

# 基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统设计

田 丹

(沈阳工学院 信息与控制学院, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:** 为纠正磁力计的过度偏转行为, 使得导航坐标结果更贴合理想预设坐标值, 设计基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统; 整合多源外接模块电路输出的电量信号, 将其分别反馈至 MEMS 磁力计与微处理器导航元件之中, 再根据地图空间定义模块中导航信息数据的传输行为, 确定融合信息单元的剩余存储能力, 实现多源融合导航系统的硬件结构设计; 在此基础上, 定义 MEMS 传感器的实时坐标, 通过计算位姿角数值的方式, 处理导航点与传感器信息之间的多源融合关系, 完成基于 MEMS 传感器的坐标转换; 根据已知的路径节点平移变换原则, 得到节点坐标的旋转与缩放结果, 完成对导航路径的可视化处理, 再结合相关硬件设备结构, 实现基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统设计; 实验结果显示, 在 MEMS 传感器作用下, 室内外多源融合导航系统在室内导航环境中, X 轴磁力计偏转角实测角与理想角之间的最大差值只达到  $3.7^\circ$ , 能够使得真实导航坐标结果更加贴合理想预设坐标值, 符合精准导航的实际应用需求。

**关键词:** MEMS 传感器; 多源融合; 导航系统; 地图空间; 位姿角; 磁力计偏转角

## Design of Indoor and Outdoor Multi-Source Integrated Navigation System Based on MEMS Sensor

TIAN Dan

(School of Information and Control, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

**Abstract:** In order to correct the excessive deflection behavior of the magnetometer and make the navigation coordinate result more suitable for the ideal preset coordinate value, an indoor and outdoor multi-source fusion navigation system based on MEMS sensor is designed. The power signal output is integrated by the multi-source external module circuit, which is respectively fed back to the MEMS magnetometer and the microprocessor navigation element, and then the transmission behavior of the navigation information data in the module is defined according to the map space to determine the remaining storage capacity of the fusion information unit, the hardware structure design of the multi-source fusion navigation system is realized. On this basis, the real-time coordinates of the MEMS sensor are defined, and the multi-source fusion relationship between the navigation point and the sensor information is processed by calculating the pose angle value, so the coordinate transformation based on the MEMS sensor is completed. According to the translation transformation principle of the known path node, the rotation and scaling results of the node coordinates are obtained, and the visualization of the navigation path is completed. Combined with the relevant hardware equipment structure, the indoor and outdoor multi-source fusion navigation system design based on the MEMS sensors is realized. The experimental results show that, under the action of the MEMS sensors, the indoor and outdoor multi-source fusion navigation system is in the indoor navigation environment. The maximum difference between the measured angle of the X-axis magnetometer deflection angle and the ideal angle is only  $3.7^\circ$ , the real navigation coordinate result is more suitable for the ideal preset coordinate value, which meets the practical application requirements of the precise navigation.

**Keywords:** MEMS sensor; multi-source fusion; navigation system; map space; posture angle; magnetometer deflection angle

## 0 引言

MEMS 传感器是一种检测应用装置, 能够直接感受到处于传输状态的被测信息, 并可以按照一定的规律或原则, 将这些待测信息整合成完全不同的输出形式, 在此过程中, 信息参量的传输路径、处理方式与存储形式都不会发生变化<sup>[1]</sup>。对于导航系统来说, MEMS 传感器作为核心信号输入设备, 可以绝对数据信息的后续传输方向, 并可在陀螺

仪、加速度计等应用元件的作用下, 完成对数据信息参量的查询与处理<sup>[2-3]</sup>。与常规 IMU 装置不同, MEMS 传感器对于位置信息的校准能力更强, 能够在修正数据信息参量的同时, 满足各种惯性与非惯性查询需求, 且由于数据信息的排序始终遵循一致性原则, 所以任何细微定义指令都不会对传感器元件的运行能力造成影响, 这也是 MEMS 传感器始终具备较强实用适应性的主要原因<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-04-26。

作者简介: 田 丹(1981-), 女, 辽宁兴城人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事计算机应用技术方向的研究。

引用格式: 田 丹. 基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 289-295.

室内外导航系统是指利用调用服务对位置节点进行定义的应用系统,可在智能终端软件的作用下,获取 GPS 模块内暂存的信息参量,并可根据相关性原则,将表达形式较为相似的数据信息归为一类,对于数据库主机而言,这种系统节省了大量的信息分类时间,能够从根本上解决主机运行速率相对较慢的问题<sup>[5]</sup>。在上述背景下,国内外相关领域研究学者纷纷对室内外多源融合导航系统的设计做出了研究。夏琳琳<sup>[6]</sup>等人提出基于降维对偶四元数的室内外导航应用系统,能够根据 AR 主机的导航能力,构建完整的室内与室外地图,并可借助 WIFI 组织,将位置信息序列转换成完整的数据文件参量,并可在遵循数据库存储标注的情况下,完成对这些信息参量的实时存储。然而对于磁力计设备而言,该系统系统并没有关注元件自身的偏转能力,以促使偏转角数值持续增大,并最终使得实际导航坐标结果不能与理想预设坐标值相贴合,对主机设备的精准导航能力造成影响。Zeng<sup>[7]</sup>等人提出基于贝叶斯网络模型的机器人导航系统设计,机器人的姿态由两个子网络分别编码,每个子网络贝叶斯代码一组用于前庭线索整合的积分器单元,一组用于视觉线索校准的校准单元。应用该模型 SLAM 系统实现室外和室内环境的导航定位。该方法在室内环境中的导航效果较好,但未考虑室外环境中的环境因素影响,室外导航精度差。

为避免上述情况的发生,在 MEMS 传感器的支持下,设计一种新型的室内外多源融合导航系统。设计基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统。应用 MEMS 传感器,同时获取空间内的导航点信息,获取实时坐标,通过计算位姿角数值的方式,处理导航点与传感器信息之间的多源融合关系,实现导航点的坐标转换。通过对节点坐标的旋转与缩放完成对导航路径的可视化处理,结合硬件设备实现基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统设计。

### 1 系统总体结构设计及硬件结构的设计与实现

室内外多源融合导航系统的硬件执行环境包含多源外接模块电路、MEMS 磁力计、微处理器导航元件、地图空间定义模块、融合信息存储单元,软件设计中,基于 MEMS 传感器原件,融合导航点与传感器信息,实现导航定位坐标点的坐标转换,对路径节点进行平移变换处理,再遵循旋转与缩放理论,实现室内外多源融合导航系统实时路径的可视化处理。系统总体结构如图 1 所示。

系统硬件结构的设计如下所示。

#### 1.1 多源外接模块电路

多源外接模块电路其主要功能就是为室内外多源融合导航系统、MEMS 传感器元件提供传输电流,以便于主机单元可对磁力计偏转角度信息进行捕捉,从而实现导航信息的存储与处理(详细连接如图 2 所示)。在实际应用过程中,该模块的连接位置处于系统 VCC 输出端与 VDD 输入端之间,可将高压交变电流转化成低压直流传输形式,并可以借助 K1、K2、K3、K4、K5、K6 几类磁力消耗设备,完成对传输电流的二次利用。由于 K 类磁力消耗设备

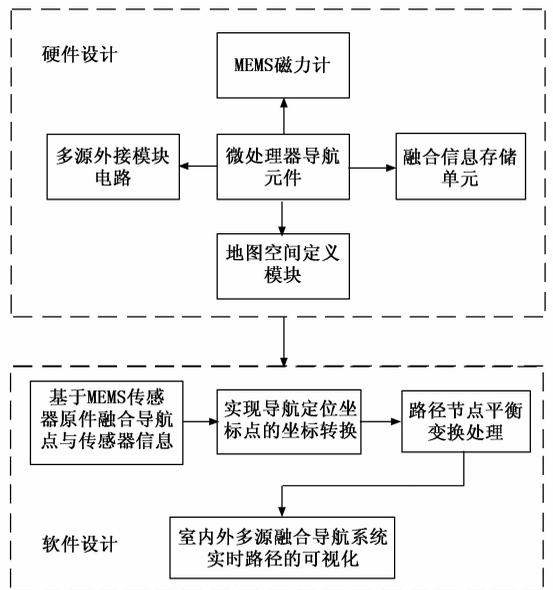


图 1 室内外多源融合导航系统整体结构设计

的存在,传输于多源外接模块电路的物理电流不会出现任何形式的外泄行为<sup>[5-6]</sup>。当剩余电量足以负担 MEMS 磁力计、微处理器导航元件等下级结构的连接行为时,传输电流便可以在导线通路的作用下,直接反馈至既定元件体系之内;而当剩余电量不足以负担下级结构的连接行为时,K 类磁力设备便会释放暂存的传输电流,使其对电信号误差量进行弥补,从而满足室内外多源融合导航系统的常规供应需求。

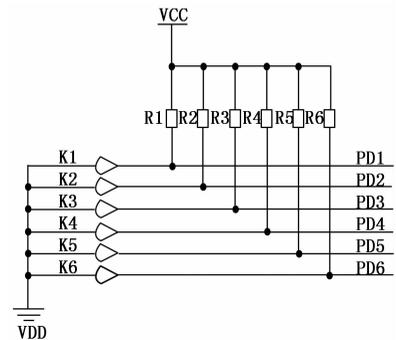


图 2 多源外接模块电路结构图

R1、R2、R3、R4、R5、R6 作为 6 个完全独立的连接电阻,分别与多源外接模块电路的 PD1、PD2、PD3、PD4、PD5、PD6 子通路相连,可在承接 VCC 电压输出端传输电流的同时,对剩余电信号参量进行打包处理,并将其分别反馈至不同的子通路环境之中,以供导航主机元件的自由选取。

#### 1.2 MEMS 磁力计

MEMS 磁力计是具有磁性能力的导航定向装置,在接头处于持续连通状态的情况下,导线中存在大量的传输电流,且由于磁性能力的不同,正向电流的传输方向总是由主机端指向电源结构外侧,而负向电流的传输方向则总是

由电源结构外侧指向主机端<sup>[7]</sup>。在多源融合导航系统中, MEMS 磁力计作为外接模块电路的下级附属结构, 可借助磁性探头确定室内外空间中定位节点所处的具体位置, 根据待测节点与初始节点间物理距离的不同, 多源外接模块电路对 MEMS 磁力计所输出的电信号数量也有所不同, 一般来说, 待测节点与初始节点之间的物理距离越远, 模块电力对 MEMS 磁力计输出的电信号数量也就越多, 反之则越少<sup>[8]</sup>。为了减少电量传输信号的浪费, 磁性探头分别与 MEMS 磁力计的主电机和外接导线相连, 且所测得的导航节点定位数据也可借助原电信号回路, 直接反馈回系统应用主机之中。

磁力计主电机表面包含一个控制开关、两个调节按钮和一个物理显示屏。开关结构负责掌控 MEMS 磁力计的断开与闭合状态; 调节按钮负责控制电信号的实际输出流量; 显示屏负责显示与 MEMS 磁力计相关的各项物理示数。

### 1.3 微处理器导航元件

微处理器导航元件以 MPU6500 芯片、MPU9250 芯片作为核心设备结构, 可联合微电阻元件, 采用 MEMS 传感器控制 MEMS 磁力计, 得出偏转角数值, 并可借助电信号传输导线, 将数据信息以传输电流的形式, 分别反馈给下级硬件应用结构和核心导航主机, 从而使得室内外多源融合导航系统的运行能力得到保障<sup>[9]</sup>。MPU6500 芯片、MPU9250 芯片及微电阻元件的具体应用能力如下:

1) MPU6500 芯片: 负责记录多源外接模块电路向外输出稳压电流的数量值水平, 可以在分析 MEMS 磁力计偏转角度的同时, 控制电流信号的消耗速度, 从而实现对导航主机精准定位能力的干扰。

2) MPU9250 芯片: 作为 MPU6500 芯片的附属连接结构, 负责统一调度整个微处理器导航元件的连接能力, 既可以记录电流信号的实际传输位置, 也可以存储既定地图节点的物理坐标, 并能够与多源融合导航系统的数据库主机建立连接关系, 从而为导航信息流提供一个相对稳定的传输环境<sup>[10]</sup>。

3) 微电阻元件: 与多源外接模块电路中的连接电阻相比, 微电阻元件的内阻水平相对较低, 对于传输电流的承载能力较弱。仅能对 MEMS 磁力计的偏转行为起到小幅度的促进影响作用, 但对于多源融合导航系统精准定位行为的影响能力极强。

### 1.4 地图空间定义模块

地图空间定义模块的连接必须同时借助 GControl、GContro Anchor、GControl Postion 三类应用节点, 且在 MEMS 传感器、导航元件等模块结构的作用下, 各类节点组织所具备的连接能力也有所不同。以下分别对 GControl 节点、GContro Anchor 节点及 GControl Postion 节点的室内外多源导航信息传输能力进行分析, 汇总导航主机采集的多源位置信息, 实现地图空间定义模块设计。

1) GControl 节点: 室内外多源导航信息的传输必须借助 GControl 类节点, 可根据定位地图中自定义控件的从属

连接状态, 规划导航节点在室内外环境中所处的位置<sup>[11]</sup>。相较于 MEMS 磁力计元件而言, GControl 节点可以在地图空间恒定覆盖的情况下, 将与 MPU6500 芯片、MPU9250 芯片匹配的操作行为限定在既定地图空间内, 一方面避免了磁力计设备出现过低偏转的行为, 另一方面也可实现对多源电信号传输行为的有效控制。

2) GContro Anchor 节点: 该类型节点能够控制导航标记点在地图空间定义模块中所处的实时连接位置, 由于 MEMS 磁力计单次发生的偏转角数值并不完全相等, 所以节点分布步长值的制定必须与导航主机中信息参量的输入行为保持一致化状态。一般来说, 相邻导航标记点之间的间隔距离越大, GContro Anchor 节点所具备的实时连接能力也就越强, 反之则越弱。

3) GControl Postion 节点: 与其它两类定义节点不同, GControl Postion 节点对于导航标记点的作用能力相对较弱, 在独立的地图空间内, 受到室内外多源信息分布多样性的影响, MEMS 传感器对于偏转角参量的提取能力会不断增强, 此时为使节点主体自身的连接能力得到保障, 外接模块电路必须增强对于电信号的输出强度, 并以此为基础, 驱动相邻 GControl Postion 节点不断向着同一位置靠近, 最终汇总导航主机所采集到的多源位置信息, 并将其全部存储于系统数据库元件之中<sup>[12]</sup>。

### 1.5 融合信息存储单元

在室内外多源融合导航系统中, 融合信息存储单元与地图空间定义模块之间的连接适配性最强, 由主存储模块、附属存储模块两部分共同组成, 前者负责建立完整的导航定位信息输入、输出指令流程, 后者负责对反馈信息进行整合与处理, 并可在 SQL 数据库元件的作用下, 将这些数据信息参量直接传输至核心分析主机中, 以供 MEMS 磁力计设备的二次调取与利用。主存储模块中包含一个 MiniSD 卡、一个 STM32F407 芯片、一个 EEPROM 组件和一个 EEPROM 元件, STM32F407 芯片能够接收并处理微处理器导航元件中 MPU6500 芯片存储的多源外接模块电路向外输出稳压电流的数值, 减少导航主机精准定位能力的外界干扰。EEPROM 组件能够借助定位节点, 改变多源导航信息的实时存储位置, 并可以按照传输信道的实际连接形式, 构建更加完善的信息导入与导出映射关系, 从而将室内外多源导航信息改写成 IAP 编码的形式<sup>[13-14]</sup>。附属存储模块只包含一个 SQL 数据库和一个核心分析主机, 能够将已获得室内外多源数据按需分类成传感信息、导航信息与定位信息的存储形式, 并可以与主存储模块间构建一种动态的信息互传关系, 从而满足 MEMS 传感器对于室内外环境进行导航控制的实际应用需求。完整的模块结构详解如图 3 所示。

SQL 数据库必须负担室内外多源导航信息的实时融合需求, 其连接形式也必须随着 MEMS 磁力计偏转角度的改变而不断发生变化。

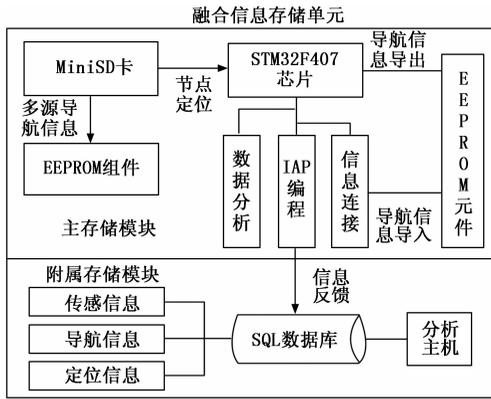


图 3 融合信息存储单元示意结构详解

## 2 基于 MEMS 传感器的坐标转换

在硬件设计的基础上，设计室内外多源融合导航系统软件，在 MEMS 传感器元件的作用下，按照坐标定义、位姿角计算、导航点与传感器信息融合的执行流程，实现对室内外导航系统定位坐标点的转换处理。

### 2.1 传感器坐标定义

传感器坐标定义分为俯仰角分析、翻滚角分析两部分。其中，俯仰角是指由较远定位节点指向核心节点的标记曲线角，与之相匹配的传感器导航射线相对较长；翻滚角是指由非恒定定位节点指向核心节点的标记曲线角，与之相匹配的传感器导航射线一般不会比俯仰角导航射线更长。

规定  $\theta_1$  表示俯仰角度数取值，在室内外多源融合导航系统中， $\theta_1 < 180^\circ$  的不等式条件恒成立； $\theta_2$  表示翻滚角度数取值，在考虑 MEMS 磁力计偏转行为的情况下， $\theta_2 < \theta_1$  的不等式条件也恒成立。设  $\bar{V}$  表示 MEMS 磁力计的偏转行为速度均值， $\chi$  表示固定偏转系数，联立上述物理量，可分别将基于俯仰角与翻滚角的传感器坐标定义式表示为：

$$\begin{cases} F_1 = \frac{d_1^2 \chi}{V \cdot \theta_1} \\ F_2 = \frac{\chi \cdot \left| \frac{1}{d_2} \right|^2}{\sqrt{V \cdot \theta_2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $F_1$  为基于俯仰角的传感器坐标定义系数， $F_2$  为基于翻滚角的传感器坐标定义系数， $d_1$  为与俯仰角匹配的传感器导航射线长度， $d_2$  为与翻滚角匹配的传感器导航射线长度。在对传感器坐标进行定义时，默认地图空间中的导航定位坐标点不会互相遮盖。

### 2.2 位姿角计算

位姿角也叫因 MEMS 磁力计偏转行为而产生的位移转动角，在已知传感器坐标定义条件的情况下，可认为俯仰角转向量与翻滚角转向量之间的物理差值越大，位姿角的实际数值水平也就越高<sup>[15-17]</sup>。在一个导航定位周期内，室内外多源信息的最大融合变化量只能达到  $\Delta E_{\max}$ ，且该项物理量属于一项非矢量指标，即随着导航行为、磁力计偏转行为等外界条件的改变，指标参量自身的数值水平也会发

生改变。因此，在计算位姿角数值的时候，只能将最大融合变化量作为一项关联性参考条件。联立公式 (1)，可将位姿角正弦变动行为表达式定义为：

$$\sin \alpha = \frac{|F_1^2 - F_2^2|}{\lambda \cdot (\Delta E_{\max})} \quad (2)$$

其中： $\lambda$  为固定偏转系数。

在公式 (2) 的基础上，设  $x_\alpha$  表示位姿角  $\alpha$  的 X 轴投影长度值， $y_\alpha$  表示位姿角  $\alpha$  的 Y 轴投影长度值，根据上述物理量，可将位姿角  $\alpha$  计算结果表示为：

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\mu-1)^2}{x_\alpha \cdot y_\alpha} \arcsin \alpha} \quad (3)$$

式中， $\mu$  为位姿角反转系数。一般来说，位姿角数值越大， $\mu$  指标的取值结果也就越大，此时室内外多源融合导航系统判别主机对于 MEMS 磁力计偏转行为的依赖性也就越强。

### 2.3 导航点与传感器信息的多源融合

导航点是指位姿角的核心定位点，在 MEMS 磁力计偏转行为发生变化的过程中，导航点所处位置也会随之出现变化。传感器信息是指 MEMS 传感器所采集到的室内外定位信息，由于实时导航环境总是处于相对变动的存在状态，所以传感器信息采集行为也总是随之呈现变动形式。具体融合流程如图 4 所示。

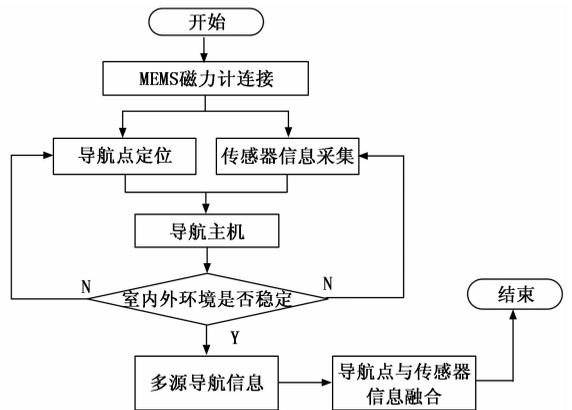


图 4 导航点与传感器信息的多源融合流程图

导航点与传感器信息的多源融合要求室内外导航环境必须处于绝对稳定的状态，也只有在此前提下，MEMS 传感器所采集到的节点坐标信息才具有可参考价值。

## 3 导航路径可视化处理

在实现对室内外导航系统定位坐标点的转换处理后。根据定位节点的坐标转换原则，对导航路径内的节点进行平移变换，再遵循旋转与缩放理论，实现室内外多源融合导航系统实时路径的可视化处理，结合硬件系统完成了基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航系统设计。

### 3.1 路径节点的平移变换

室内外多源融合导航路径节点平移变换，也叫考虑 MEMS 传感器偏转行为的导航节点平向转移变换，在已知导航点与传感器信息多源融合结果的情况下，位姿角计算数值将直接影响节点坐标的变换结果<sup>[18]</sup>。

规定  $P_0$  表示导航路径节点的初始标记值，其物理坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $P_n$  表示平移变换后的导航路径节点标记值，其物理坐标为  $(x_n, y_n, z_n)$ , 在  $\alpha$  位姿角取值恒大于零的情况下，可将室内外多源融合导航系统路径节点的平移变换表达式定义为：

$$\begin{cases} x_n = \cos\alpha \cdot \frac{\Delta L}{d} x_0 \\ y_n = \frac{h \cdot \sin\alpha}{\varphi \cdot y_0} \\ z_n = \tan\alpha \cdot z_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\cos\omega$  为位姿角  $\alpha$  的余弦值， $\sin\omega$  为位姿角  $\alpha$  的正弦值， $\tan\omega$  为位姿角  $\alpha$  的正切值， $\Delta L$  为导航节点的单位平移距离， $d$  为平移度量系数， $h$  为纵向平移的深度标准数值， $\varphi$  为偏转角定标系数。

路径节点平移变换是室内外多源融合导航系统设计的关键执行环节，由于该项物理条件的定义参考了磁力计偏转行为对数值计算结果造成的影响，所以各项指标参量的取值都应做到绝对精细化<sup>[19]</sup>。

### 3.2 旋转与缩放

旋转就是为平移后导航路径节点赋予一定的初始偏转角度，从而使得系统主机能够在较短时间内适应磁力计元件的偏转行为<sup>[20]</sup>。设  $\delta_0$  表示初始旋量，且该项物理量能够直接作用于平移变换后的物理坐标点  $P_n(x_n, y_n, z_n)$ 。联立上述物理量，可将基于 MEMS 传感器的导航定位角旋转表达式定义为：

$$R = \frac{\hat{g}}{\sqrt{1 - \delta_0^2 \sin^2 \frac{y_n}{x_n}}} \quad (5)$$

其中： $\hat{g}$  为室内外环境下多源融合定位节点的旋转标准向量。

缩放就是对平移后导航路径节点所涉及的覆盖范围面积进行调节，一般来说，室内外多源导航环境的物理空间越广泛，缩放比例系数的变化行为也就越明显<sup>[21]</sup>。设  $\Delta q$  表示导航路径节点缩放比例的原始度量值，联立公式 (4)，可将基于 MEMS 传感器的导航定位角缩放表达式定义为：

$$U = \frac{\Delta q}{2} * \left( \cos^2 \frac{z_n}{x_n} \right) \quad (6)$$

旋转与缩放行为可以同时影响室内外多源融合导航系统对于节点坐标的定位能力<sup>[22-23]</sup>，由于磁力计偏转行为强度不可能为零，所以旋转与缩放定义式的取值结果也不可能等于零。

## 4 实例分析

选取图 5 所示的计算机元件作为实验环境，其中左侧主机所显示图像为室外环境，右侧主机所显示图像为室内环境。

选取两台型号相同且作用能力稳定的磁力计装置作为实测设备，其中一台磁力计接受实验组计算机的控制（实验组计算机搭载基于 MEMS 传感器的室内外多源融合导航



图 5 室内外导航环境模拟

系统），另一台磁力计接受对照组计算机的控制（对照组计算机搭载基于降维对偶四元数的导航系统）。

磁力计偏转角数值能够反映实测导航坐标与理想预设坐标之间的贴合度水平，一般来说，实测角与理想角之间的差值越小，则表示实测导航坐标与理想预设坐标之间的贴合能力越强；而实测角度值过大或过小，都表示磁力计出现了过度偏转行为，不利于计算机元件对导航信息进行精准处理。

本次实验主要分为室外导航环境、室内导航环境两部分，且为保证实验结果的完整性，每一部分实验都分为 X 轴、Y 轴两个导航方向。

表 1 记录了室外导航环境中，X 轴、Y 轴两个方向上的理想磁力计偏转角数值。

表 1 理想磁力计偏转角(室外导航环境)

实验组别	磁力计偏转角/(°)	
	X 轴	Y 轴
1	78.0	82.0
2	78.0	82.0
3	78.0	82.0
4	78.0	82.0
5	78.0	82.0
6	78.0	82.0
7	78.0	82.0
8	78.0	82.0

表 2 记录了室外环境导航中，实验组、对照组实测磁力计偏转角数值。

表 2 磁力计偏转角实测值(室外导航环境)

实验组别	磁力计偏转角/(°)			
	实验组		对照组	
	X 轴	Y 轴	X 轴	Y 轴
1	76.1	80.6	70.2	90.3
2	77.3	81.4	71.2	91.6
3	75.2	81.0	68.4	75.7
4	76.5	81.2	87.5	77.3
5	77.1	82.7	82.3	86.9
6	76.4	82.5	88.9	89.1
7	78.0	80.1	90.1	74.4
8	76.8	81.3	84.6	88.0

对比表 1、表 2 可知,对于实验组导航系统而言,与之匹配的磁力计偏转角均值水平相对较低,单就 X 轴上的偏转角数值来看,第二次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $2.8^{\circ}$ ;单就 Y 轴上的偏转角数值来看,第三次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $2.0^{\circ}$ 。对于对照组导航系统而言,与之匹配的磁力计偏转角均值水平相对较高,单就 X 轴上的偏转角数值来看,第七次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $12.1^{\circ}$ ,高于实验组差值;单就 Y 轴上的偏转角数值来看,第二次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $9.6^{\circ}$ ,也高于实验组差值。

图 6 反映了室内导航环境中, X 轴、Y 轴两个方向上的理想磁力计偏转角数值,及实验组、对照组实测结果与理想偏转角的数值对比情况。

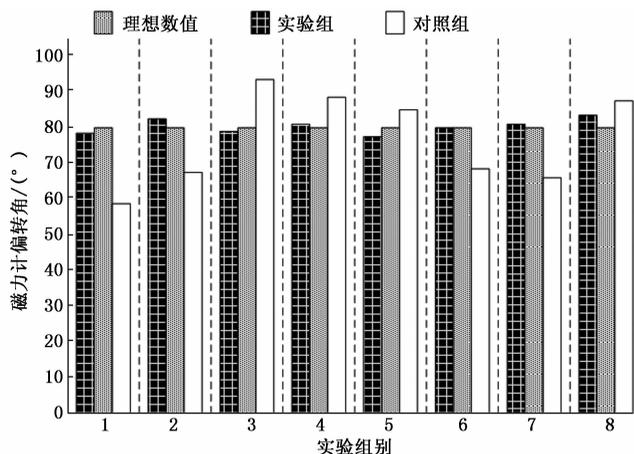


图 6 室内导航环境中的磁力计偏转角 (X 轴)

分析图 6 可知,对于室内导航环境 X 轴实验结果而言,实验组第 6 次所取得的实测偏转角与理想偏转角数值完全相等,第八次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $3.7^{\circ}$ ;对照组第一次实验所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,  $21.0^{\circ}$ ,高于实验组差值水平。

分析图 7 可知,对于室内导航环境 Y 轴实验结果而言,实验组第五次所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $3.6^{\circ}$ ;对照组第四次所取得的实测偏转角与理想偏转角之间的差值最大,达到了  $10.2^{\circ}$ ,也高于实验组差值水平。

综上所述,在 MEMS 传感器的作用下,磁力计偏转角数值在室内、室外导航环境中均能得到较好控制,实测角与理想角之间物理数值差的最大值达到  $3.7^{\circ}$ ,说明室内外多源融合导航系统的导航准确性较高,对方位的识别精度较好,完全符合精准导航的实际应用需求。

## 5 结束语

与基于降维对偶四元数的导航系统相比,新型室内外

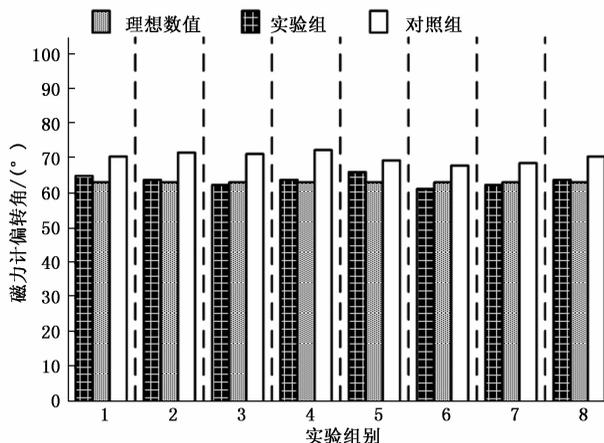


图 7 室内导航环境中的磁力计偏转角 (Y 轴)

多源融合导航系统以 MEMS 传感器元件为基础,在模块电路、地图空间定义模块等多个硬件应用结构的作用下,对传感器坐标进行重新定义,又根据路径节点平移变换原则,实现对导航定位坐标的旋转与缩放处理。从对比实验的角度来看,随着这种新型导航系统的应用,磁力计的过度偏转行为得到了较好纠正,实测导航坐标结果能够更加贴合理想预设坐标值,这对于室内外环境中节点坐标的精确化导航,确实能够起到一定的促进性影响作用。

## 参考文献:

- [1] 陈锐志,郭光毅,叶锋,等. 智能手机音频信号与 MEMS 传感器的紧耦合室内定位方法 [J]. 测绘学报, 2021, 50 (2): 143-152.
- [2] 蒋维,章卫国,史静平,等. 一种基于 MEMS 传感器的全局渐进稳定的姿态估计算法 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (3): 550-557.
- [3] 张琳,廉保旺. 室内惯性导航系统/相机拓扑测量的因子图合作定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54 (3): 70-79.
- [4] 戴娟,辛知泳,程立志,等. 基于编/解码集成芯片的红外遥控车电路设计 [J]. 机械设计, 2019, 36 (S2): 109-111.
- [5] 孙成胜,张红民,龚恒翔,等. 一种新型的程控多频雾化电路设计方案 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (5): 102-104, 110.
- [6] 夏琳琳,肖建磊,徐迅,等. 一种基于降维对偶四元数的多源导航系统信息融合方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27 (6): 738-745.
- [7] ZENG T, TANG F, JI D, et al. NeuroBayesSLAM: Neurobiologically inspired Bayesian integration of multisensory information for robot navigation [J]. Neural Networks, 2020, 126 (6): 21-35.
- [8] 宁一鹏,毕京学,姚国标,等. 简化磁力计非线性误差模型的快速校正算法 [J]. 测绘科学, 2021, 46 (1): 36-41, 55.
- [9] 周芳芳,毛索颖,黄跃文. 基于双微处理器的传感器自动采集装置设计与实现 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (6): 157-160.
- [10] 刘一宁,杨亚鹏,陈法国,等. 180 nm CMOS 微处理器辐照

- 效应敏感外设及其损伤剂量的概率模型分析 [J]. 核技术, 2021, 44 (3): 63-68.
- [11] 王恩美, 邬树楠, 吴志刚. 在轨组装空间结构面向主动控制的动力学建模 [J]. 力学学报, 2020, 52 (3): 805-816.
- [12] 肖帆, 李光, 游雨龙. 空间 3R 机械手逆向运动学的多模块神经网络求解 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (10): 1233-1238.
- [13] 刘东亮, 王军光, 张洁, 等. 基于知识单元挖掘的网络文库信息存储模型研究 [J]. 情报学报, 2020, 39 (2): 171-177.
- [14] 黄正峰, 李雪健, 鲁迎春, 等. 65 nm CMOS 工艺的低功耗加固 12T 存储单元设计 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31 (3): 504-512.
- [15] 张旭, 陈爱军, 沈小燕, 等. 基于线激光传感器的工件尺寸测量系统的误差补偿方法 [J]. 计量学报, 2020, 41 (12): 1449-1455.
- [16] 尤晶晶, 符周舟, 李成刚, 等. 并联式六维加速度传感器的解耦参数辨识及其扰动分析 [J]. 振动与冲击, 2019, 38 (1): 134-141.
- [17] 贾康, 洪军, 张银行. 一种拉刀螺旋容屑槽前刀面磨削砂轮安装位姿计算方法 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (11): 205-214.
- [18] 曾祥君, 陈磊, 喻锐, 等. 基于配电网两端信息融合的单相断线故障实时监测方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35 (3): 12-18.
- [19] 王吉岱, 徐东晓, 孙爱芹, 等. 基于多传感器信息融合的输电线路巡检机器人自主越障方法研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (9): 24-28.
- [20] 杨克克, 罗阳, 赵忆文, 等. 基于主方向傅里叶变换算子的 2D/3D 分级配准 [J]. 机器人, 2021, 43 (3): 296-307.
- [21] 李东, 张成祥, 赵迪, 等. 基于伪逆极坐标傅里叶变换的快速 ISAR 方位定标 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41 (2): 262-269.
- [22] 郑钰馨, 奚鹰, 李梦如, 等. 旋转向量减速器纯扭转模型固有频率和灵敏度分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2019, 49 (2): 499-512.
- [23] 肖延辉, 田华伟, 张永胜. 结合深度迭代缩放卷积神经网络的 PRNU 提取算法 [J]. 信号处理, 2020, 36 (9): 1582-1589.
- [24] 刘未, 朱宏辉. 隧道安全预警机器人自主导航方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 172-177.
- [25] 黄剑雄, 刘小雄, 章卫国, 等. 基于视觉/惯导的无人机组合导航算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 137-143, 149.
- \*\*\*
- (上接第 268 页)
- 面缺乏针对软件生命周期不同阶段质量评估模型。针对这些问题, 对软件生命周期中和软件质量问题最为密切相关的几个阶段, 包括需求分析、软件设计、软件编码和软件测试, 制定了新的软件生命周期质量评价方法, 分析度量元, 并提出改进的加权模糊熵法确定加权系数, 给出评价方法和评价流程, 最后通过实例对方法进行了有效验证, 为软件生命周期不同阶段质量建立了一套有效的评价标准。当然, 评价标准需要经过实践不断验证和不断的改良, 评价度量元和加权系数也是需要在实践中不断的验证而修改和补充。
- 参考文献:**
- [1] 崔潇丹. 领域软件的质量评估方法研究与应用 [D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [2] PRESSMAN R S. Software engineering a practitioner's approach [M]. London: HMCGrav-Hill International Computer Science, 1992: 20-30.
- [3] COMFORD J, STONE J. Engineering safety [M]. London: HMCGrav-Hill Book Company, 1992.
- [4] HON B B W. Identifying quality requiems conflicts [J]. IEEE Software, 1996, 13 (2): 23-35.
- [5] BOEHM. Software risk management: principles and practices [J]. IEEE Software, 1991, 8 (1): 32-41.
- [6] 刘宇柯. 基于 CMMI 的软件开发项目管理研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [7] 齐轶, 王勇. 基于层级属性关系软件评估模型 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 20-20.
- [8] 吴坚, 吴刚. 软件质量模型的研究 [J]. 计算机工程与科学, 2006, 28 (8): 125-127.
- [9] 钱鸿生. 基于风险管理的软件生命周期模型研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] 刘玉军, 冯飞, 曹乐. 一种航空机载嵌入式软件安全性评价方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 2-3.
- [11] 刘涛, 李娜. 航空机载软件测试质量评价方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 285-287.
- [12] 邢薇薇, 王新刚. 航空机载软件缺陷分类方法研究与应用 [J]. 测控技术, 2016, 35 (9): 102-106.
- [13] 刘宏, 李好威. 基于熵权法与灰色关联分析的 WSNs 路由算法 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (8): 1-2.
- [14] 刘培德, 王娅姿. 一种属性权重未知的区间概率风险型混合多属性角色方法 [J]. 控制与决策, 2012, 27 (2): 276-280.
- [15] 上官延华, 冯荣耀, 柳宏川. 一种基于熵和均方差法综合赋权的 K-means 算法 [J]. 计算机与现代化, 2010 (4): 34-36.
- [16] 赵萌, 任峥嵘, 邱苑华. 基于直觉模糊熵的专家权重确定方法及其验证 [J]. 控制与决策, 2015, 7 (30): 2-3.
- [17] 刘满凤, 任海平. 基于一类新的直觉模糊熵的多属性决策方法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (11): 2-3.
- [18] 付剑平, 陆民燕. 基于模糊综合评价的软件测试性度量 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (27): 1-2.
- [19] 权岩. 基于 CMMI 模型的软件工程优化研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- [20] 张黎. 基于直觉模糊层次分析法的民航机场服务质量评价 [P]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2020, 1: 7-8.