

基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人 灯塔距离测绘技术

覃学宁, 钟 辉, 岳志伟, 何瑞冠, 冷 泉, 李 飞

(交通运输部南海航海保障中心 三沙航标处, 海口 570000)

摘要: 灯塔在目前仍然发挥着重大作用, 可以在导航和定位过程中提供重要的参考信息; 传统方法通常采用无人机导航, 但受多路径以及动态环境的干扰, 导航误差较大; 为精准灯塔的工作范围, 提出基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术; 采用捷联式惯性导航重构惯性轨迹, 对空中机器人惯性导航; 采集灯塔灯光距离测绘数据, 构建基于贝叶斯推理的多线索视觉注意模型, 获取灯塔距离显著图, 搭建航拍摄像头成像模型, 计算灯塔灯光照射距离; 测试结果表明, 该技术平均导航误差最终仅为 0.132 mm, 且测绘时间较短, 通过多次测试后平均灯塔灯光距离测绘误差仅为 27.41 cm, 整体测绘误差小。

关键词: 轨迹重构; 惯性导航; 贝叶斯推理; 空中机器人; 灯塔距离测绘

Distance Measurement Technology for Aerial Robot Lighthouses Based on Trajectory Reconstruction and Bayesian Inference

QIN Xuening, ZHONG Hui, YUE Zhiwei, HE Ruiguan, LENG Quan, LI Fei

(Sansha Navigation Center Ministry of Transport, Haikou 570000, China)

Abstract: Lighthouses still play an important role today, providing important reference information during navigation and positioning. The traditional method usually uses UAV navigation, but due to the interference of multi-path and dynamic environment, the navigation error is large. An aerial robot lighthouse distance mapping technique based on trajectory reconstruction and Bayesian inference is proposed for accurate lighthouse working range. The inertial trajectory is reconstructed by strapdown inertial navigation to inertial navigation of aerial robot. The light distance mapping data of the lighthouse was collected, a multi-cue visual attention model based on Bayesian inference was constructed, the significant map of the lighthouse distance was obtained, the imaging model of the aerial camera was built, and the illumination distance of the lighthouse light was calculated. The test results show that the average navigation error of this technology is only 0.132 mm, and the mapping time is short. After multiple tests, the average mapping error of lighthouse light distance is only 27.41 cm, and the overall mapping error is small.

Keywords: trajectory reconstruction; inertial navigation; Bayesian inference; aerial robots; lighthouse distance mapping

0 引言

灯塔通常建立在海岸线、河口、礁石等海洋或水域附近, 用于引导船只、飞行器 etc 交通工具安全导航, 其通过提供准确的导航和定位信息, 帮助飞行员和驾驶员安全地导航, 减少事故风险。随着科技的快速发展和空中机器人领域的迅猛崛起, 空中机器人在各个领域得到了广泛的应用。其中, 灯塔距离测绘技术作为一项关键技术, 在许多应用领域具有重要意义。无论是在海上航行、沿海巡逻还是灯塔维护等任务中^[1], 准确测量和估计灯塔与测量平台之间的距离都至关重要。然而, 传统的灯塔距离测绘方法存在一些局限性和挑战。例如, 传统方法采用的激光测距仪或其他测距装置往往需要在近距离进行操作, 并且对于

灯塔的位置和姿态等信息的要求较高。而在实际应用中, 由于环境复杂性和外部干扰等因素, 这些传统测量方法可能无法满足高精度距离测绘的需求。除此之外, 传统的灯塔距离测绘方法在时间消耗和人力投入方面也存在一定的限制。由于测量设备通常需要与测量平台靠近甚至接触, 这就需要额外的时间和人力资源来完成任务。对于海上航行、沿海巡逻等需要频繁测量灯塔距离的任务来说, 传统方法可能无法满足高效和快速的要求。此外, 由于海洋环境复杂多变, 如波浪、潮汐等因素的影响, 传统方法可能会受到干扰和误差的影响, 进而影响测距的准确性^[2]。因此, 随着空中机器人在测绘领域的深入应用, 应用空中机器人实施灯塔距离测绘成为一个研究热点。基于该背景对空中机器人灯塔距离测绘技术进行研究。

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2023-12-22。

作者简介: 覃学宁(1970-), 男, 大学本科, 高级工程师。

通讯作者: 钟 辉(1983-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 覃学宁, 钟 辉, 岳志伟, 等. 基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 291-297.

空中机器人已经被广泛应用于导航技术、数据通信技术、自动控制技术、微电子技术等诸多领域，并由军用领域成功实现了面向民用领域的应用延伸，提升了多个领域的技术应用水平。通过测绘技术与空中机器人技术结合，诞生了数字摄影测绘技术，实现了自动化、智能化地摄影测量，提升了整体的测绘技术水平。这种技术的出现，也实现了传统测量仪器与摄影器材功能上的信息化转变，降低了人工测绘的难度及工作量，大幅提升了摄影测绘的效果和效率水平，为相关领域的技术发展打下了基础。吴亮等人^[3]提出一种基于无人机多光谱测绘的输电线路树障通道修缮工程面积计算方法，利用无人机搭载相机，获得树障砍伐前后完整的待识别线路通道的 RGB 和多光谱图像，并对其处理获得树障区域，提升了树木砍伐区的获取效率。王武生等人^[4]提出一种基于无人机倾斜摄影与实景三维建模的工程土石方量审计方法，利用低空无人机遥感技术，获取了高精度的道路工程审计影像、地形信息。张琪曼^[5]提出一种基于无人机多光谱影像的土地利用分类方法，通过无人机实现了土地利用分类中的测绘，分类的 Kappa 系数与总体精度都较高。以上方法应用于空中机器人灯塔距离测绘中时，存在无人机导航误差较大，需要花费较多测绘时间以及距离测绘误差较大等问题。

为了有效解决上述方法存在的问题，设计一种基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术。该方法通过设计基于捷联式惯性导航系统的惯性轨迹重构技术，可以实现对空中机器人的精确导航，提高灯塔距离测绘的准确性。为了解决传统的视觉测绘方法只依赖于图片中的颜色、纹理等特征进行处理，无法充分利用图像中的各种线索的问题，引入贝叶斯推理的多线索视觉注意模型，将图像中的多种重要线索（如灯塔的形状、位置等）进行整合和处理，提高测绘结果的准确性。使用千巡翼 Q10 空中机器人飞行平台提高了灯塔距离测绘的可靠性和效率。

1 空中机器人灯塔距离测绘技术设计

1.1 空中机器人惯性式轨迹重构

为了实现更加精准的灯塔距离测绘，设计一种基于捷联式惯性导航系统的惯性轨迹重构技术，实现空中机器人灯塔距离测绘中的惯性导航。空中机器人惯性式轨迹重构的具体执行步骤如下：

1.1.1 信号预处理

对加速度数据与陀螺仪数据实施信号预处理，包括校正原始信号零值误差与实施随机噪声的滤波。

其中校正原始信号零值误差采用的方法为零偏值动态补偿方法，具体执行步骤如下：

1) 等待更新周期 t ，该值为一个设定值，设置太小会使计算机负担加重，而设置太大会影响陀螺仪的零偏补偿精度，将其设置为一分钟以兼顾二者^[6]。

2) 确认是否为平稳信号，当其为平稳信号，实施零偏

补偿值的更新，结束补偿；当其为非平稳信号，返回步骤 1。

其中零偏补偿值的获取主要通过构建 MEMS 陀螺仪的数学模型，并通过实验的方式求出模型中的误差因数，获得陀螺仪的静态误差来实现^[7]。

构建的 MEMS 陀螺仪模型具体如下式所示：

$$\gamma = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x & C_{yx} & C_{zx} \\ C_{xy} & B_y & C_{zy} \\ C_{xz} & C_{yz} & B_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & C_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{z2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ z_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， A_x, A_y, A_z 指的是传感器测得的三轴的对应角速率； a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} 指的是陀螺仪各轴的零偏即零值偏移量； B_x, B_y, B_z 是指加速度传感器各轴对应的刻度因数； C_{yx} 与 C_{zx}, C_{xy} 与 C_{zy}, C_{xz} 与 C_{yz} 分别为三轴的耦合误差因数； C_{x2}, C_{y2}, C_{z2} 指的是三轴和加速度二次相关的误差因数^[8]； a_x, a_y, a_z 是指陀螺仪各轴的偏移因数； z_x, z_y, z_z 是指随机误差。

在随机噪声的滤波处理中，选用的滤波器为改进后的启发式漂移消减法滤波器，主要是对启发式漂移消减法滤波器的阈值函数进行改进。

改进后的阈值函数如下式所示：

$$E_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\chi_{i-1}|}{\|\gamma\| \delta_w}\right)^q & \chi_{i-1} \leq \delta_w \\ 0 & \chi_{i-1} > \delta_w \end{cases} \quad (2)$$

式中， q 指的是设定的衰减因子，其值大于等于 1； δ_w 是指设定的阈值； χ_{i-1} 是指去噪前的输出信号。

根据改进后的阈值函数计算去噪因子，具体公式如下：

$$J_i = E_i \text{sign}(\chi_{i-1}) j_b \quad (3)$$

式中， $\text{sign}(\cdot)$ 是指取符号函数^[9]； j_b 指的是设定的增量。

依据去噪因子 J_i 获取去噪后的输出信号，具体如下式所示：

$$r_i = \chi_{i-1} \cdot J_i \cdot \varphi_d \quad (4)$$

式中， φ_d 是指跟随性因子。

在改进后的启发式漂移消减法滤波器中， δ_w 与 q 是较为关键的参数，其中 q 值与改进滤波器的收敛速度相关，取值越大收敛速度越快； δ_w 值能够决定改进滤波器的作用范围，取值越大作用范围越大。

1.1.2 姿态推算

利用预处理后的陀螺仪数据与当前的姿态实施姿态推算，即实施姿态更新，获取当前时间点的对应运动姿态。

设计一种姿态更新算法，具体步骤如下：

1) 姿态信息是通过加速度数据计算和估计的。然而，实际采集到的加速度数据会包含一些由机器人的震动、传感器噪声等原因导致的高频噪声或干扰信号，导致姿态估计的误差增大。通过采用低通滤波器对加速度数据滤波处理，可以削弱高频噪声或干扰信号的影响。低通滤波器能

够让较低频率的成分通过并降低高频噪声的干扰, 提高加速度数据的质量, 并得到更准确的姿态计算结果。对加速度数据实施低通滤波处理并计算其姿态。

2) 对加速度数据实施初始姿态计算, 结合陀螺仪数据, 通过三样子等效旋转矢量法实施姿态矩阵的更新^[10]。

其中初始姿态计算的步骤具体如下:

(1) 对于载体坐标系, 用 X', Y', Z' 表示其 3 个坐标轴, 用表示 G 重力矢量, 则 3 个坐标轴 X', Y', Z' 与重力矢量 G 之间共存在 3 个夹角 η, ι, κ 。3 个夹角的表达式具体如下式:

$$\begin{cases} \eta = \arccos \frac{G_x}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \\ \iota = \arccos \frac{G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \\ \kappa = \arccos \frac{G_z}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \\ \mathbf{G} = r_i \sqrt{\eta G_x^2 + \iota G_y^2 + \kappa G_z^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, G_x, G_y, G_z 指的是 3 个坐标轴上重力的分量^[11]。

(2) 根据欧拉角关系式获取横滚角 λ 、俯仰角 μ 与三个夹角 η, ι, κ 之间的关系式如下:

$$\begin{cases} \lambda = \arctan[\sin(\mu)/\cos(\mu)] \\ \mu = \arctan(\tan\eta)/\cos(\eta) \\ \eta = \arccos[\cos(\lambda) \cdot \cos(\mu) + \sin(\iota) \cdot \sin(\lambda) \cdot \cos(\kappa)] \end{cases} \quad (6)$$

(3) 根据该关系式与 3 个夹角 η, ι, κ 的表达式获取初始姿态的横滚角与俯仰角。

在研究中, 将初始航向角设为 0, 这是由于在研究中计算的是相对轨迹, 因此航向角的初始值不影响研究中的轨迹重构。获取初始姿态的横滚角与俯仰角后即可确定等效旋转矢量法中需要应用的初始四元数。

(4) 通过互补滤波算法融合两种结果, 获取最终运动姿态。

1.1.3 坐标转换

对于预处理后的加速度数据与姿态推算结果, 利用其实施坐标转换。也就是对载体坐标系下的信号实施转换, 将其转换至地理坐标系下, 实现空间上的变换。

1.1.4 重力场补偿

依据姿态更新结果对转换坐标后的加速度数据实施重力场补偿。这是由于地球自转产生的离心力与地球引力会形成合力, 因此加速度传感器中是含有重力作用的, 只有去除重力信号, 才能获得所需信号, 也就是相对运动带来的加速度信号, 因此需要实施重力场补偿。

首先将信号转换至地理坐标系下, 接着实施重力加速度的补偿。基本算法具体如下式:

$$\vec{m} = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \mathbf{K}_f^m \vec{f} = \mathbf{K}_f^m \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, \vec{m} 指的是地理坐标系下获取的加速度值; X_m, Y_m, Z_m

是指 \vec{m} 下的坐标值; \mathbf{K}_f^m 是指姿态转换矩阵即姿态更新结果; \vec{f} 指的是传感器输出的信号, 也就是载体坐标系下的对应加速度值; \mathbf{K}_f^m 是指 \mathbf{K}_f^m 的坐标值; X_f, Y_f, Z_f 指的是 \vec{f} 下的坐标值^[12]。

$$\vec{u} = \vec{m} - \vec{G} \quad (8)$$

式中, \vec{u} 是指去除重力加速度后由相对运动带来的加速度值; \vec{G} 指的是重力矢量。

1.1.5 运动加速度滤波

通过运动加速度滤波提取运动带来的加速度信号, 并以特定的应用场景为依据实施滤波处理, 使信号被还原至运动产生的加速度值。其中对加速度实施滤波处理主要是为了去除运动噪声和重力补偿的计算误差。采取的滤波方法为卡尔曼滤波, 具体流程如下:

1) 选择初始四元数。选择零姿态四元数, 使用其对应的卡尔曼滤波^[13]框架, 具体如下式所示:

$$p_0 = \vec{u}[1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (9)$$

式中, t 指的是系统状态协方差阈值。

在开始运行滤波算法时, 还要水平放置传感器, 并选用对 p_0 信任度较高的系统状态协方差作为滤波初始值。

2) 四元数归一化。为避免俯仰角曲线迅速发散, 利用列矩阵实施四元数归一化处理。

1.1.6 积分环节

积分环节决定了重构轨迹的精度, 采取的是梯形积分法。在轨迹重构中, 梯形积分法根据滤波数据计算出连续轨迹的位置和速度信息, 从而实现对空中机器人的精确导航。梯形积分法的基本思想是将积分区间划分成多个小区间, 然后通过线性插值以梯形的形式来近似每个小区间内的曲线。具体步骤如下:

1) 根据滤波数据, 确定轨迹重构的起始点和终止点, 确定整个积分区间。

2) 将整个积分区间均匀或不均匀地划分成多个小区间, 每个小区间对应一个测量数据点。

3) 通过线性插值计算出该小区间的两个端点的位置和速度, 然后使用梯形面积公式进行近似计算。

4) 将所有小区间的梯形面积进行累加, 得到最终的轨迹重构结果。

1.2 灯塔距离测绘影像数据获取

轨迹重构技术保证了空中机器人航行的准确性和稳定性, 避免了位置偏差和姿态不稳定等问题, 从而为灯塔距离测绘提供了可靠的导航与定位支持。采用空中机器人为千巡翼 Q10 复合翼空中机器人飞行平台, 利用基于捷联式惯性导航系统的惯性轨迹重构技术对其实施灯塔距离测绘中的惯性导航, 采集灯塔灯光距离测绘数据, 实施灯塔距离测绘。

在空中机器人上搭载的相机为索尼 a7R2 单镜头相机。相比其他工程经常使用的空中机器人, 其输出功率更高, 电池容量更大, 单次飞行时间较长, 在飞行稳定性、巡航

时间、巡航速度等均有着更大优势,很适合应用于灯塔距离测绘。采用的空中机器人的详细参数如表 1 所示。

表 1 采用的空中机器人的详细参数

序号	指标	参数
1	最大起飞重量/kg	12
2	最大飞行时间/min	110
3	续航里程/km	135
4	巡航速度/(km/h)	75

灯塔距离测绘影像数据获取的具体步骤如下:

1) 现场勘测:

为保障空中机器人航测时的飞行安全,飞行前必须了解测区基本情况,如港口内障碍物位置等,以确保能够安全飞行^[14]。在规划空中机器人的航线时,以影像分辨率要求和障碍物情况等为依据定义合适的航高。在勘探现场时,选取方便空中机器人起降的场地,将起降场地定为同一地点,所选取的场地必须满足周围空旷、无超高障碍物的条件。为避免飞行受到干扰,还需要留意高压线塔等地物。

2) 像控点布设和测量:

布设像控点是空中三角测量的坐标定位基础,便于定义机场坐标系,也便于检测摄影测量精度。在布设时,要保证像控点在测区内分布较为均匀。由于港口地形较为复杂,必须布设较多的像控点。在地表喷涂标志作为像控点,具体如图 1 所示。



图 1 像控点示意图

通过 RTK 实施像控点坐标测量,使用的 RTK 测量系统由数据传输系统、GPS 接收设备、软件系统构成。其中 GPS 接收设备由用户站接收机与发射台构成,是实时动态测量的最关键设备^[15]。基准站发射台需要设置在坐标已知、视野开阔、测区地势较高的点上。

3) 航线规划:

测量范围为近海岸与港口处,首先确定空中机器人的飞行航高、旁向重叠率、航向重叠率,以保障数据采集精度。

使用航线规划软件,依据导入的重叠率、航高、测区红线范围等参数对空中机器人飞行航线进行自动计算。

由于选取的空中机器人为固定翼,其转弯半径较大,为

确保空中机器人飞行安全,需要保证转弯半径大于 100 m,同时确保转向角为直角,并对转向角过小、长度过短的航线进行调整,保障航线规划安全、正确。

4) 数据检查与预处理:

对于空中机器人摄影测量所获取的 POS 数据与相片,需要检测数据,包括 POS 数据信息与相片成像质量,具体来说,对空中机器人所处的姿态信息进行查看,并检测相片是否由于飞机颠簸而出现成像模糊问题,将不合格测量数据直接删除。

采用的空中机器人影像数据预处理软件为 PIX4D mapper,作为业界著名数据处理平台,该软件具有强大的处理速度与处理能力。对获取数据实施影像配准与拼接处理^[16]。

1.3 灯塔距离测绘显著图获取与距离计算

根据获取的灯塔距离测绘影像数据,提取出用于灯塔距离测绘的相关特征和信息。在实际环境中,由于灯塔周围会存在其他光源或干扰物,从而干扰灯塔信号的检测和识别。多线索视觉注意模型可以将关注点集中在具有显著性、重要性的目标上,从而抑制背景干扰,提高灯塔信号的提取和测绘精度。因此,利用基于贝叶斯推理的多线索视觉注意模型获取灯塔距离测绘显著图,以提高灯塔距离测绘的空间定位精度。灯塔显著图是对影像中的灯塔目标进行突出显示,通过这些显著图以及灯塔已知信息,在采集的影像数据上进行距离计算,可以得到灯塔与相机的距离信息。

该多线索视觉注意模型由两部分构成,第一个部分是多线索获取子模型,第二个部分是贝叶斯网络子模型。在多线索获取子模型中,共考虑 3 方面的视觉线索,包括上下文线索、颜色线索以及形状线索,并添加特征的偏置。其中颜色线索与形状线索作为物体的直接构成线索,提供了自底向上的信息,而上下文线索和空间位置相关,提供了空间位置由上到下的信息,添加的特征偏置部分则提供了基于特征的由上到下的信息^[17]。在多线索获取子模型中,采用的是大脑并行处理多种视觉线索的策略,在单个线索的处理中,采用的大脑处理策略为串行处理策略。

其中各种线索的获取与其视皮层对照情况如图 2 所示。

在图 2 中,实线部分表示腹侧通路的信息处理,具体包括 FEF 区以及大脑中的 V1 到 V4 区,而虚线部分则是背侧通路的信息处理,具体包括顶内沟外侧区。背侧通路与腹侧通路并行对输入图像进行处理。

利用多线索视觉注意模型获取灯塔距离测绘显著图的具体过程如下:

1) 从空中机器人拍摄的图像中提取特征,包括颜色、纹理、边缘等信息。图 2 中的各视觉通路分别负责对不同的视觉线索实施处理,其中腹侧通路是对 V1 到 V4 区中视觉信息传递的步骤进行模拟,主要负责处理颜色线索与形状线索,获取颜色特征图与形状特征图,构成了自底向上的 V4 区信息。背侧通路模拟的是大脑的顶内沟外侧区,负

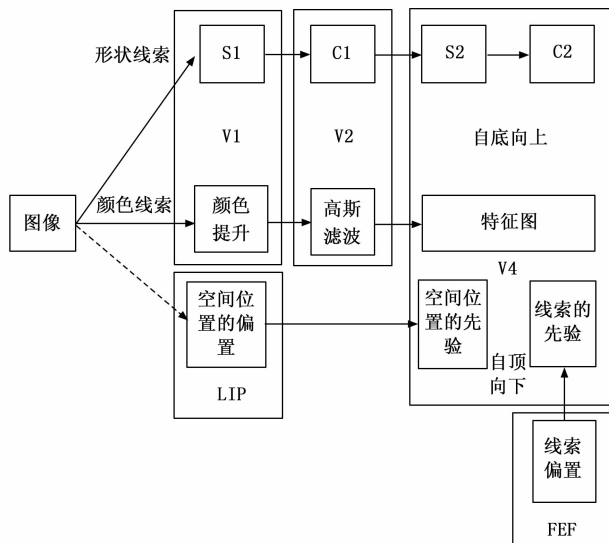


图 2 各种线索的获取与其视皮层对照情况

责获取目标环境的上下文线索, 从而产生基于空间位置的先验, 组成自顶向下的 V4 区信息^[18]。

2) 获取颜色特征图与形状特征图。在经过了多线索获取子模型后, 得到了空间位置上的先验知识、颜色特征图与形状特征图, 其中前者属于自顶向下的信息, 而颜色特征图与形状特征图均属于自底向上的信息。

3) 将获取的不同特征图结果融合处理。集成自顶向下信息与自底向上信息, 引入多种视觉线索, 并考虑线索间的相互关系。采用非线性组合的方式, 将不同特征的加权结果相加或者相乘, 并将第一部分的输入作为该子模型的输入。

4) 应用视觉注意机制, 确定灯塔位置的显著性区域。将灯塔位置标注为显著性区域, 并输出最终的灯塔距离测绘的显著图。

在贝叶斯网络子模型中, 采用的计算模型是针对各种视觉线索的集成了 Top-down 与 Bottom-up 的贝叶斯推理模型, 其推导流程具体如下:

对于图像 R , 使用 U 表示其场景的描述子, 如存在哪些目标、场景类别、场景类别等, 则能够用 U 来描述图像 R , 具体如下式:

$$U \rightarrow R \quad (10)$$

使用场景描述的条件概率 $P(R | U)$ 与先验概率 $P(U)$ 来表示上式, 具体如下:

$$P(U | R) = P(U)P(R | U) \quad (11)$$

由于可以用目标及其位置对场景实施描述, 假设共有 i 个目标 (包括背景) 用下式来表示:

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i\} \quad (12)$$

式中, V_i 指第 i 个目标^[19]。

各目标的对应位置用下式来表示:

$$\zeta = V\{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_i\} \quad (13)$$

式中, ζ_i 指第 i 个目标的对应位置。

则可以式 (11) 与式 (12) 表示场景描述子。可以看到, 其中含有很多变量, 因此有着很高的联合概率计算复杂度, 因此通过下列假设对其实施分解与简化:

- 1) 视觉系统每次仅选择一个目标;
- 2) 目标自身与其出现的位置是互相独立的;
- 3) 给定目标后, 各种视觉线索是互相独立的; 给定位置和线索后, 此种线索的特征之间是条件独立的。

根据上述假设与式 (10) 即可获取最终的概率模型。并设置该概率模型的条件概率相关参数。其中与目标相关的线索和目标之间的条件概率由样本训练获得, 将图像和第 i 种线索中第 j 个特征位置 (特征图) 之间的条件概率设置为特征图的正比。

完成贝叶斯网络结构的构建和网络参数的设置后, 需要对推理所需的证据实施设置。证据具体包括两部分, 第一个部分为先验概率, 其值决定了视觉注意机制。将两个需要设置的先验概率设置为等概率, 表明没有任何偏向。第二个部分为输入图像, 该部分的获取与意识和任务无关, 因此不额外对其实施设置。

完成以上设置后, 对后验概率进行求取, 获取灯塔距离测绘中的视觉注意显著图。根据该视觉注意显著图中灯光照射长度获取灯塔灯光照射距离。

搭建灯塔距离测绘中的航拍摄像机成像模型计算灯塔灯光照射距离, 也就是在该视觉注意显著图上标记摄像机拍摄位置, 用 α 表示, 将照射尽头 v 与 α 连成一条直线, 用 o 表示二者之间的距离, 该直线与灯塔处 ξ 形成的夹角用 ψ 来表示。 $v-\xi$ 与 $\alpha-\xi$ 这两条直线之间的夹角用 ω 来表示。并分别用 w_a, w_b 表示 ξ 与 α, v 的距离。将 ξ 与 $\alpha-v$ 之间的垂直距离用 y 来表示^[20]。

则 y 与 w_b 满足下式:

$$y = \frac{P(R | U)w_a w_b \sin\psi}{o} = \frac{P(R | U)w_a w_b \sin\psi}{\sqrt{w_a^2 + w_b^2 - 2w_a w_b \cos\psi}} \quad (14)$$

其中: o 的计算公式具体如下:

$$o = \sqrt{w_a^2 + w_b^2 - 2w_a w_b \cos\psi} \quad (15)$$

并联以上两式求解 w_b , 完成空中机器人灯塔距离测绘。

2 测绘性能案例测试

2.1 实验过程

对于设计的基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术, 利用其实施某港口灯塔灯光距离测绘, 测试设计技术的测绘性能。实验港口有着优越的地理位置与自然条件, 同时有着广阔的腹地、先进的码头设施以及高效便捷的集疏运系统, 很早就搭建了航标灯塔。该航标灯塔是港口水道重要入口标志, 建筑的高度达到 30 m, 工程用地超过 1 500 000 m², 采用的是钢筋混凝土剪力墙结构。由于实验港口需要更换灯塔灯器, 因此利用设计技术

对其实施拉距测绘。其中港口像控点的布设情况如表 2 所示。

表 2 港口像控点的布设情况

像控点序号	布设位置	像控点序号	布设位置
①	灯塔正西向 100 m 处	⑥	灯塔正东向 300 m 处
②	灯塔正西向 200 m 处	⑦	灯塔正南向 100 m 处
③	灯塔正西向 300 m 处	⑧	灯塔正南向 200 m 处
④	灯塔正东向 100 m 处	⑨	灯塔正北向 100 m 处
⑤	灯塔正东向 200 m 处	⑩	灯塔正北向 200 m 处

选取夜晚天气晴朗的无风或微风时段,将该灯塔更换灯器后灯光初始距离作为其灯光射程实施拉距测绘。应用千巡翼 Q10 复合翼空中机器人飞行平台采集灯塔灯光距离测绘数据,将航高定为 200 m。并将旁向重叠率定为 70%,航向重叠率定为 80%,以保证数据采集精度,从而实施灯塔距离测绘。利用设计的基于捷联式惯性导航系统的惯性轨迹重构技术实施其测绘中的惯性导航。

通过基于贝叶斯推理的多线索视觉注意模型获取实验灯塔距离测绘显著图。根据该视觉注意显著图搭建灯塔距离测绘中的航拍摄像机成像模型,计算灯塔灯光照射距离,完成空中机器人灯塔距离测绘。

2.2 测试项目与对比设计方法选择

为了验证基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术的有效性,分别从设计技术的空中机器人导航误差、灯塔灯光距离测绘时间以及灯塔灯光距离测绘误差三个方向展开测试。将文献 [3] 基于无人机多光谱测绘的输电线路故障通道修缮工程面积计算方法(简称“方法 1”)、文献 [4] 基于无人机倾斜摄影与实景三维建模的工程土石方量审计方法(简称“方法 2”)以及文献 [5] 基于无人机多光谱影像的土地利用分类方法作为对比方法(简称“方法 3”),共同进行测绘性能测试。

2.3 测试结果分析

2.3.1 空中机器人导航精度测试

在对灯塔距离测绘过程中,由于在测试外部环境因素如气象条件(风速、气流等)、磁场干扰等也会对空中机器人导航产生影响,从而导致误差的产生。例如,强风力会导致空中机器人姿态不稳定或偏离目标轨迹,从而影响灯塔距离测绘的准确性。因此,为了验证设计技术的有效性,以空中机器人导航误差为评价指标,该项指标直接影响灯塔灯光距离测绘精度,是测绘技术的一项重要评价指标。设计技术与方法 1、方法 2、方法 3 的空中机器人导航误差测试结果如表 3 所示。

根据表 3 测试结果,设计技术在 12 次测试中,空中机器人平均导航误差最终仅为 0.132 mm,而方法 1、方法 2、方法 3 在 12 次测试中,空中机器人平均导航误差最终分别为 0.381、0.422、0.430 mm。说明设计技术的空中机器人导航误差较低,也就是空中机器人测绘中的导航精度较高。

表 3 空中机器人导航误差测试结果

测试次数	空中机器人平均导航误差/mm			
	方法 1	方法 2	方法 3	设计技术
2	0.355	0.454	0.475	0.120
4	0.396	0.412	0.412	0.168
5	0.358	0.396	0.384	0.114
8	0.355	0.415	0.408	0.126
10	0.368	0.420	0.421	0.124
12	0.381	0.422	0.430	0.132

这是因为设计技术采用捷联式惯性导航技术可以准确地重构空中机器人的惯性轨迹。通过这种重构,可以提供准确的位置和姿态信息作为导航基准,以降低导航误差,由此说明通过设计的基于捷联式惯性导航系统的惯性轨迹重构技术能够实现空中机器人测绘导航精度的提升,从而提升设计技术的灯塔灯光距离测绘精度。

2.3.2 灯塔灯光距离测绘时间测试

测试设计技术与方法 1、方法 2、方法 3 的灯塔灯光距离测绘花费时间,并同步测试传统人工方式的灯塔灯光距离测绘时间,以说明空中机器人测绘方法的优越性。灯塔灯光距离测绘花费时间测试结果如图 3 所示。

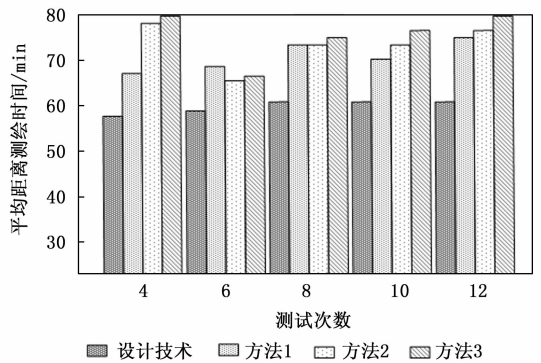


图 3 灯塔灯光距离测绘花费时间测试结果

根据图 3 结果可知,传统人工方式的灯塔灯光距离测绘时间为 6.5 h,而使用空中机器人实施距离测绘明显能够大幅降低灯塔灯光距离测绘时间,同时同步实现人力与物力的大量节省。在几种测试方法中,设计技术的平均灯塔灯光距离测绘时间最短,在多次测试中,仍然保持着较短的灯塔灯光距离测绘时间。而方法 1、方法 2、方法 3 的灯塔灯光距离测绘时间均长于设计技术,说明设计技术的测绘效率最高。因为设计技术采用了贝叶斯推理的多线索视觉注意模型,快速且准确地获取了灯塔距离的显著图。该模型结合了多种视觉线索(如颜色、纹理、形状等),能够高效地提取灯塔位置的显著信息,从而减少了图像处理和分析的时间和工作量,提高了测绘效率。

2.3.3 灯塔灯光距离测绘误差测试

空中机器人的飞行控制和导航系统存在误差,如惯性导航系统的漂移、飞行器的推力偏差等。这些误差会通过

飞行过程中的轨迹传播到灯塔距离测绘过程中, 引起测绘误差。将测试灯塔灯光距离设定为 300 cm, 测试设计技术与方法 1、方法 2、方法 3 的灯塔灯光距离测绘误差, 以最终证明设计技术的距离测绘性能。同样进行多次测试, 测试结果如表 4 所示。

表 4 灯塔灯光距离测绘误差测试结果

测试次数	平均灯塔灯光距离测绘误差/cm			
	方法 1	方法 2	方法 3	设计技术
2	153.20	121.52	86.30	22.63
4	165.30	132.30	84.10	25.30
5	171.32	130.58	89.32	24.86
8	168.32	134.25	91.23	27.21
10	159.32	130.69	90.41	26.85
12	164.52	136.52	91.78	27.41

根据表 4 测试结果, 设计技术多次测试后平均灯塔灯光距离测绘误差仅为 27.41 cm, 整体测绘误差较小, 而方法 1、方法 2、方法 3 多次测试后平均灯塔灯光距离测绘误差分别为 164.52、136.52、91.78 cm, 明显设计技术的灯塔灯光距离测绘精度更高。这是因为设计技术搭建了适用于空中机器人的航拍摄像机成像模型, 可以准确计算灯塔灯光的照射距离。通过合理的模型设计和参数调整, 可以获得更精确的照射距离, 从而减小了灯塔距离测绘误差。

3 结束语

灯塔作为港口码头一个重要的辅助建筑物受到了更多关注, 虽然灯塔只是建设区域中一个很小的构成部分, 其作用却十分重大。因此, 设计一种基于轨迹重构与贝叶斯推理的空中机器人灯塔距离测绘技术, 帮助确认灯塔工作范围, 以指导船舶的行驶。采用捷联式惯性导航技术, 对空中机器人实现了惯性轨迹的重构。通过准确重建机器人的运动轨迹, 提供了精确的位置和姿态信息, 为后续的距离测绘提供准确的基准。基于贝叶斯推理方法, 设计并构建了多线索视觉注意模型。该模型通过对采集的灯塔灯光距离测绘数据分析和融合, 获取了灯塔距离的显著图。设计并搭建了适用于空中机器人的航拍摄像机成像模型, 用于计算灯塔灯光照射距离, 能够更精确地计算灯塔灯光的照射距离。通过实验验证, 该技术可以实现空中机器人对灯塔距离的精准测绘。在该技术的研究中, 由于研究时间与精力的限制, 仍有一些问题还未完善, 例如, 在复杂环境中, 包括目标物体周围的遮挡物、反光和反射等因素可能导致测绘误差, 如何准确建模这些误差源, 并通过合适的算法进行校正, 是当前技术需要面临的挑战。

参考文献:

[1] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1:500 地形图测绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 840-844.
[2] 李逸斐, 陈静. 基于改进 RRT* 算法的城市低空路径规划

方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24 (3): 448-457.
[3] 吴亮, 许国伟, 范晟, 等. 基于无人机多光谱测绘的输电线路树障通道修缮工程面积计算方法 [J]. 电子测试, 2022, 36 (13): 61-63.
[4] 王武生, 黄昶. 基于无人机倾斜摄影与实景三维建模的工程土石方量审计方法探讨 [J]. 测绘, 2021, 44 (3): 111-114.
[5] 张琪曼. 基于无人机多光谱影像的土地利用分类研究 [J]. 新型工业化, 2022, 12 (10): 362-366.
[6] 白云鹏, 林志鹏, 段洪涛, 等. 面向频谱测绘任务的多无人机协同航迹规划方法 [J]. 信号处理, 2022, 38 (12): 2563-2571.
[7] 谭金石, 陈颖彪, 祖国. 利用无人机贴近摄影的临街建筑立面测绘方法 [J]. 遥感信息, 2021, 36 (6): 80-85.
[8] 沙红良, 陆德中, 付康, 等. 融合无人机 LiDAR 与摄影测量的河道地形测绘方法 [J]. 人民长江, 2023, 54 (4): 157-162.
[9] 黄毓, 顾呈剑, 周就猫, 等. 内置 RTK 无人机航拍技术在土地整治项目测绘与辅助规划设计中的应用 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2022, 37 (3): 87-94.
[10] 廖禄伟, 杨忠, 许昌亮, 等. 悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人飞行控制方法及装置 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (2): 343-352.
[11] 张铭宇, 杨子江, 林玉奇, 等. 物料抓取空中机器人总体设计 [J]. 机械设计, 2022, 39 (s1): 80-83.
[12] 马艾强, 姚顽强, 蔺小虎, 等. 面向煤矿巷道环境的 LiDAR 与 IMU 融合定位与建图方法 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (12): 49-56.
[13] 程梁, 王维强, 余天赐, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的永磁无刷电机转矩脉动抑制研究 [J]. 大电机技术, 2021 (6): 10-14.
[14] 李新澳, 甘淑, 胡琳, 等. 面向桉树和车桑子精准识别的高光谱特征变换方法比较分析 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38 (4): 1583-1590.
[15] 孙森震, 李广云, 王力, 等. 可见光通信平板光源高精度视觉室内定位方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38 (3): 259-266.
[16] 许智宾, 李宏伟, 张斌, 等. 双目视觉与惯导融合的移动机器人定位方法 [J]. 测绘学报, 2021, 50 (11): 1512-1521.
[17] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1:500 地形图测绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2021, 44 (6): 840-844.
[18] 李玉, 李天惠, 赵泉华. 遥感影像直觉模糊集分割法 [J]. 测绘学报, 2023, 52 (3): 405-418.
[19] 宋志印, 黄高爽, 黄桂平, 等. 旋转多基线对工业摄影测量精度的影响 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38 (3): 267-271.
[20] 范承成, 德晓薇, 郭金家, 等. 基于三角位移法姿态矫正的激光线扫描海底地形三维测绘 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (10): 1170-1180.