

针对复杂环境的组合导航系统设计与优化

曹亚龙

中国电子科技集团公司第二十研究所 陕西 西安 710068

摘要: 本文综述了针对复杂环境的组合导航系统设计与优化的关键方面,包括传感器选择与融合、环境建模与感知、路径规划与决策以及实时性与计算效率优化。优化路径规划和决策算法可以使系统更好地应对复杂环境下的导航挑战。最后,实时性与计算效率的优化可以保证系统快速响应并实时计算导航结果。

关键词: 复杂环境; 导航系统设计; 系统性能

1 复杂环境下的导航挑战

1.1 多路径信号衰减和多径效应

复杂环境下的导航挑战主要包括多路径信号衰减和多径效应。在无线通信中,多路径传播是指信号在传播过程中经过不同路径到达接收器,而这些路径可能会造成信号的重叠和相位差异,导致信号的衰减和失真。当导航系统使用全球卫星导航系统(GNSS)进行定位时,多路径信号衰减和多径效应对接收到的卫星信号产生干扰。在复杂的城市环境或山区、峡谷等有遮挡物的地方,信号会发生反射、折射或绕射,并经过不同路径到达接收器。这些多路径信号与直达信号相叠加,导致接收到的信号中包含多个路径上的不同相位和振幅成分。因此,如果不采取适当的处理措施,多路径效应会使导航系统的定位精度受到严重影响。多路径信号衰减和多径效应的解决方案通常包括以下几个方面:(1)接收器设计:通过优化接收器的前端设计和接收信号的天线选择,可以减少多路径信号的影响。(2)信号处理算法:采用合适的信号处理算法,如多普勒频移估计、相参散射波干扰消除、多路径信号成分提取等,可以减小多路径信号的干扰并恢复出准确的导航信息。(3)多天线阵列:通过使用多个天线接收不同方向的信号,可以利用多径信号的空间分布特性来减小多路径效应的影响。(4)环境建模和地图匹配:通过构建环境的三维模型和地图,可以使用地图匹配算法来将接收到的信号与地图进行比对,准确定位。

1.2 GPS信号遮挡和失真

GPS是一种基于卫星系统的导航技术,它通过接收卫星发射的信号来实现定位和导航。然而,在复杂的城市环境、林地、山谷或高楼大厦附近等地方,GPS信号可能会受到遮挡和失真的影响,导致导航系统性能下降。GPS信号遮挡通常是由高建筑物、峡谷、密集的树林等物体对信号的阻挡造成的。这些物体会遮挡到达接收器的

卫星信号,使得接收器无法获得足够的卫星信号来进行正常定位。由于GPS系统通常需要至少4颗卫星来提供精确的定位信息,当信号被遮挡时,接收器将无法获取足够的卫星信号,从而导致导航系统的性能受到影响。另外,GPS信号也可能在传播过程中发生失真。这种失真可能是由大气层的折射、反射和散射引起的^[1]。当GPS信号经过大气层时,由于大气中的湿度、温度等因素的影响,信号的传播速度和路径可能发生改变。这会导致信号的到达时间和相位发生变化,从而影响导航系统对信号的处理和定位精度。

1.3 姿态不稳定和运动约束

姿态不稳定是指导航系统所处的运动平台(例如飞行器、无人车等)的姿态变化较大或不稳定,这可能由于外部扰动、内部传感器噪声或不完善的控制系统所致。运动约束是指导航系统由于物理限制或环境约束,无法自由运动或进行某些特定的运动。在复杂环境中,姿态不稳定和运动约束的存在会对导航系统的性能产生重大影响。首先,姿态变化的不稳定性会导致传感器测量值的误差和不准确性增大,进而影响导航系统的定位精度。特别是在高速运动或快速旋转的情况下,姿态不稳定性更为明显,可能导致传感器数据的飞行器模型和运动估计错误。其次,运动约束会限制导航系统的运动能力和行为。例如,在城市街道、室内环境或狭小空间中,导航系统可能面临着转弯、避障、停止或加速等运动约束。这些约束会影响导航系统的路径规划和动态障碍物避让能力,从而对导航定位的准确性和实时性造成挑战。

2 复杂环境下的组合导航系统设计

2.1 传感器选择和布局

在复杂环境下设计组合导航系统时,传感器选择和布局是非常重要的因素。组合导航系统通过融合多种传感器的数据,如GPS、惯性测量单元(IMU)、激光雷

达、相机等,来实现高精度、鲁棒性和可靠性的导航定位。首先,在传感器选择方面,需要根据导航系统的具体需求和环境特点来选择适合的传感器。例如,在室外环境中, GPS可以提供全球定位信息,但在高楼大厦、峡谷等遮挡物较多的环境中,可能会受到信号衰减和多路径效应的影响。此时,可以考虑使用激光雷达或相机等视觉传感器来提供环境地图或障碍物信息。同时,选择惯性测量单元(IMU)可以提供姿态和加速度信息,对姿态不稳定和运动约束等问题具有较强的鲁棒性。其次,在传感器布局方面,需要结合传感器的测量范围、精度、重叠度等因素来进行布置。关键是要保证传感器的覆盖范围和重叠度,以提供准确和一致的测量数据。例如,对于采用激光雷达的组合导航系统,可以采用多个激光雷达进行环境的全方位扫描,并保证不同激光雷达之间的重叠度和匹配精度,以提高环境感知的稳定性和准确性。此外,对于导航系统使用的相机传感器,需要考虑相机的视野范围、分辨率和安装位置,以获得清晰的图像和可靠的视觉特征。另外,还需要注意传感器之间的配合与融合。各个传感器之间的数据融合可以通过滤波器、粒子滤波器、卡尔曼滤波器等算法进行^[2]。

2.2 多模态传感器数据融合

复杂环境中的导航挑战涉及多种因素,如GPS信号遮挡、环境变化、动态障碍物等。单一传感器可能无法满足所有情况下的导航需求,因此使用多模态传感器来收集多种信息,以增强导航系统的健壮性和可靠性。多模态传感器数据融合可以通过各种融合技术和算法来实现。其中,常见的方法包括滤波器(如卡尔曼滤波器、粒子滤波器)、优化算法(如最小二乘法、非线性优化)和机器学习方法(如神经网络、支持向量机)。这些方法可以将不同传感器的数据进行融合,消除噪声和误差,提高导航系统的定位精度和鲁棒性。

2.3 强化学习算法在组合导航系统中的应用

强化学习是一种通过与环境进行交互来学习最优行为的方法,可以帮助导航系统在不确定的环境中做出智能的决策。在组合导航系统中,强化学习算法可以应用于以下方面:(1)路径规划和决策:强化学习可以通过学习价值函数或策略,根据当前环境状态和目标来选择最优的导航路径和行为。通过与环境的交互,强化学习算法可以自动调整导航系统的行为策略,以最大化导航性能。(2)环境感知和目标检测:强化学习可以应用于导航系统的环境感知和目标检测。通过结合传感器数据和强化学习算法,导航系统可以自动学习环境中的特征和模式,并识别关键的目标和障碍物,以支持导航决策

和路径规划。(3)故障检测与容错处理:在复杂环境下,导航系统可能会遇到传感器故障、通信中断或其他不良情况。通过使用强化学习算法,导航系统可以学习适应性的容错机制,以自主地检测故障并采取适当的应对措施,从而增强系统的可靠性和鲁棒性。(4)运动规划和避障:强化学习可以应用于运动规划和避障,以帮助导航系统在复杂环境中进行精确的路径规划和决策。

2.4 姿态估计和运动约束处理

在姿态估计方面,常用的方法包括惯性导航和视觉导航。惯性导航使用惯性测量单元(IMU)来感知和估计导航系统的运动状态,包括位置、速度和姿态。而视觉导航则利用相机和图像处理技术来提取环境特征并估计相对位置和姿态。将这两种方法结合起来,可以提高姿态估计的精度和鲁棒性。在运动约束处理方面,导航系统的运动能力受到物理约束和环境条件的限制。例如,车辆导航系统的运动约束可能包括转弯半径、最大速度和加速度等。为了保证导航的安全和合规性,需要对运动轨迹进行约束处理。一种常用的方法是通过状态空间规划和运动规划算法进行路径规划和运动约束的优化^[3]。例如,使用模型预测控制(MPC)方法,可以将导航系统的运动约束和目标优化建模为最优控制问题,实现运动轨迹的自动优化。还可以使用传感器数据进行实时的运动约束监测和处理。通过分析传感器数据和环境信息,检测导航系统是否违反了运动约束,并及时进行调整和纠正。例如,利用激光雷达和摄像头数据,可以实时感知周围障碍物的位置和运动状态,并根据运动约束进行避障决策和路径规划。

3 优化组合导航系统性能

3.1 数据校准和误差估计

数据校准主要包括传感器校准和传感器间的时空校准。传感器校准是通过收集一组已知姿态或位置的数据,进行数据处理和分析,从而估计和修正传感器的误差。例如,通过采集惯性测量单元(IMU)的静态数据和动态旋转数据,可以进行校准,计算出传感器漂移和偏差等误差参数。时空校准则是调整不同传感器之间的时间延迟和空间位置差异,以确保传感器数据的同步性和一致性。例如,将激光雷达和相机等不同传感器的数据进行时空同步,以实现精确的感知和测量。误差估计是为了评估传感器数据的准确性和可靠性。通过建立误差模型,可以估计传感器的测量误差和不确定性,并根据这些估计值进行数据处理和滤波,以消除噪声和提高导航系统对误差的鲁棒性。常用的误差估计方法包括卡尔曼滤波器、粒子滤波器和最小二乘估计等。这些方法

根据传感器误差模型和测量数据,通过状态估计和优化算法,进行误差估计和趋势预测。

3.2 鲁棒性分析和算法合理性验证

鲁棒性分析是指对导航系统的性能进行全面评估,包括对噪声、干扰、不确定性和故障等因素的反应能力。通过模拟和测试不同的场景和条件,如传感器故障、通信中断、动态障碍物等,可以评估导航系统在复杂环境下的鲁棒性。根据分析结果,可以对导航系统进行优化和改进,以增强其鲁棒性和适应性。算法合理性验证是对导航系统的基本算法和策略进行有效性和合理性的验证。通过使用真实或模拟数据,对算法的输出进行比对、评估和验证。例如,可以使用已知的真值数据进行仿真测试,检查算法的输出是否与真值一致。另外,还可以利用实际场景数据进行测试,对比算法的预测结果与实际观测数据的吻合程度。这些验证可以帮助评估算法的准确性和可靠性,并指导进一步的算法优化和改进。

3.3 实时性和计算效率优化

在复杂环境下进行导航时,实时性和计算效率对于及时响应和快速决策至关重要。首先,为了提高实时性,可以采用并行计算和多线程处理的方法。通过将不同的导航任务分配给多个处理单元,并行地进行计算和处理,可以实现更快的实时响应。例如,可以将传感器数据处理、姿态估计和路径规划等任务分配给多个线程或处理器,使其同时进行,从而减少计算时间和延迟。其次,可以采用各种优化算法和数据结构来提高计算效率。例如,在姿态估计和运动约束处理中,可以使用高效的滤波器(如卡尔曼滤波器或粒子滤波器)或优化算法来减少计算复杂度。还可以使用空间索引结构(如四叉树或KD树)来加速数据查询和减少计算时间。另外,合理的数据处理和压缩策略也可以提高计算效率。通过对传感器数据进行实时滤波、插值或适当压缩,可以减少数据量和计算负担,从而提高系统的计算效率。例如,可以使用近似算法或数据降维技术,降低数据处理的维度和复杂度。硬件优化也是提高实时性和计算效率

的重要手段。选择合适的处理器、存储器和传感器等硬件设备,以满足实时性和计算要求^[4]。

3.4 误差补偿和滤波算法改进

误差补偿主要是通过分析和建模传感器误差,对传感器数据进行修正和补偿,以减小误差对导航系统的影响。常见的误差包括漂移、偏差、固有噪声等。一种常用的误差补偿方法是使用校准过的传感器参数和误差模型,通过数学定位和统计学方法对传感器数据进行修正。另外,可以利用多传感器融合的方法,通过相互校准和交叉检验,进一步提高误差补偿的准确性和可靠性。滤波算法改进是为了优化导航系统的滤波过程,提高位置和姿态估计的准确性和鲁棒性。常用的滤波算法包括卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等。这些滤波算法根据传感器数据和状态模型进行状态估计和误差补偿,以提供更准确的导航解决方案。改进滤波算法的关键在于合理选择模型和算法参数,并进行实时的状态更新和误差补偿。

结束语

通过合理选择和融合传感器、准确的环境建模与感知、优化路径规划与决策算法以及实时性与计算效率的优化,可以提高导航系统的精度、鲁棒性和实时性。未来的研究方向包括更精确、全面的环境感知和建模技术、更智能、高效的路径规划和决策算法以及更优化的实时计算策略,以持续提升复杂环境下的组合导航系统性能。

参考文献

- [1]王新龙,王建华,赵元棣.复杂环境下组合导航系统设计与优化[J].航空学报,2021,42(1):1-10.
- [2]李明,王立峰,赵劲松.基于多传感器融合的组合导航系统优化设计[J].传感技术学报,2021,34(2):369-377.
- [3]刘海波,赵元棣,王建华.针对复杂环境的自适应滤波组合导航系统设计[J].中国惯性技术学报,2021,29(3):459-465.
- [4]高山,王志强,王磊.基于深度学习的组合导航系统优化算法设计[J].导航定位与授时,2021,19(4):1-8.