$\begin{bmatrix} X_{Gi} \\ Y_{Gi} \\ Z_{Gi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Bi} \\ Y_{Bi} \\ Z_{Bi} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

由第二章内容可以将目标点 $i$ 像素坐标转换为相机坐标系下坐标 $T_i(X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci})$ ，将此坐标经过吊舱两个采集参数的旋转，其中吊舱航向角为 $\psi'$ ，吊舱俯仰角为 $\theta'$ ，旋转后得到目标点 $i$ 在吊舱坐标系下坐标 $T_i(X_{Di}, Y_{Di}, Z_{Di})$ 。计算公式如式4.2所示，其中 $i \geq 2$ 。

$$\begin{bmatrix} X_{Di} \\ Y_{Di} \\ Z_{Di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta' & \sin \theta' \\ 0 & -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi' & \sin \psi' & 0 \\ -\sin \psi' & \cos \psi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

至此得到了目标 $i$ 在惯导坐标系下坐标 $T_i(X_{Gi}, Y_{Gi}, Z_{Gi})$ 和目标 $i$ 相机坐标下坐标

$T_i(X_{Di}, Y_{Di}, Z_{Di})$ , 便可以解吊舱、惯导之间旋转角度。设滚动角为 $\varphi''$ , 俯仰角为 $\theta''$ , 航向角为 $\psi''$ , 列出关于 $\varphi''$ 、 $\theta''$ 、 $\psi''$ 的方程组, 如式 4.3 所示。式 4.3 中未知数为 3 个, 方程数量为  $3 \times i$  个, 由于  $i \geq 2$ , 式 4.3 为超定方程。通过调用 matlab 中 `optimset` 函数, 对超定方程进行求解<sup>[52][53]</sup>。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{G1} \\ Y_{G1} \\ Z_{G1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta'' & \sin \theta'' \\ 0 & -\sin \theta'' & \cos \theta'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi'' & \sin \psi'' & 0 \\ -\sin \psi'' & \cos \psi'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D1} \\ Y_{D1} \\ Z_{D1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{G2} \\ Y_{G2} \\ Z_{G2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta'' & \sin \theta'' \\ 0 & -\sin \theta'' & \cos \theta'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi'' & \sin \psi'' & 0 \\ -\sin \psi'' & \cos \psi'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D2} \\ Y_{D2} \\ Z_{D2} \end{bmatrix} \quad (4.3) \\ &\dots\dots \\ \begin{bmatrix} X_{Gi} \\ Y_{Gi} \\ Z_{Gi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta'' & \sin \theta'' \\ 0 & -\sin \theta'' & \cos \theta'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi'' & \sin \psi'' & 0 \\ -\sin \psi'' & \cos \psi'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Di} \\ Y_{Di} \\ Z_{Di} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

#### 4.1.3 安装角带入定位算法

海面目标定位算法中, 在不考虑安装角误差时, 相机坐标系下点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  到东北天坐标系坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  的变换是由吊舱、惯导采集的 5 个姿态角确定, 同时光轴姿态角是由吊舱、惯导采集的 5 个姿态角确定的。为了消除安装角误差, 相机坐标系下点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  到东北天坐标系坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  的旋转要对安装角进行补偿, 同时在计算光轴姿态角时, 也需要对安装角进行补偿。

当存在安装航向角 $\psi''$ 、安装俯仰角 $\theta''$ 、安装滚动角 $\varphi''$ 时, 通过以下方法, 相机坐标系下点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  到东北天坐标系坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  的旋转可以补偿安装角: 第一步, 绕坐标系  $X_C$  轴旋转吊舱俯仰角 $\theta'$ ; 第二步, 绕坐标系  $Z_C$  轴旋转吊舱航向角 $\psi'$ ; 第三步, 绕坐标系  $Y_C$  轴旋转安装滚动角 $\varphi''$ ; 第四步, 绕坐标系  $X_C$  轴旋转安装俯仰角 $\theta''$ ; 第五步, 绕坐标系  $Z_C$  轴旋转安装航向角 $\psi''$ 。第六步, 绕坐标系  $Y_C$  轴旋转惯导滚动角 $\varphi$ ; 第七步, 绕坐标系  $X_C$  轴旋转惯导俯仰角 $\theta$ ; 第八步, 绕坐标系  $Z_C$  轴旋转航向角的角度 $\psi$ 。以上的旋转均为逆时针旋转, 经过 5 次旋转, 将相机坐标系下的坐标  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  转换为东北天坐标系坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$ 。

相机坐标系下的点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  经过五次旋转到东北天坐标系坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  的计算公式如式 4.4 所示:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R_C R_I R_G \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

其中  $R_I$  表达式为:

$$R_I = \begin{bmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta'' & \sin \theta'' \\ 0 & -\sin \theta'' & \cos \theta'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi'' & \sin \psi'' & 0 \\ -\sin \psi'' & \cos \psi'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

相机坐标系下的点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  经过旋转到东北天坐标系下坐标  $P(X_W, Y_W, Z_W)$ , 设旋转矩阵为  $R_B$ , 设  $R_B$  表达式为:

$$R_B = \begin{bmatrix} b00 & b01 & b02 \\ b10 & b11 & b12 \\ b20 & b21 & b22 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$R_B$  可以表示为:

$$R_B = R_C R_I R_G \quad (4.7)$$

$R_B$  是一个  $3 \times 3$  的矩阵, 通过矩阵  $R_B$ , 可以得到补偿过安装角误差的光轴航向角  $\alpha'$ 、光轴俯仰角  $\beta'$ 、光轴横滚角  $\gamma'$ , 计算方法式 4.8 所示。

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arctan(b01 / b11) \\ \beta' &= -\arcsin(b21) \\ \gamma' &= -\arcsin(b20 / b22) \end{aligned} \quad (4.8)$$

在定位算法中, 使用补偿过安装角误差的光轴航向角  $\alpha'$ 、光轴俯仰角  $\beta'$ 、光轴横滚角  $\gamma'$  计算目标位置, 得到的就是补偿过安装角误差的定位结果。

## 4.2 验证标定安装角对定位精度的提升

本节内容主要是通过实验验证标定安装角对定位精度的提升, 首先标定定位平台安装角, 再将安装角带入计算定位误差。其中, 标定安装角分别选择 2 个目标点、20 个目标点进行标定, 标定结果分别带入海面目标定位算法中, 比较两次定位标定结果对定位精度的提升。

### 4.2.1 标定定位平台安装角

首先采集数据标定定位平台安装角。下图为莲花山观景台实验时拍摄的图像。

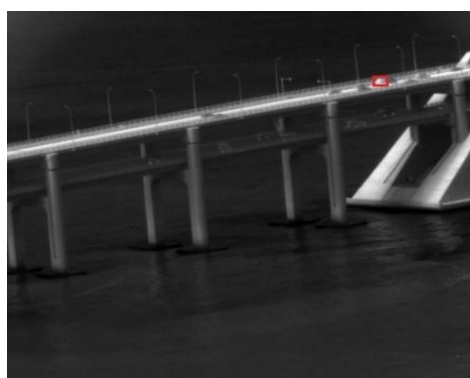


图 4.2 海面实验现场拍摄照片

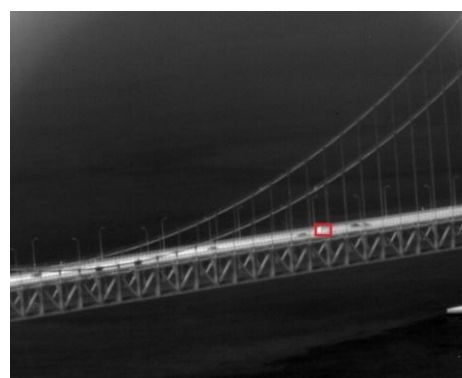
Fig. 4.2 Take photos of the sea surface experiment site

第一次通过两个目标点标定安装角，第二次通过 20 个目标点标定安装角。选择在大连市莲花山观景台放置定位平台，在跨海大桥上开车作为目标。汽车上放置高精度 GPS，可以实时测量经纬高。同时通过 GPS 计算目标与吊舱之间的距离。其中测量参数包括：红外图像中目标的像素坐标、相机俯仰角、相机方位角、光电平台滚动角、光电平台经度、光电平台纬度、光电平台高度、光电平台俯仰角、光电平台偏航角、相机焦距。

定位平台采集含有目标点的红外图像，目标点如图中红框所示，将装有差分 GPS 设备的汽车开到指定位置，红外相机拍摄这辆汽车，同时差分 GPS 采集车辆的经纬高。



(a)



(b)

Fig. 4.3 Infrared images collected from sea surface experiments

图 4.3 海面实验采集的红外图像

安装角标定需要采集各个目标点的经纬高、惯导姿态角、吊舱姿态角、定位平台

经纬高以及红外相机焦距。第一次通过两个目标点标定的采集参数如表 4.1 所示：

表 4.1 参数列表  
Tab. 4.1 parameter list

参数列表	(a)	(b)
目标纬度°N	38.8658362	38.8666665
目标经度°E	121.5852550	121.5785607
目标高度	38.06m	43.08m
目标所在像素	513, 98	426, 296
定位平台航向角	105.9°	150.9°
定位平台俯仰角	5.13°	5.13°
定位平台滚动角	-0.17°	-0.17°
相机航向角	52.02°	41.13°
相机俯仰角	-2.96°	0.03°
定位平台纬度°N	38.8785896	
定位平台经度°E	121.6032333	
定位平台高度	243m	
红外相机焦距	150mm	

由于采集目标点在岸上，需要将相机高度减去目标实际高度，当作海面高度，同时目标高度设为 0m。通过表 4.1 中目标经纬高、定位平台经纬高以及惯导采集的姿态角等参数，可以计算以相机点为原点，目标 1、目标 2 在惯导坐标系下坐标，计算结果如表 4.2 所示：

表 4.2 东北天坐标系下坐标  
Tab. 4.2 Coordinates in the Northeast Celestial Coordinate System

参数列表	(a)	(b)
$X$	-0.775960491	-0.6494856122
$Y$	0.6302960655	0.7604560173
$Z$	0.03536051627	0.003476400712

由表 4.1 中目标经纬高、定位平台经纬高、吊舱采集的姿态角，可以目标 1、目标 2 计算归一化后的吊舱坐标系下坐标，计算结果如表 4.3 所示。



表 4.3 吊舱坐标系下坐标

Tab. 4.3 Coordinates in the Northeast Celestial Coordinate System after Normalization

参数列表	目标 a 对应参数	目标 b 对应参数
$X$	-0.8453713793	-0.7365120561
$Y$	0.5322617752	0.6762066038
$Z$	0.059588397	0.02077547306

将表 4.2、4.3 结果带入式 4.3，组成包含三个未知数的超定方程，带入 matlab 程序，调用计算得到吊舱惯导标定参数为：

表 4.4 标定参数

Tab. 4.4 Calibration parameters

参数名称	参数值
航向角	$-7.59^{\circ}$
俯仰角	$-0.78^{\circ}$
滚动角	$-0.61^{\circ}$

利用 matlab 绘制 3 维点云图，验证标定参数。将安装角标定前吊舱坐标系下坐标、东北天坐标系下坐标在点云图中表示出来，再将吊舱坐标系下点坐标经过标定参数的旋转后计算到的结果，分别带入点云图中，结果如图 4.4 所示，标定后两个目标在东北天坐标系下坐标和吊舱坐标系下坐标基本重合，说明安装角的补偿有效。

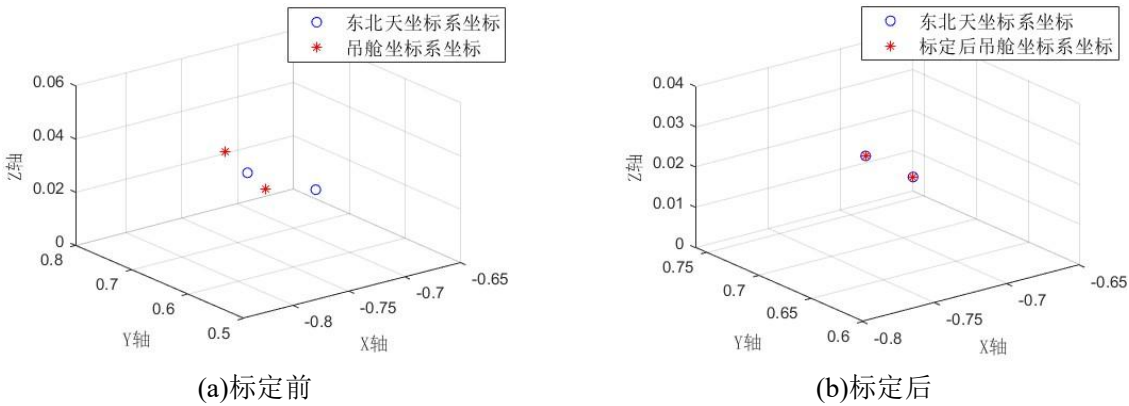


图 4.4 标点前后三维坐标示意图

Fig. 4.4 Schematic diagram of 3D coordinates before and after punctuation

第二次标定选择 20 个目标，分别求 20 个目标对应的东北天坐标系坐标和吊舱坐标系坐标，计算结果入表所示。

表 4.5 目标点数值

Tab. 4.5 The target point value

吊舱坐标系下坐标	东北天坐标系下坐标
0.15358926, 0.98417561, 0.19279257	0.15368926, 0.98437561, 0.19299257
0.16166213, 0.98292941, 0.19055267	0.16366213, 0.98152941, 0.19035267
0.24596584, 0.96517988, 0.19565824	0.24526584, 0.96537988, 0.19585824,
0.32610545, 0.94106973, 0.1983886	0.32650545, 0.94226973, 0.1983886,
0.29243112, 0.9520066, 0.20135542	0.29243112, 0.9524066, 0.20165542
0.31553429, 0.94470053, 0.19686178	0.31553429, 0.94440053, 0.19656178
0.36428532, 0.9269873, 0.19714211	0.36448532, 0.9267873, 0.19744211
0.39347017, 0.91505412, 0.19395174	0.39347017, 0.91525412, 0.19385174
0.24596584, 0.96517988, 0.19565824	0.16186213, 0.98252941, 0.19065267
0.32610545, 0.94106973, 0.1983886	0.24596584, 0.96571988, 0.19555824
0.29243112, 0.9520066, 0.20135542	0.32610545, 0.94136973, 0.1983286
0.31553429, 0.94470053, 0.19686178	0.29203112, 0.9524066, 0.20132542
0.36428532, 0.9269873, 0.19714211	0.31593429, 0.94450053, 0.196866178
0.39347017, 0.91505412, 0.19395174	0.36458532, 0.9269873, 0.19734211
0.38936629, 0.9167502, 0.19647847	0.39377017, 0.91505412, 0.19385174
0.35749308, 0.92972294, 0.19291789	0.38986629, 0.9167502, 0.19687847
0.41722513, 0.90453513, 0.19113358	0.35739308, 0.92972294, 0.19271789
0.46718641, 0.87965016, 0.19622761	0.41752513, 0.90453513, 0.19113358
0.46561258, 0.88042228, 0.19883077	0.46748641, 0.87965016, 0.19642761
0.42061583, 0.9028761, 0.19490475	0.46571258, 0.88042228, 0.19873077

由表中吊舱坐标系坐标和东北天坐标系坐标，计算安装角的标定结果如表所示：

表 4.6 标定参数

Tab. 4.6 Calibration parameters

参数名称	参数值
航向角	-6.91°
俯仰角	-0.83°
滚动角	-0.55°

将安装角标定前吊舱坐标系下坐标、东北天坐标系下坐标在点云图中表示出来，再将吊舱坐标系下点坐标经过标定参数的旋转后计算到的结果，分别带入点云图中，

结果如图 4.5 所示，可以看出标定后东北天坐标系下坐标和吊舱坐标系下坐标基本重合，说明安装角的补偿有效。

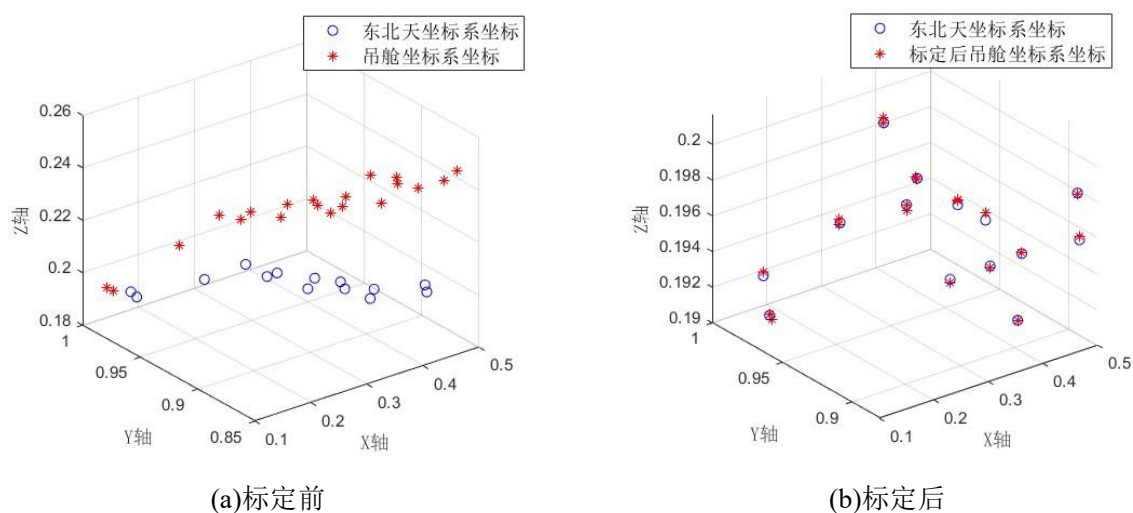


图 4.5 标定前后三维坐标示意图

Fig. 4.5 Schematic diagram of three-dimensional coordinates before and after calibration

#### 4.2.2 安装角标定对定位精度的提升

将 4.1.2 中标定结果带入定位算法，通过实地实验验证安装角标定对定位精度的影响。为了对比安装角标定对定位精度的提升以及选择目标点数对标定精度的影响，采集定位数据，分别计算未补偿安装角时的定位误差、补偿由 2 点标定的安装角和补偿 30 点标定的安装角时的定位误差。采集图像如下图所示：

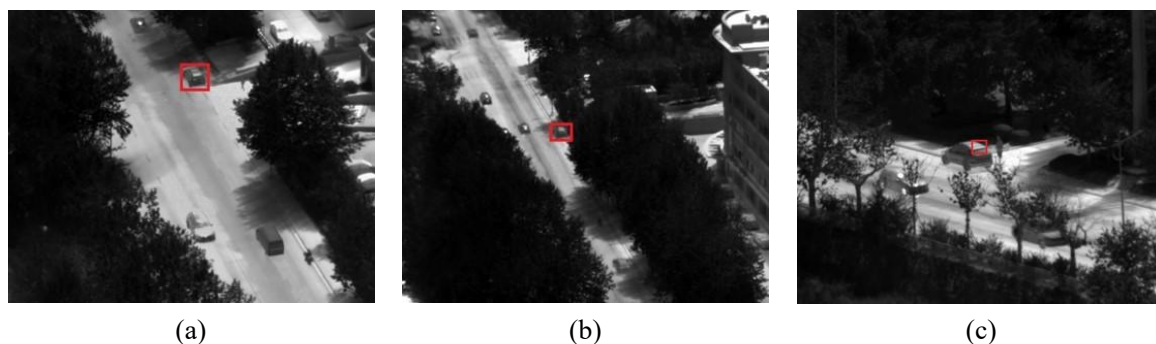


图 4.6 定位实验采集的红外图像

Fig. 4.6 Infrared images collected from positioning experiments

采集数据包括：相机俯仰角、相机航向角、相机焦距、平台俯仰角、平台滚动角、

平台偏航角、平台经度、平台纬度、平台高度。目标像素坐标根据目标在图像中的位置手动选择。计算定位误差相关的采集参数如表 4.7 所示。

表 4.7 采集参数  
Tab. 4.7 Collect parameters

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标像素	330 105	277 202	305 228
相机俯仰角	-27.58°	-18.83°	-11.7°
相机航向角	66.9°	70.58°	78.6°
相机焦距	50mm	50mm	50mm
平台俯仰角	0.58°	0.58°	1.38°
平台滚动角	-2.29°	-2.29°	-2.61°
平台偏航角	116.87°	116.87°	116.76°
平台经度°E		121.5154583	
平台纬度°N		38.86301719	
平台高度		150.05m	

将采集参数带入定位程序，分别计算三个目标的经纬度、误差距离以及定位误差，计算结果如表 4.8 所示。

表 4.8 定位计算结果  
Tab. 4.8 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标经度计算值°E	121.51361423	121.51301342	121.5121645
目标纬度计算值°N	38.861661264	38.860860971	38.859140953
目标经度测量值°E	121.5137182	121.5131306	38.8592861
目标纬度测量值°N	38.8616974	38.8609665	121.5121818
目标高度	57.52m	59.34m	62.82m
误差	7.45m	15.86m	21.42m
距离	230m	318m	511m
定位精度	3.23%	4.99%	4.19%

将 2 个点标定到的安装角以及采集参数带入定位程序计算定位误差，分别计算三个目标的经纬度、误差距离以及定位误差，计算结果如表 4.9 所示

表 4.9 定位计算结果  
Tab. 4.9 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标经度计算值°E	121.51367688	121.51305821	121.5121818
目标纬度计算值°N	38.861661264	38.860860971	38.859140953
目标经度测量值°E	121.5137182	121.5131306	38.8592861
目标纬度测量值°N	38.8616974	38.8609665	121.5121818
目标高度	57.52m	59.34m	62.82m
误差	5.39m	13.3m	18.5m
距离	230m	318m	511m
定位精度	2.34%	4.19%	3.63%

将 20 个点标定到的安装角以及采集参数带入定位程序计算定位误差，分别计算三个目标的经纬度、误差距离以及定位误差，计算结果如表 4.10 所示。

表 4.10 定位计算结果  
Tab. 4.10 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标经度计算值°E	121.5136875	121.51307736	38.859170437
目标纬度计算值°N	38.861663835	38.860868961	121.51211877
目标经度测量值°E	121.5137182	121.5131306	38.8592861
目标纬度测量值°N	38.8616974	38.8609665	121.5121818
目标高度	57.52m	59.34m	62.82m
误差	4.59m	11.8m	14m
距离	230m	318m	511m
定位精度	1.99%	3.71%	2.74%

实验结果表明，补偿安装角可以明显提升定位精度，且计算安装角用到的目标数越多，定位误差越小。

### 4.3 卡尔曼滤波提升定位精度

在第三章中，分析了采集数据中存在随机误差，而输入参数的误差又会对定位结果带来影响。为了提高采集精度，通过滤波的方法，减小采集数据中存在的随机误差。

滤波是指在接收的数据、信号中带有干扰时，提取出有用的信号，根据信号的特点，采用不同的滤波准则。常见的滤波方法有高斯滤波、限幅滤波、中值滤波、卡尔曼滤波等，其中卡尔曼滤波是一种递推的线性最小方差估计的滤波方法，不需要知道后续数据，能满足滤波的实时性，适用于对采集的姿态角数据进行滤波处理<sup>[54-56]</sup>。卡尔曼滤波示意图如图 4.7 所示。

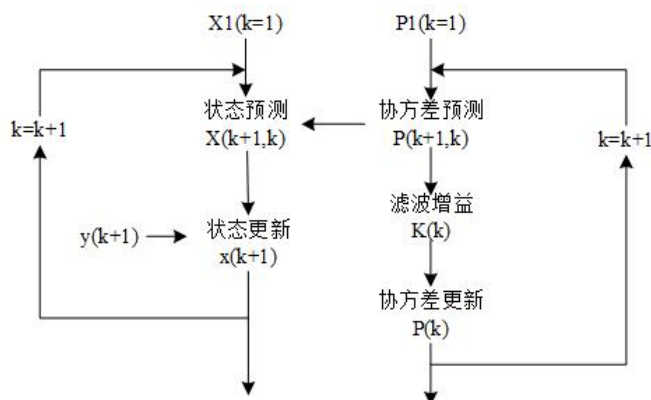


图 4.7 卡尔曼滤波算法原理图

Fig. 4.7 Schematic diagram of Kalman filtering algorithm

#### 4.3.1 建立自适应卡尔曼滤波模型

在海面目标定位中，对光轴的姿态进行滤波。首先将采集的吊舱、惯导姿态角转换为光轴姿态角，然后对光轴三个姿态角进行卡尔曼滤波，滤波完成后带入定位算法。卡尔曼滤波基本模型如图 4.8 所示：

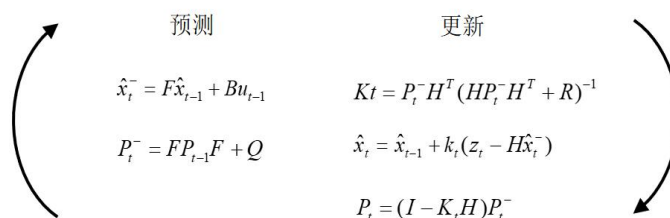


图 4.8 卡尔曼滤波基本模型

Fig. 4.8 Basic model of Kalman filtering

海面目标定位平台中，采集姿态角的速率设定为 50Hz，即采样间隔  $T=0.02s$ 。系统状态方程如式 4.9 所示：

$$x(k) = x(k-1) + w(k-1) \quad (4.9)$$

其中， $x(k) = [\alpha(k), \beta(k), \gamma(k)]^T$ ， $\alpha(k)$ 表示光轴航向角， $\beta(k)$ 表示光轴俯仰角， $\gamma(k)$ 表示光轴横滚角。 $w(k)$ 为系统的状态噪声，服从高斯噪声序列分布，期望为  $q(k)$ ，协方差为  $Q(k)$ 。

系统测量方程的表达式如式 4.10 所示：

$$y(k) = x(k) + v(k) \quad (4.10)$$

其中  $y(k)$ 为  $k$ 时刻测量值， $y(k) = [\theta(k), \theta(k), \theta(k)]^T$ 。 $v(k)$ 为测量噪声期望为  $r(k)$ ，协方差为  $R(k)$ 。

建立系统状态方程和测量方程后，可以建立卡尔曼滤波的基本模型。卡尔曼滤波模型分为预测和更新两部分。

#### (1) 预测部分

状态预测：

$$x(k, k-1) = A(k)x(k-1) \quad (4.11)$$

协方差矩阵预测：

$$P(k, k-1) = A(k)P(k-1)A(k)^T + Q(k) \quad (4.12)$$

#### (2) 更新部分

滤波增益：

$$K(k) = P(k, k-1)[H(k)]^T \{H(k)P(k, k-1)[H(k)]^T + R(k)\}^{-1} \quad (4.13)$$

状态更新：

$$x(k) = x(k, k-1) + K(k)[y(k) - H(k)x(k, k-1)] \quad (4.14)$$

协方差更新：

$$P(k) = [I_n - K(k)H(k)]P(k, k-1) \quad (4.15)$$

由式 4.12~4.16，组成卡尔曼滤波的基本模型。

### 4.3.2 卡尔曼滤波参数自适应

在海面目标定位中，定位平台面临的场景不同，放置位置可能是相对平缓的船上，也可能是高频噪声很多的无人机。在不同的环境下，状态方程和测量方程的噪声特性也不同，如果固定  $Q(k)$ 和  $R(k)$ ，无法满足在不同场景下卡尔曼滤波有效，同时可能导致滤波结果的发散。为了解决这一问题，本文使用基于统计学中的无偏估计方法，通过计算一定数量误差的算术平均值来表示误差期望，并使用这些误差期望来估算误差

的近似方差，从而推算当前系统噪声和测量噪声的特性<sup>[57-59]</sup>。

系统状态噪声  $w(k)$  的期望值为  $q(k)$ ，表达式如下：

$$q(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x(j) - A(k)x(j-1)] \quad (4.16)$$

系统状态噪声  $w(k)$  的方差  $Q(k)$  为对角矩阵，对角线上各个元素为  $q_w(k)$  中各元素的平方， $q_w(k)$  表达式如下：

$$q_w(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x(j) - A(k)x(j-1) - q(k)] \quad (4.17)$$

系统测量噪声  $v(k)$  的期望值为  $r(k)$ ，表达式如下：

$$r(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x(j) - H(k)x(j, j-1)] \quad (4.18)$$

系统测量噪声  $v(k)$  的方差  $R(k)$  为对角矩阵，对角线上个元素为  $r_v(k)$  中各元素的平方， $r_v(k)$  表达式如下：

$$r_v(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x(j) - H(k)x(j, j-1) - r(k)] \quad (4.19)$$

由式 4.17~4.19 完成从当前帧的状态噪声和测量噪声的计算，当前帧数据前 5 帧的数据计算当前帧的状态噪声和测量噪声，即  $k = 5$ 。

#### 4.4 验证卡尔曼滤波对定位精度的提升

通过实验验证卡尔曼滤波对定位精度的提升。将采集到的吊舱航向角、俯仰角和惯导航向角、俯仰角、滚动角融合为定位算法所需的整体航向角、俯仰角、滚动角，并分别对三个角度做卡尔曼滤波。选择连续的数据，滤波前后对比结果如图 4.9、4.10 和 4.11 所示：

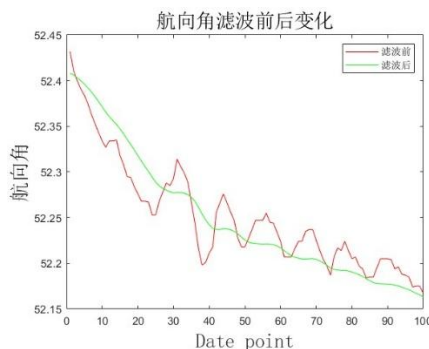


图 4.9 航向角滤波前后变化

Fig. 4.9 Changes in heading angle before and after filtering



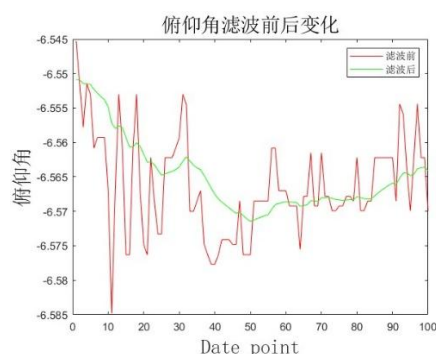


图 4.10 俯仰角滤波前后变化

Fig. 4.10 Changes in heading angle before and after filtering

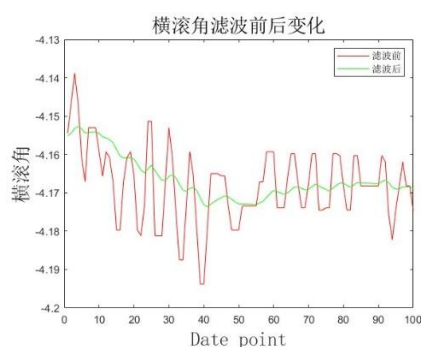


图 4.11 横滚角滤波前后变化

Fig. 4.11 Changes in heading angle before and after filtering

将滤波后的姿态角和滤波前的姿态角分别带入定位算法计算定位误差，对比滤波对定位精度的影响。以第一个待测定位精度目标点为例，如图 4.12 所示，目标位于实线框处，取实线框中心点所在像素坐标为目标像素坐标。

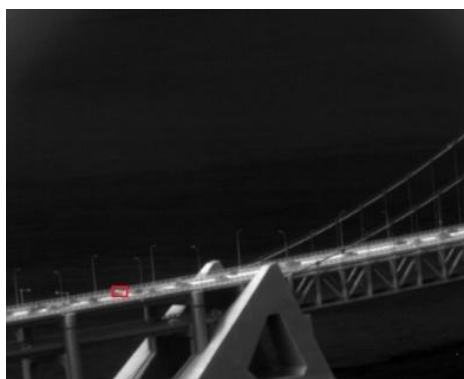


图 4.12 定位实验采集的红外图像

Fig. 4.12 Infrared images collected from positioning experiments

为了验证光轴姿态角滤波后对定位精度的提升,取 12 个目标点数据,分别计算滤波前后定位误差,计算结果如下图所示:

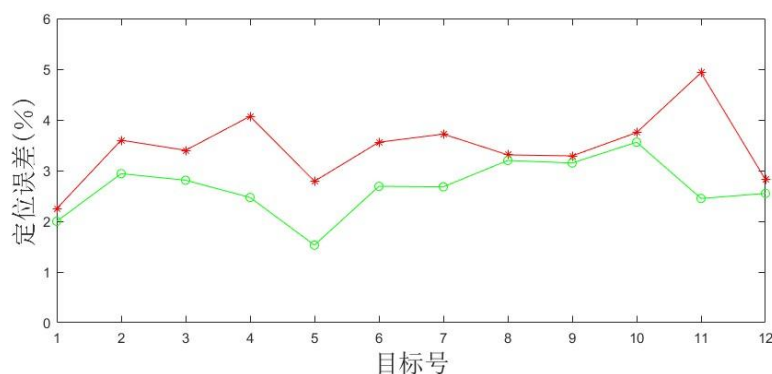


图 4.13 卡尔曼滤波前后定位误差

Fig 4.13 Kalman filter before and after positioning error

由图 4.13 中光轴姿态角数据经过卡尔曼滤波前后计算定位结果可以发现,卡尔曼滤波消除光轴姿态角的随机误差后,定位精度明显得到提升,由此可见,卡尔曼滤波可以提升定位精度。

## 4.5 本章小结

本章主要内容是海面目标定位精度提升方法,结合前文的分析,本章提出了两种精度提升方法。第一种方法是标定安装角,并将安装角带入海面目标定位算法,从而消除安装角的误差。在 4.1 小节中介绍了标定安装角的方法,在 4.2 小节中,实地采集数据标定安装角,并带入定位算法计算定位精度。结果表明,补偿安装角可以有效提升定位精度,而且标定安装时选择的目标点数越多,定位精度的提升越明显。第二种方法是卡尔曼滤波提升定位精度。在第 3 章中,分析了光轴姿态角中存在的随机误差,随机误差会对定位精度产生重要影响,基于此,本章提出了通过卡尔曼滤波消除光轴姿态角随机误差的方法。在 4.3 小节中详细介绍了一种自适应卡尔曼滤波,在第 4.4 小节中,对采集的数据进行卡尔曼滤波,并将滤波后数据带入定位算法,结果表明,卡尔曼滤波可以有效提升定位精度。

## 5 定位软件以及实验验证

本章主要内容是介绍定位软件、定位测试软件以及通过实验验证海面目标定位方法。在 5.1、5.2 小节中介绍定位软件，定位软件包括定位系统软件和定位测试软件，其中定位系统软件用于海面目标定位，包含选择数据集、显示红外图像、显示目标位置等功能。定位测试软件用于在定位精度提升方法的验证等，主要用于测试算法的功能。在 5.3 小节中验证了本文提出的定位方法的定位精度，具体是指经过精度提升后目标的定位精度，并且对不同的海面目标定位算法计算精度进行了对比。

### 5.1 定位软件组成

为了方便使用本文建立的海面目标定位算法，设计一套定位软件，定位软件需要包含以下功能：1、选择不同路径下包含定位算法所需所有数据的数据集，并在显示界面显示红外图像；2、获得与图像信息匹配的完整定位数据，进行目标定位，并且将定位结果以经纬度的形式显示。

#### 5.1.1 定位软件的设计流程

定位软件设计框图如图所示：

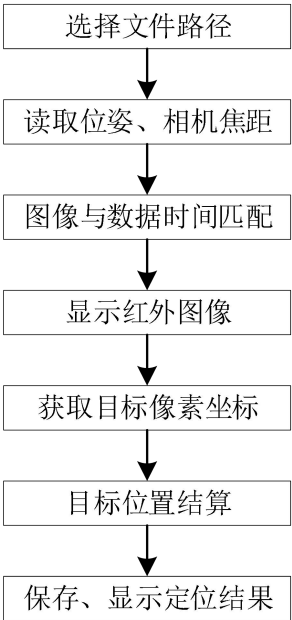


图 5.1 定位软件设计框图

Fig. 5.1 Design block diagram of positioning software

定位软件是通过 Windows 系统下 Microsoft Visual Studio 平台进行开发，编程语言是 C++。定位软件包含的功能有：1、读取图像时间、目标号、以及对应的目标像素坐标；2、读取吊舱、惯导文件；3、时间匹配；4、计算目标位置；5、存放定位结果。

红外采集时间间隔为 33ms，要求定位模块要在 33ms 内处理完毕。经测试，在待处理目标 100 个的极端情况下，在服务器上的处理时间小于 33ms，可以满足海面目标搜寻系统实时性的需求。

### 5.1.2 定位数据时间匹配

目标定位中所有所需的参数，其中目标序号以及对应的像素坐标，是由目标检测模块提供；吊舱、惯导采集位姿以及相机焦距，是通过图像时间，在存放吊舱、惯导、焦距的 txt 中找到时间最接近的数据。以惯导数据为例，定位数据时间匹配示意图如图 5.2 所示，左侧为红外图像序列每一帧数据采集时间，右侧惯导数据序列每一帧数据采集时间，时间记录格式为：年、月、日、时、分、秒、毫秒，时间匹配就是给红外图像找到对应的时间最接近的惯导、吊舱数据。时间匹配示意图如图 5.2 所示。

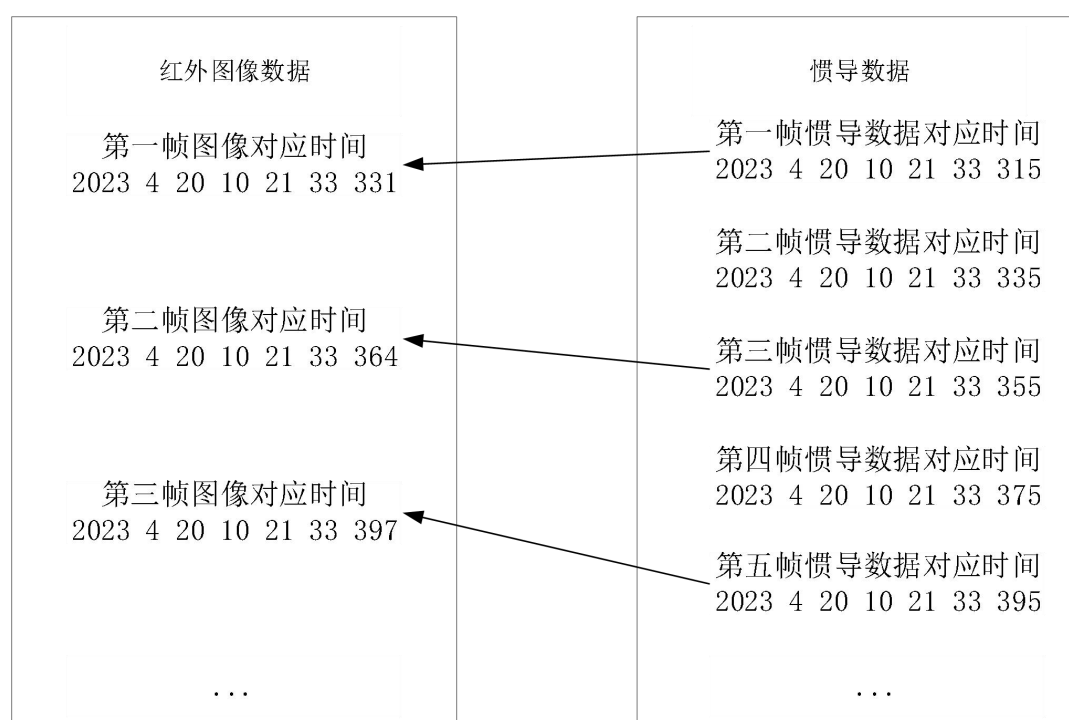


图 5.2 时间匹配示意图

Fig. 5.2 Time matching diagram

以红外图像与惯导数据时间匹配为例，流程如下：第一步：读取红外图像时间的

时、分、秒，毫秒，并将其转换为毫秒数。第二步：打开记录惯导采集时间、数据的txt，转到上次时间匹配记录到的行数，从下一行开始，将时间的时、分、秒、毫秒转换为毫秒数。第三步：红外图像时间毫秒数减去惯导数据采集时间毫秒数。若毫秒数差>阈值，则读取惯导下一帧数据，再次读取时间毫秒数，重复第三步；若毫秒数差的绝对值<=阈值，再将下一帧惯导时间与红外时间做差，选择这两帧中与图像时间最接近的数据，这一帧惯导数据为后续定位算法所用。记录匹配到惯导信息的行数，结束时间匹配；若毫秒数差<0且绝对值>阈值，则将毫秒数差绝对值最小一帧为定位所用。流程图如图 5.3 所示。

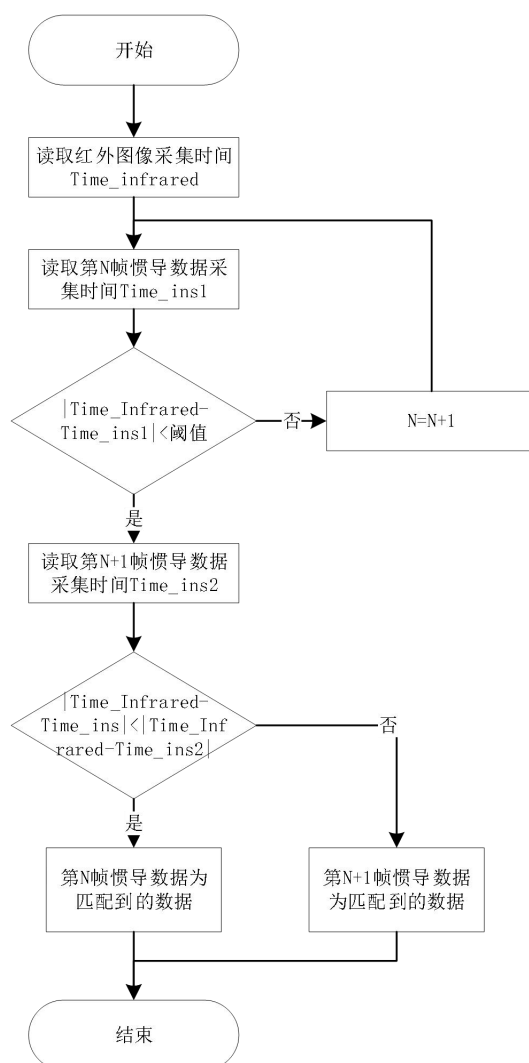


图 5.3 时间匹配流程图

Fig. 5.3 Design block diagram of positioning system software

红外图像采集速率为 30hz，吊舱、惯导采集速率为 50hz，由时间匹配方法可知，阈值设为红外图像采集时间的一半可以找到最接近的数据，因此，时间阈值设为 17ms。上述为匹配得到惯导数据的方法，吊舱数据时间匹配的流程相同，读取吊舱存储文件路径即可。

### 5.1.3 定位软件界面

海面目标定位软件用户界面如图 5.4 所示：左上方为红外相机采集到的图像，图像下方为采集到的吊舱、惯导位姿信息；界面右上为吊舱、相机控制按钮，负责控制吊舱的转动以及时长的调节；界面右下方可以选择读取的文件夹。



图 5.4 定位软件界面

Fig. 5.4 Positioning software interface

定位程序开始运行时，目标检测模块同时开始运行，当发现疑似目标后，会在目标上画蓝色方框，确定是真实目标后，会画绿色框，同时给图像中的出现的目标编号，将目标序号和目标像素坐标同时放入结构体。结构体中存放的信息包括：图像时间、相机焦距、目标数、目标号以及目标号对应的像素坐标。目标检测模块将这个结构体传入定位软件，定位线程开始执时间匹配、目标位置计算等后续操作。

## 5.2 定位测试软件组成

为了方便定位实验，同时开发了定位测试软件，功能在定位软件的基础上增加了其他功能。定位测试软件跟定位软件相同，都是在 Windows 系统下 Microsoft Visual

Studio 平台下进行开发。

定位测试软件包括如下功能：（1）给定像素坐标、吊舱姿态、惯导位姿、相机焦距以及由 GPS 测的目标实际经纬高，计算目标定位误差；（2）标定吊舱、惯导位置相对位置，并将标定结果带入定位数据，计算定位误差。在算法开发阶段，通过此软件可以方便判断定位算法中是否存在错误；（3）在标定吊舱、惯导位置阶段，通过此软件可以便捷的看到标定效果，从而判断标定结果的准确性。（4）用于分析定位中各个参数对定位中误差的影响，结合处理 txt 文件的脚本，高效的分析某一参数误差对定位精度产生的影响。

### 5.2.1 定位系统测试软件的设计流程

定位测试软件设计流程如图 5.5 所示。

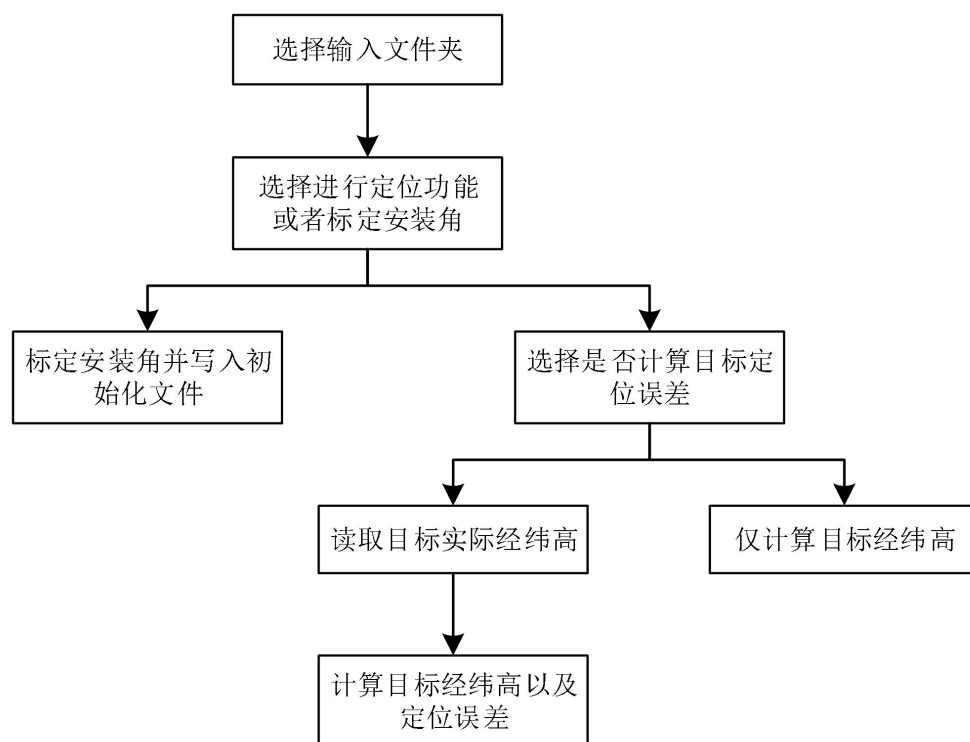


图 5.5 定位测试软件设计框图

Fig. 5.5 Design block diagram of positioning testing software

定位测试软件的定位算法部分与定位软件的定位算法相同。定位测试软件需要的完整的数据集除了定位所有所需数据外，还包括通过高精度 GPS 测量得到的目标经纬高，用于计算定位误差。

### 5.2.2 定位系统测试软件界面

定位测试软件界面如图 5.6 所示。图像正下方显示的是两个目标的像素坐标，以及对应的定位精度，这两个点可以通过点击图像位置选择，也可以更改输入文件中的像素坐标。图片右边可以选择是否使用文件中的像素坐标、是否计算标准姿态角以及是否计算、使用安装角。用户界面的右下方可以选择读取文件的路径。



图 5.6 定位测试软件界面

Fig. 5.6 Positioning testing software interface

## 5.3 海面目标定位方法验证

该部分通过实验验证本文提出的海面目标定位算法的定位精度。本文还选取另一种较为先进的海面目标定位算法与本文提出的算法(后文简称 IESI)进行对比，这个算法是由 2020 年徐士婷提出的基于机载光电平台的海面目标定位方法(后文简称 AOP)。两种算法共用同一套设备，AOP 算法的代码已由论文作者分享。

海面目标定位方法验证实验分为以下三步：第一步，采集目标经纬度与对应定位平台的参数计算定位误差，比较本文提出的 IESI 算法和 AOP 算法的定位精度；第二步，将补偿安装角的结果带入计算定位误差，其中安装角选择 30 个目标点的标定结果；第三步，将补偿过安装角计算出的光轴姿态角经过卡尔曼滤波，并计算定位精度。由第三步得到的定位精度即为通过完整的海面目标定位方法后的定位精度。



5.3.1 验证海面目标定位算法

海面目标定位方法验证实验采集图像的图像如图 5.7 所示，目标在红色实线框中，通过差分 GPS 采集目标经纬高。

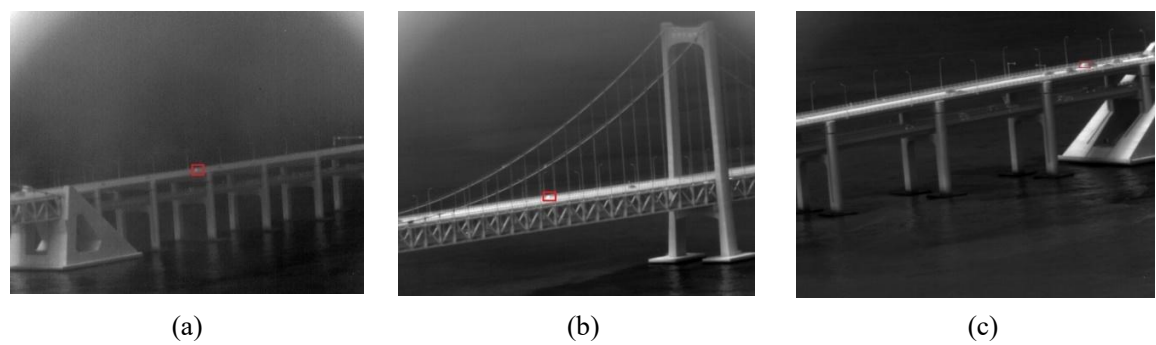


图 5.7 定位实验采集的红外图像

Fig. 5.7 Infrared images collected from positioning experiments

采集的数据包括目标像素、相机俯仰角、相机方位角、相机焦距、平台俯仰角、平台滚动角、平台偏航角以及平台经纬高，采集参数如表 5.1 所示。

表 5.1 采集数据参数  
Tab. 5.1 Collect data parameters

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标像素	430, 296	155, 387	337, 285
相机俯仰角	0.03°	-1.29°	0.75°
相机方位角	41.14°	49.54°	35.02°
相机焦距	150mm	150mm	150mm
定位平台俯仰角	5.13°	5.13°	5.13°
定位平台滚动角	-0.18°	-0.18°	-0.18°
定位平台偏航角	105.63°	105.63°	105.63°
定位平台经度°E		38.8785896	
定位平台纬度°N		121.6032333	
定位平台高度/m		243	
目标经度测量值°E	121.5785607	121.5852550	121.5736787
目标纬度测量值°N	38.8666665	38.8658362	38.8672690
目标高度/m	43.08	38.06	36.6

直接由采集数据计算定位误差，计算结果如表 5.2 所示：

表 5.2 定位计算结果

Tab. 5.2 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
IESI 算法计算目标经度值°E	121.5782855	121.5853663	121.5728372
IESI 算法计算目标纬度值°N	38.86608601	38.86562343	38.86663566
IESI 算法计算误差距离	82.45m	55.86m	135.42m
IESI 算法计算定位精度	3.27%	2.65%	4.74%
AOP 算法计算目标经度值°E	121.5782883	121.5853681	121.5728348
AOP 算法计算目标纬度值°N	38.86608811	38.86562125	38.86663817
AOP 算法计算误差距离	87.28m	60.56m	140.93m
AOP 算法计算定位精度	3.46%	2.87%	4.93%

表 5.2 中可以看出, 三个目标的定位误差都有所减少。实验结果表明, 在定位平台高度范围在 150 米以上的场景中, 对于距离 3km 以内的目标, 本文提出的 IESI 算法对比 AOP 算法在精度上有所提升。

### 5.3.2 验证标定安装角对定位精度的提升

将标定到的安装角带入本文定位算法, 计算定位误差。安装角标定结果选择 4.2.1 小节中, 通过 20 个目标点标定结果。定位误差计算结果如表 5.3 所示。

表 5.3 定位计算结果

Tab. 5.3 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标经度计算值°E	121.5782855	121.5853663	121.5728372
目标纬度计算值°N	38.86608601	38.86562343	38.86663566
目标高度	43.08m	38.06m	36.6m
误差距离	68.88m	25.57m	101.44m
目标距离	2516.74m	2107.92m	2854.62m
定位精度	2.74%	1.21%	3.55%

由表 5.3 与表 5.2 中三个目标点的定位精度可以看出, 通过标定安装角后, 定位精度得到了提升。

### 5.3.3 验证卡尔曼滤波对定位精度的提升

首先消除安装角误差，再将光轴姿态角经过卡尔曼滤波处理，计算目标定位精度，计算结果如表 5.4 所示。

表 5.4 定位计算结果  
Tab. 5.4 Positioning calculation results

图像序号	(a)	(b)	(c)
目标经度计算值°E	121.5782727	121.5853365	121.5728073
目标纬度计算值°N	38.86640669	38.86591079	38.86697821
目标高度	43.08m	38.06m	36.6m
误差距离	38.20m	10.90m	82.17m
目标距离	2516.74m	2107.92m	2854.62m
定位精度	1.51%	0.52%	2.88%

由表 5.4 与表 5.3 中三个目标点的定位精度可以看出，通过卡尔曼滤波消除了光轴姿态角后，定位精度得到了提升。

### 5.3.4 海面目标定位精度分布

本小节验证海面目标定位的精度分布，选择 100 个距离 3 千米以内的目标点，计算消除了安装角误差、光轴姿态角随机误差之后的定位精度，精度分布如图 5.8 所示。

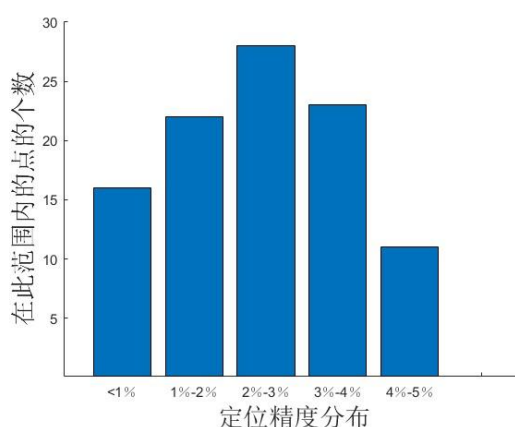


图 5.8 计算目标定位精度分布

Fig. 5.8 Calculate the target positioning accuracy distribution

实验结果表明，海面目标定位的定位精度在经过安装角补偿以及卡尔曼滤波后，定位平台高度在 150m 以上时，对于 3km 以内的目标，定位精度可以达到 5% 以内。

## 5.4 本章小结

本章主要介绍了定位系统软件、定位系统测试软件，和海面目标定位方法的验证。其中定位系统软件、定位系统测试软件主要介绍了软件功能、软件界面，以及一种时间匹配方法；海面目标定位方法的验证包括海面目标定位算法验证、标定安装角对定位精度提升的验证、卡尔曼滤波对定位精度提升的验证以及海面目标定位精度分布。实验结果表明，本文提出的海面目标定位算法，相比与其他算法，精度更高；本文提出的海面目标定位方法，在完成定位精度提升后，当满足定位平台高度在 150m 以上时，对于 3km 以内的目标，定位误差在 5% 以内。

## 结 论

为了能够快速准确的获得海面遇险目标的位置,本文围绕海面目标定位方法进行了深入研究,提出了一种海面目标定位方法。在由光电吊舱和惯性导航组成的定位平台上,设计了一种海面目标定位算法,然后分析海面目标定位精度的影响因素,并通过补偿安装角和卡尔曼滤波两种方法提升定位精度,最后通过实验验证了本文提出的海面目标定位方法的有效性。

基于相机成像原理和地球椭球模型,以光电吊舱和惯性导航的组成的定位平台为硬件,建立了海面目标定位算法,通过相机坐标系、东北天坐标系、大地坐标系、地心坐标系等坐标系的相互转换,实现由遇险目标在红外图像中的像素位置到海面遇险目标的经纬高的推导。

为了定位精度的提升,对定位中产生的误差展开了分析,包括海面目标定位中的误差影响因素和参数误差对定位精度的影响两部分。其中误差影响因素包括地球椭球误差、定位平台安装角、光轴姿态角的随机误差。结合实验数据计算出一组测量参数真实值,分析了定位平台经纬高误差、光轴姿态角误差、目标像素误差对定位精度的影响。

以对定位中产生的误差的分析为基础,设计了两种方法提升定位精度,分别为补偿安装角和卡尔曼滤波。为了补偿安装角,首先对安装角进行标定,然后带入定位算法中以补偿安装角。设计了一种通过目标实际地理位置、目标像素坐标、定位平台参数对定位平台中吊舱、惯导之间安装角度进行标定的方法,这种方法选择的目标点越多,标定精度越高。通过实验证明了补偿安装角可以提升定位精度。建立卡尔曼滤波模型以消除光轴姿态角的随机误差,从而提升定位精度。为了满足不同场景下对滤波参数的自动调整,基于本文海面定位方法在传统卡尔曼滤波模型的基础上对噪声模型进行了自适应调整。通过实验证明了对光轴姿态角进行卡尔曼滤波可以提升定位精度。

通过定位软件实现海面目标的定位,并实验验证本文提出的海面目标定位算法的精度。本文设计的定位软件包含选择数据集、时间匹配等功能。同时设计了定位测试软件,除了目标定位外,包括标定安装角、分析误差对定位精度的影响等功能。通过多组实验,验证了本文提出的海面目标定位算法相比于其他同类型算法的精度更高,本文提出的补偿安装角和卡尔曼滤波两种方法均可提高定位精度。实验结果表明,在完成安装角补偿和随机误差滤除后,对于3千米以内的目标,当满足定位平台高度在150米以上时,海面目标定位方法误差在5%以内。

## 参考文献

- [1] 何树钦,董霏.海运物流发展现状及路径分析[J].珠江水运,2021(23):20-21.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2021.23.008.
- [2] 邵筱童.国家主管机关的海难救助与海上搜救行为探析[J].中国海事,2022(12):57-61.DOI:10.16831/j.cnki.issn1673-2278.2022.12.017.
- [3] 王晶,杨立保,高利民.机载光电平台目标定位测量技术[J].长春理工大学学报(自然科学版),2009,32(04):531-534.
- [4] 徐诚,黄大庆.无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2265-2270.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2013.10.016.
- [5] 展凤江,沈宏海,汪沛,张才文.导航信息滞后补偿实现高速无人机对地精确定位[J].光学精密工程,2015,23(09):2506-2512.
- [6] 孙辉,李志强,张建华,韩松伟,宋玉龙.机载光电平台目标交会定位[J].中国光学,2015,8(06):988-996.
- [7] 孙超,都基焱,段连飞.一种空间两点交会无人机定位方法[J].兵工自动化,2011,30(06):35-36+42.
- [8] Hu T. Double UAV cooperative localization and remote location error analysis[C]//5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering. Atlantis Press, 2015: 76-81.
- [9] 左羽佳,白冠冰,刘晶红,宋悦铭,孙明超.基于机载光电平台的双机交会定位方法[J].光子学报,2017,46(09):146-156.
- [10] Bai G, Liu J, Song Y, et al. Two-UAV intersection localization system based on the airborne optoelectronic platform[J]. Sensors, 2017, 17(1): 98.
- [11] Gao F, Ma X, Gu J, et al. An active target localization with monocular vision[C]//11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). IEEE, 2014: 1381-1386.
- [12] Hosseinpour H R, Samadzadegan F, Dadras Javan F. PRICISE TARGET GEOLOCATION AND TRACKING BASED ON UAV VIDEO IMAGERY[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2016, 41.
- [13] Hosseinpour H R, Samadzadegan F, Dadras Javan F. Pricise target geolocation based on integration of thermal video imagery and rtk GPS in UAVS[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40: 333-338.
- [14] Stevens P M. Guided growth for angular correction: a preliminary series using a tension band plate[J]. Journal of Pediatric Orthopaedics, 2007, 27(3): 253-259.
- [15] 杜言鲁,丁亚林,许永森,等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328003.
- [16] 王智,金光,张立平. 远距离目标位置解算方法的实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 215-218.
- [17] Zhang X, Yuan G, Zhang H, et al. Precise Target Geo-Location of Long-Range Oblique Reconnaissance System for UAVs[J]. Sensors, 2022, 22(5): 1903.
- [18] 刘晶红,沈宏海,孙树红,等. 机载光电成像平台的目标自主定位[J]. 光机电信息, 2008 (1): 24-28.

- [19] Qiao C, Ding Y, Xu Y, et al. Ground target geolocation based on digital elevation model for airborne wide-area reconnaissance system[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(1): 016004-016004.
- [20] 董丽丽, 徐士婷, 许文海. 基于机载光电平台的海面目标定位方法[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(02):80-88.DOI:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2020.02.010.
- [21] Stich E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance[C]//2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST). IEEE, 2013: 136-140.
- [22] Zhao W B, Chen W, Zheng G Z, et al. Study on UAV video reconnaissance based adaptively tracking algorithm for the ground moving target[C]//Advanced Intelligent Computing: 7th International Conference, ICIC 2011, Zhengzhou, China, August 11-14, 2011. Revised Selected Papers 7. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 282-289.
- [23] 徐士婷. 基于机载光电平台的海面目标定位精度研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.DOI:10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000384.
- [24] Liu C, Liu J, Song Y, et al. A novel system for correction of relative angular displacement between airborne platform and UAV in target localization[J]. Sensors, 2017, 17(3): 510.
- [25] Wang X, Liu J, Zhou Q. Real-time multi-target localization from unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2016, 17(1): 33.
- [26] Tan L, DAI M, LIU J, et al. Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device[J]. Opt. Precis. Eng, 2013, 21: 3133-3140.
- [27] 于永军, 张翔, 王新志, 等. 运动加速度在线估计的非线性惯性航姿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 41(6): 19-26.
- [28] 赵博, 张曰义, 徐源鸿, 等. 基于差分滤波的非线性估计及校正方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44: 1-8.
- [29] Grewal M S, Henderson V D, Miyasako R S. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems[C]//29th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1990: 3325-3334.
- [30] Dmitriyev S P, Stepanov O A, Shepel S V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 260-272.
- [31] Redding J D, McLain T W, Beard R W, et al. Vision-based target localization from a fixed-wing miniature air vehicle[C]//2006 American Control Conference. IEEE, 2006: 6 pp.
- [32] Wang I, Dobrokhodov V, Kaminer I, et al. On vision-based target tracking and range estimation for small UAVs[C]//AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit. 2005: 6401.
- [33] 郭业才, 刘程. 基于检测器与定位器融合的自适应校正跟踪算法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 709.
- [34] Han K, DeSouza G N. Multiple targets geolocation using SIFT and stereo vision on airborne video sequences[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009: 5327-5332.
- [35] Conte G, Doherty P. An integrated UAV navigation system based on aerial image matching[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2008: 1-10.
- [36] Schultz H J, Hanson A R, Riseman E M, et al. System for real-time generation of georeferenced terrain models[C]//Enabling Technologies for Law Enforcement and Security. SPIE, 2001, 4232: 29-

- 36.
- [37] Campbell M E, Whitacre W W. Cooperative tracking using vision measurements on seascan UAVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 613-626.
  - [38] Dai X, Ke C, Quan Q, et al. RFLySim: Automatic test platform for UAV autopilot systems with FPGA-based hardware-in-the-loop simulations[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 114: 106727.
  - [39] Li J, Zhang S, Yang H, et al. A Fast Continuous Self-Calibration Method for FOG Rotational Inertial Navigation System Based on Invariant Extended Kalman Filter[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 23(3): 2456-2469.
  - [40] Wei X, Li J, Han D, et al. An In-Flight Alignment Method for Global Positioning System-Assisted Low Cost Strapdown Inertial Navigation System in Flight Body with Short-Endurance and High-Speed Rotation[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 711.
  - [41] Sohn S, Lee B, Kim J, et al. Vision-based real-time target localization for single-antenna GPS-guided UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1391-1401.
  - [42] Minaeian S, Liu J, Son Y J. Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs[J]. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2015, 46(7): 1005-1016.
  - [43] Wewel F, Scholten F, Gwinner K. High resolution stereo camera (HRSC)-multispectral 3D-data acquisition and photogrammetric data processing[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(5): 466-474.
  - [44] Regmi K, Shah M. Bridging the domain gap for ground-to-aerial image matching[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019: 470-479.
  - [45] Zhang J, Chen S, Ning P, et al. An equidistance/equiratio method of maritime delimitation on the Earth ellipsoid[J]. Journal of Sea Research, 2023, 191: 102322.
  - [46] 韦进, 申重阳, 胡敏章, 等. 连续重力观测站测定的中国大陆潮汐因子空间分布特征[J]. 地球科学进展, 2021, 36(5): 490.
  - [47] 卢军治. 中国沿海海平面异常特征关系分析[D]. 中国海洋大学, 2003.
  - [48] 郭金运, 金鑫, 边少锋, 等. 垂线偏差测量的固体潮和海潮改正[J]. Cehui Xuebao, 2022, 51(7): 1215.
  - [49] Slobbe C, Klees R, Farahani H H, et al. The Impact of Noise in a GRACE/GOCE Global Gravity Model on a Local Quasi - Geoid[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(3): 3219-3237.
  - [50] 李建, 李小民, 钱克昌. 基于双目视觉和惯性器件的微型无人机运动状态估计方法 [J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2310-2317
  - [51] 李浩雪. 几种特殊矩阵方程解法与算法研究 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022. DOI:10.27752/d.cnki.gsjzj.2022.000841.
  - [52] 孙辉. 机载光电载荷对地目标定位技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022. DOI:10.27522/d.cnki.gkcg.2022.000035.
  - [53] 陈建营, 张献州, 陈霄, 夏晨翕, 罗超. 稳健估计下转换参数系数矩阵定向改正的整体最小二



- 乘[J].测绘与空间地理信息, 2021, 44(04):185-188.
- [54]黄小平, 王岩.卡尔曼滤波原理及应用-MATLAB 仿真[M].北京: 电子工业出版社, 2015.
- [55]唐英杰, 董月军, 任宏亮, 卢瑾, 覃亚丽, 郭淑琴, 胡卫生.基于时频域卡尔曼滤波的 CO-OFDM 系统相位噪声补偿算法[J].光学学报, 2017, 37(09):47-58.
- [56]秦永元, 张洪钺, 汪叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].2 版.西安: 西北工业大学出版社, 2012:198-212
- [57]张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社, 2002.
- [58]房建成, 申功勋, 万德钧. GPS 动态定位中卡尔曼滤波模型的建立及其强跟踪算法研究 [J]. 控制与决策, 1997, 12(6): 683-689
- [59]曾洁, 尤国红, 贾士杰, 等. 基于卡尔曼滤波的车辆动态导航定位滤波算法 [J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(2): 42-45
- [60]韩忠民.知经纬度计算两点精确距离[J].科技传播, 2011(11):196+174.
- [61]刘力荣, 李菡.GPS 坐标与方向、距离相互转换的计算公式推导[J].南方农机, 2018, 49(14):106.