

基于地磁与空间上下文信息的半解析定向方法

刘公绪¹,高新波^{1,2},何立火¹,解宇³,路建民¹

(1. 西安电子科技大学电子工程学院超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室,陕西西安 710071; 2. 重庆邮电大学图像认知重庆市重点实验室,中国重庆 400065; 3. 山西大学计算智能与中文信息处理教育部重点实验室,山西太原 030006)

摘要: 在物联网时代,人们对高精度的、普适的室内定位需求日益迫切. 然而鲁棒的技术方案仍没有出现,其中一个难点是用地磁解决室内人员的定向问题. 众所周知,在空旷的室外环境可以基于地磁解析定向的方法实现定向,然而室内地磁往往存在严重的磁失真,使得该方法不再适用. 为解决上述问题,本文提出一种半解析定向方法. 该方法首先将解析定向结果与基于空间上下文信息提取的走廊结构的几何关系进行融合,得到修正的定向结果,并通过磁失真度量和判断确定融合系数;进而深入分析了不同融合系数对定向结果的影响. 测试结果表明,与现有方法相比,所提出的方法具有较好的鲁棒性,可以有效改善定向精度,广泛用于基于路径的或基于走廊的定位定向场合.

关键词: 室内定位; 定向; 地磁; 磁失真; 空间上下文

中图分类号: V241.61;P318.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)01-0116-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI:10.12263/DZXB.20200797

Semi-Analytical Orientation Method Based on Geomagnetism and Spatial Context Information

LIU Gong-xu¹, GAO Xin-bo^{1,2}, HE Li-huo¹, XIE Yu³, LU Jian-min¹

(1. Key Laboratory of High-Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Image Cognition, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

3. Key Laboratory of Computation Intelligence and Chinese Information Processing, Ministry of Education, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: In the era of the Internet of Things(IoT), the demand is increasingly urgent in terms of high-precision and ubiquitous indoor positioning. However, it lacks robust technical solutions, and one of the challenges is to solve the orientation problem for indoor pedestrians by making good use of geomagnetic field. As we all know, the orientation can be acquired through analytical method based on geomagnetic field in the open outdoor environment, while it is difficult to apply the analytical method in indoor environments when taking the serious magnetic distortion into consideration. In order to solve the above issues, this paper proposes a semi-analytical orientation method. Firstly, the proposed method can get the corrected results by the fusion of the result from analytic orientation with that from the geometric relationship of the corridor structure extracted based on the spatial context information, and the fusion coefficient is determined through the magnetic distortion measurement and judgment. Then we deeply analyzed the influence of different coefficients on the results. Finally, the test results show that the proposed method has good robustness and can effectively improve the orientation accuracy compared with the existing methods, and can be widely used in path-based or corridor-based positioning and orientation scenarios.

Key words: indoor positioning; orientation; geomagnetic field; magnetic distortion; spatial context

1 引言

近年来,中国移动、中兴、华为、锐捷等共同发布了《室内定位白皮书》^[1],指出在物联网时代,人们对普适

的、高精度的室内定位的需求日益迫切. 然而通用而鲁棒的技术方案仍没有出现^[2],其中一个难点是如何用好室内地磁解决室内人员的定向问题^[3].

收稿日期:2020-07-28;修回日期:2021-06-15;责任编辑:王天慧

基金项目:中央高校基本科研业务费(No.XJS210209);国家自然科学基金面上项目(No.61871453);国家自然科学基金青年科学基金(No.62101399)

地磁场无处不在,其应用从指南针^[4]到卫星的定姿^[5],再到各种地磁导航应用^[6].关于地磁的定向和定位,大体可分为两种方法.一种是测量并构建室内磁地图^[7],然后基于磁地图进行匹配定位^[8],这不在本文的讨论范围.另一种方法是使磁传感器与其他传感器组合使用,典型的是磁/惯性传感器^[9].理论上可根据磁传感器所测的地磁矢量在地理坐标系上的投影,获得载体的姿态信息,包括俯仰角、横滚角和航向角.但是针对地球表面的磁场,考虑其波动性——地磁本身存在地磁静日变化现象^[2,7,9],和其敏感性——地磁易受各种复杂电磁环境的干扰而引起磁失真^[3,7,9],很难仅依靠磁传感器精确测定载体的俯仰角和横滚角.一般需要根据重力场信息,如利用倾斜计或重力加速度计等获得静态或低动态下载体的俯仰角和横滚角信息,并将该信息用于确定磁场矢量在地理坐标系上的投影,或用于补偿地磁矢量在水平面上的投影,并考虑到当地磁偏角,获得载体全姿态下的航向信息;同时,其他传感器提供在航向上运动的距离信息,利用航迹推算方法,得到载体的位置信息.可见在该方法中,地磁仅仅用于定向,需要其他传感器辅助才可以实现定位^[10].由于该方法在使用时依赖明确的计算公式,故可以称其为解析定向方法,它的应用场景一般为磁场相对稳定的室外等空旷地区.然而室内地磁往往因各种软/硬磁干扰如建筑物的钢筋混凝土结构、电力线和其他电气设备的影响而导致严重的磁失真,使得基于地磁的解析定向的方法不再适用.但这并不等于在理论和实践层面不再开展室内环境下地磁解析定向的研究,相反,却促使学者们尝试许多其他的途径以实现地磁近似解析定向的效果,这些研究集中在室内磁干扰建模^[11,12]、磁失真补偿技术^[13]以及磁传感器与其他传感器的融合定向等方面.此外,虽然调频连续波雷达^[14,15]、5G^[16,17]等无线技术可以实现测距和测向,但考虑到无线信号在室内环境下的遮挡、衰减或多径效应,将无线技术用于室内定向或地磁与无线技术进行融合定向在硬件和软件算法层面实现起来都比较困难,且缺少相关的研究.基于视觉传感器^[18]也可以实现定位和定向,但其受环境光照条件影响,且算法较为复杂.

此外,学者们开展了许多将惯性/磁传感器融合定向的方案拓展到室内场景的研究^[19-21].对该方案的分析如下:由于惯性传感器的积分特性,基于消费级惯性传感器的室内定向不可避免地会引起较大的时间累计误差,定向的精度无法长时间保持,且由惯性传感器得到的是相对航向角,而不是绝对航向角.虽然室内磁场频繁失真,但一旦出现磁场不失真的时刻或地方,就可以借助校准过的磁传感器^[22]进行准确的绝对定向,其与基于惯性传感器室内定向具有天然的互

补性.因此,考虑磁失真补偿技术,并将磁传感器与其他传感器尤其是惯性传感器进行融合定向是合理、可行的选择.

值得一提的是,室内包含着丰富的和待挖掘的信息可以用来辅助定向.从一方面来讲,复杂的和受限的室内环境给定向带来了困难;但从另一方面来讲,室内区域是受限的,含有丰富的空间上下文信息^[23],如室内的结构(房间的分布、走廊的拓扑、楼梯等)、设施(桌椅、门窗、升降梯等)、各种地标(转弯、信号盲区、磁或无线信号的波动区等),而人在含有丰富空间上下文信息的室内区域活动时,除了人体本身周期性的步态特征^[2]和可感知坐标^[23]外,活动区域的轨迹或者路径信息也是可以利用的.据调研,大部分建筑物结构是长方形的,其内部的走廊结构是彼此平行或垂直的,当人员在走廊区域行走时,走廊的这种几何关系可以辅助磁航向估计^[2,24],基于这一思想,笔者团队已经提出了自适应磁航向估计方法,然而该方法仅仅利用磁传感器进行实现,没有涉及多传感器融合定向内容、没有考虑磁失真判断,且对相关融合系数的选择缺少深入分析.相比于笔者团队已经发表的成果^[24,25],本文在算法架构上采用的是较复杂的融合架构,该架构中不仅引入了其他传感器,同时考虑了磁失真判断;将走廊的几何关系作为空间上下文信息进行辅助定向,扩充了相关概念;同时删去了转弯的延时补偿,相应地完善了对融合系数选择的深入分析.总之,本文在研究内容的深度和侧重点方面与前期工作都有较大区别.

综上所述,为解决基于地磁进行室内定向的难题,本文提出一种半解析定向方法,它集磁失真度量与判断、空间上下文信息提取、融合定向于一体,并分析了不同融合系数对定向结果的影响,改善了基于地磁的定向鲁棒性和精度.本文的创新之处总结如下:

(1) 所提出的方法集磁失真度量与判断、空间上下文信息提取、融合定向于一体,可以有效改善基于路径的或基于走廊的定向精度;

(2) 空间上下文提取的航向信息与解析定向的融合系数可以根据匹配误差等参数进行自适应调整,进一步提高算法的鲁棒性;

(3) 通过对不同定向参考的评估和分析得出,将走廊方向作为航向参考,可以快速验证定向方法的有效性.

2 算法设计过程

半解析定向方法的原理框图如图1所示,包括解析定向、空间上下文信息提取、磁失真度量与判断、融合定向四部分.首先通过解析定向方法获得磁航向,然后对走廊结构进行分析,提取空间上下文信息,建立磁航

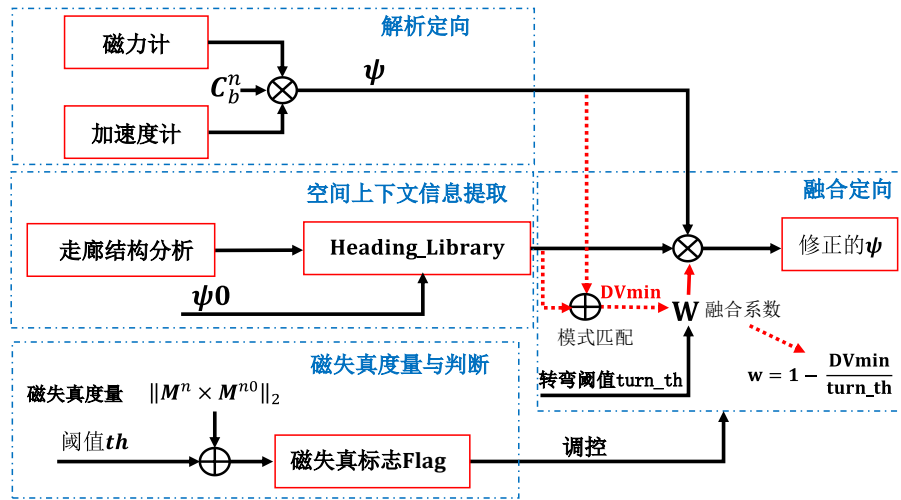


图1 半解析定向方法原理框图

向校准库.接着,一方面通过磁失真度量与判断,获得磁失真标志,调控磁场明显失真情况下磁航向的输出;另一方面按照模式匹配的思想,在航向角校准库中寻找与当前由解析定向方法得到的航向角最匹配的航向角,通过转弯阈值和匹配误差来自适应地调整在磁场没有明显失真情况下的定向融合系数.下面将分别介绍.

2.1 解析定向

加速度计在导航坐标系(简称 n 系)输出 A^n 与载体坐标系(简称 b 系)输出 A^b 的关系为

$$A^b = C_n^b A^n \quad (1)$$

其中, $A^n = [0 \ 0 \ g]^T$, $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$, C_n^b 为 n 系到 b 系的方向余弦矩阵^[3].将 C_n^b 和 A^n 代入式(1)可得

$$A^b = g \begin{bmatrix} -\cos\theta \sin\varphi & \sin\theta & \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix}^T = [a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (2)$$

其中, $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 为 b 系加速度计静态或准静态的输出.

进而得到俯仰角为

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{a_y}{g}\right) \quad (3)$$

横滚角为

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \arctan2(-a_x, a_z) \quad (4)$$

其中,“ $\arcsin(\)$ ”为反正弦函数,“ $\arctan2(\)$ ”为四象限反正切函数.

记 b 系中磁力计输出为 $M^b = [m_x^b \ m_y^b \ m_z^b]^T$, n 系中磁力计输出为 $M^n = [m_x^n \ m_y^n \ m_z^n]^T$.航向角的计算等效于以下两步.

第一步,在不考虑航向角的前提下($\psi=0$), n 系与 b 系磁力计输出的关系为

$$M^n = C_b^n|_{\psi=0} \cdot M^b \quad (5)$$

第二步,根据上式得到的磁力计在 n 系的投影,定义航向角为

$$\psi = \frac{180}{\pi} \cdot \left(\arctan2(m_x^n, m_y^n) + \varepsilon \right) \quad (6)$$

其中, ε 表示磁偏角.由上述步骤可以看出,解析定向方法的成立有以下两个条件.

(1) 静态或者准静态条件.此时,基于加速度计获得俯仰角和横滚角,用来补偿平台非水平对航向角估计产生的误差.该条件通常容易满足,只需满足航迹推算的初始时刻或者在人体运动过程中有某些时刻处于静态或者准静态,甚至结合步态检测、重力补偿以及相关滤波方法可以实现动态条件下俯仰角和横滚角的估计.

(2) 环境磁场不失真条件.该条件是显然的,然而它在室内环境下常常不能被满足.但可以通过磁场模值、磁倾角信息等对磁失真进行判断.

分析上述两个条件可知,由于室内环境磁失真的普遍存在,解析定向方法不能提供鲁棒的定向解.下面将介绍所提出方法如何在磁场失真的时候代替磁场信息提供可信的航向估计;在磁场不失真的时候作为冗余的定向信息源,补偿解析定向方法产生的磁航向误差.

2.2 磁失真度量与判断

在磁失真度量与判断中,若已知加速度计输出 A^b ,磁力计输出 M^b ,磁场模值 M ,磁倾角 γ ,磁偏角 ε ,阈值 th ,可根据解析定向方法获得磁传感器输出在 n 系的投影向量,将其与参考投影向量做叉乘,叉乘结果的2-范数 $\|M^n \times M^{n0}\|_2$ 表征了磁场测量矢量与理论参考矢量的偏差,该偏差在某种程度上度量了磁失真的大小,同时当该偏差超过某个阈值即判定为磁失真,否则认为磁场正常.上述关于磁失真判断的阈值 th 是根据实际情况如精度要求、传感器校准误差、环境噪声等选取

的. 磁失真度量与判断的相关伪码如算法 1 所示.

算法 1 磁失真度量与判断伪码

输入: 加速度计输出 A^b , 磁力计输出 M^b , 磁场模值 M , 磁倾角 γ , 磁偏角 ε , 阈值 th

输出: 磁失真标志 $Flag$, 解析定向磁航向角 ψ

```

1: Input( $A^b, M^b, M, \gamma, \varepsilon, th$ )
2:  $\theta \leftarrow \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{a_y}{g}\right), \varphi \leftarrow \frac{180}{\pi} \cdot \arctan2(-a_x, a_z)$ 
3:  $M^n \leftarrow C_{b|n}^n \cdot M^b$ 
4:  $\psi = \frac{180}{\pi} (\arctan2(m_x^n, m_y^n) + \varepsilon)$ 
5:  $M^n \leftarrow C_b^n \cdot M^b$ 
6:  $M^{n0} \leftarrow [M \cos \gamma \sin \psi \quad M \cos \gamma \cos \psi \quad M \sin \gamma]^T$ 
7: IF  $\|M^n \times M^{n0}\|_2 < th$ 
     $Flag = 0$ 
ELSE
     $Flag = 1$ 
END
8: Output( $Flag, \psi$ )

```

2.3 空间上下文信息提取

空间上下文信息提取, 即根据走廊几何关系生成磁航向角校准库. 这里假设建筑物结构是长方形的, 其内部的走廊结构彼此平行或垂直, 且人员沿着走廊区域行走. 因此只需根据先验信息如楼层图或其他测向装置获得走廊区域的某个航向 ψ_0 , 就可以推算出行人在楼层沿着走廊区域活动时所有可能的四种航向, 即获得磁航向角校准库. 然后需要对磁航向角校准库中的航向角进行象限调整, 使其分布在 $(-\pi, \pi]$ 内, 或角度表示的 $(-180^\circ, 180^\circ]$ 内. 空间上下文信息提取的相关伪码如算法 2 所示.

算法 2 空间上下文信息提取伪码

输入: 参考方向 ψ_0

输出: 航向角校准库 $Heading_Library(1:4)$

```

1: Input( $\psi_0$ )
2:  $Heading\_Library(1) \leftarrow \psi_0$ 
    $Heading\_Library(2) \leftarrow \psi_0 + \pi/2$ 
    $Heading\_Library(3) \leftarrow \psi_0 - \pi/2$ 
    $Heading\_Library(4) \leftarrow \psi_0 - \pi$ 
3: FOR  $i=1:4$ 
   IF  $Heading\_Library(i) < -\pi$ 
      $Heading\_Library(i) \leftarrow Heading\_Library(i) + 2\pi$ 
   ELSEIF  $Heading\_Library(i) > \pi$ 
      $Heading\_Library(i) \leftarrow Heading\_Library(i) - 2\pi$ 
   END
END
4: Output( $Heading\_Library(1:4)$ )

```

2.4 融合定向

融合定向, 即基于解析定向方法得到磁航向角后, 遍历磁航向角校准库, 基于模式匹配思想, 找到与当前磁航向角最接近的参考磁航向角. 若两者偏离程度超过某个阈值 $turn_th$, 则说明磁场失真严重, 用参考磁航向角代替当前磁航向角; 否则将当前磁航向角与参考磁航向角进行融合, 融合后的角度作为当前被校准的磁航向角. 其中在磁失真不严重的情况下, 融合系数 W 可以通过式(7)确定:

$$W = 1 - \frac{DV_{min}}{turn_th} \quad (7)$$

其中, $turn_th$ 为转弯阈值, 默认为 20° ; DV_{min} 为测量磁航向与磁航向角校准库对应航向角在最匹配模式下相应的偏离值, 即匹配误差. 若磁失真严重, 则直接以磁校准库中的航向角作为当前航向角输出, 融合定向的相关伪码如算法 3 所示.

算法 3 融合定向伪码

输入: 磁失真标志 $Flag$, 解析定向磁航向角 ψ , 转弯阈值 $turn_th$

输出: 融合定向航向角 ψ

```

1: Input( $\psi, turn\_th$ )
2: FOR  $i=1:4$ 
    $DV(i) \leftarrow \text{abs}(\psi - Heading\_Library(i))$ 
END
3:  $DV_{min} \leftarrow DV(1)$ 
    $index \leftarrow 1$ 
   FOR  $i=2:4$ 
     IF  $DV_{min} > DV(i)$ 
        $DV_{min} \leftarrow DV(i)$ 
        $index \leftarrow i$ 
     END IF
   END
4: IF  $DV_{min} < turn\_th$  &&  $Flag = 0$ 
    $W \leftarrow 1 - \frac{DV_{min}}{turn\_th}$ 
    $\psi \leftarrow W\psi + (1 - W)Heading\_Library(index)$ 
ELSE
    $\psi \leftarrow Heading\_Library(index)$ 
END IF
5: Output( $\psi$ )

```

至此, 半解析定向方法已介绍完毕, 对其性能的实验和实验结果的讨论将在下面介绍.

3 实验验证和讨论

3.1 走廊实验

基于 MPU9250 或基于 MPU6050+HMC5883 搭建的传感器数据采集模块见已发表的文献[2, 3, 7, 8], 实验的测试场景如图 2 所示, 其中左上角表示实际物理区

域(西安电子科技大学西大楼 II 区和 III 区)的卫星云图的俯视图,其他部分表示该区域对应的第三层的楼层图示意图.示意图中的红色箭头表示可通过的走廊区域,从图中可以看出,各走廊彼此有着明确的几何关系,当行人沿着走廊区域行走和往返时,各航向趋势与走廊方向一致,航向间有 90° 或者 180° 的相位关系.传感器数据采集模块可以佩戴到测试人员脚面/脚踝或脚后跟上,佩戴示意图如图 3 所示.



图 2 半解析定向方法原理框图^[3]

测试人员佩戴好传感器数据采集模块后,按照图 2 所示的实验场景示意图,从 301 门口出发,沿着走廊正常步速行走,行走参考轨迹如图 2 中的红色箭头所示,最后回到出发点.所走的轨迹类似于 T 形,共由五个线段组成,测试结果如图 4 所示,其中红色线对应解析定向法的结果,由于室内磁失真的存在,解析定向法得到的航向角波动幅值达到 50° ,尤其是在 II 区房间 312 和



图 3 传感器模块佩戴示意图

310 附近有大型电磁设备,导致严重的磁失真,测试人员经过该区域时由解析定向法得到的航向角波动高达 100° (对应图 4 中 50s 附近和 120s 附近的解算结果);其中黑色线对应的是由走廊几何关系得到的校准航向角;蓝色线表示半解析定向方法得到的结果.

3.2 方法对比

值得一提的是,笔者团队在已经发表的文献[24]中,展开了很多实验进行磁航向角校准库的确定、更新以及转弯的误差补偿工作,其中航向角的更新结果是以磁航向角校准库(走廊方向)为理论参考的,即权重 W 为 0. 这样处理的原因有两个:第一,没有高精度的航向测量值作为参考;第二,磁场失真严重,由解析定向法得到的航向角几乎没有参考意义.此时,所提出的方

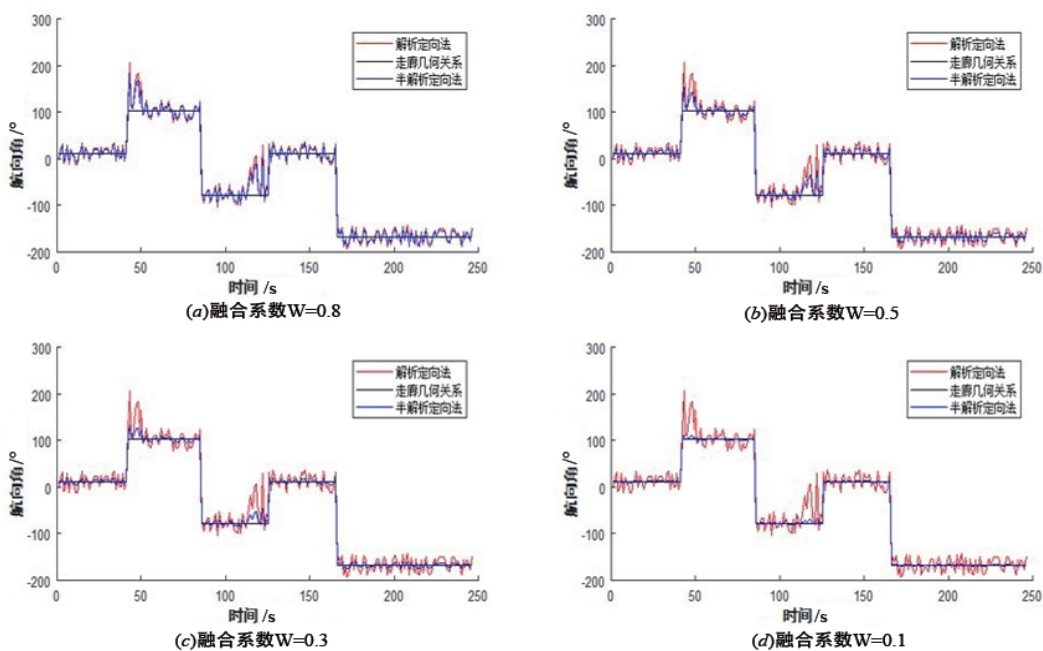


图 4 半解析定向方法测试结果

法与已有先进方法的对比结果如图5所示,其中采用文献[19~21, 24, 26]和本文所提出方法得到的定向均方根误差分别为 1.3° , 1.0° , 0.8° , 2.1° , 1.8° , 0.5° . 可见本文所提出的半解析定向方法具有明显优势,其主要原因是其在多传感器融合定向基础上,又融合了空间上下文信息,定向精度可以进一步提高. 事实上,如何融合空间上下文信息,以及如何评估融合效果的好坏才是关键. 下面进一步讨论将走廊方向这一空间上下文信息直接作为磁航向真值(即 $W=0$)的合理性与可行性.

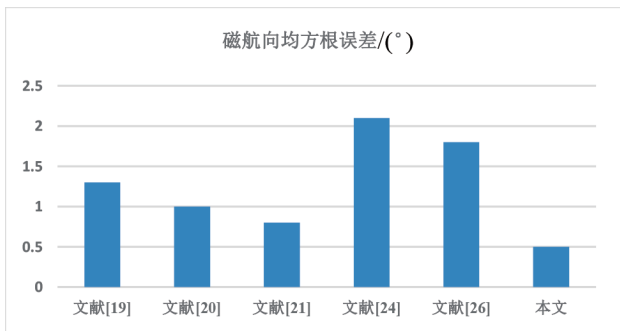


图5 各方法下磁航向均方根误差对比

3.3 融合权重分析

本文对比了不同融合权重对磁航向均方根误差的影响,如图6所示. 随着融合系数 W 的减小,航向角的波动幅度变小,尤其当磁场存在严重失真时,较小的融合系数意味着对磁场数据的依赖越小,由走廊几何关系得到的校准航向可以很大程度地改善定向精度. 结果表明,若以走廊方向为真值评估参考方向,则融合系数越小,定向精度越高. 相比而言,融合系数自适应模式可以显著改善定向精度,但不能提供“最优”的结果. 一方面是由于传感器的校准误差,环境噪声、转弯误差、磁失真判断不完备引起的磁航向残余误差;另一方面,也是更为重要的原因即真值评估参考本身的误差.

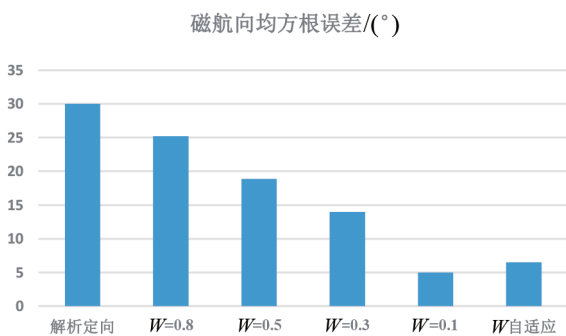


图6 不同融合权重下磁航向均方根误差对比

3.4 结果评估

本文开展了下面的实验,获得将走廊方向作为参

考值时航向角均值和方差随融合系数 W 的变化规律,如图7所示.

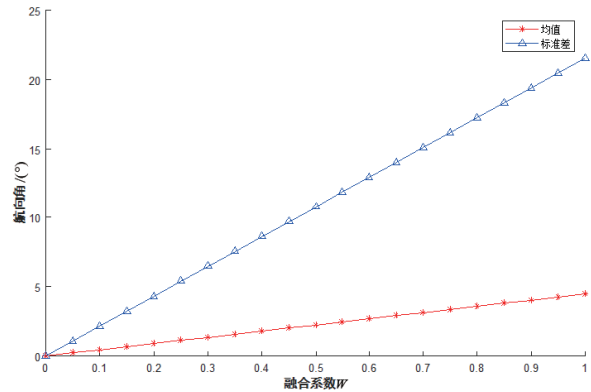


图7 将走廊方向作为航向参考时融合系数 W 对误差的影响

当 $W=0$ 时,航向角的均值误差和标准差都是最小的. 然而真实情况却并非如此,因为测试人员行走过程中不太可能严格按直线行走,即真实的方向轨迹是波动的. 这里列出了另外四种航向参考情况,并对比了半解析定向方法解算的结果在不同航向参考下融合系数 W 对误差指标的影响,如图8所示.

图8(a)是以“走廊方向+随机值序列”作为参考航向,随机值序列是高斯白噪声,用此来模拟真实航向角

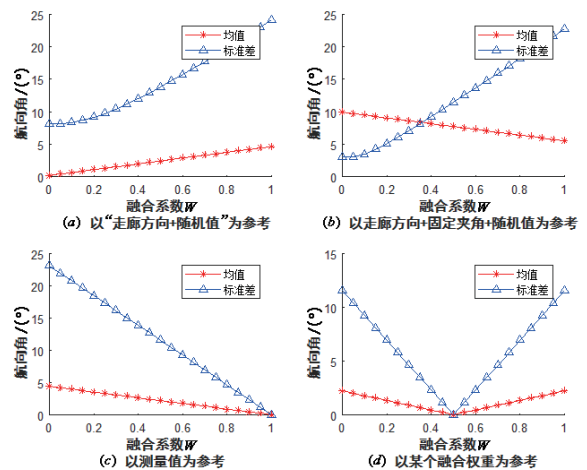


图8 不同航向参考下融合系数 W 对误差指标的影响

的波动. 测试结果表明均值随 W 的变化情况同图7,因为增加的高斯白噪声是零均值的;而标准差随 W 从0到1的变化先从某个值(非零)缓慢增加,然后近似线性增加,这是因为增加的高斯白噪声有某个具有统计特性的固定方差. 该参考看似更加接近真实航向角,然而高斯白噪声的参数很难与实际情况相符. 图8(b)的航向参考是在图8(a)的基础上,增加了一个非零均值(均值为 10°)的高斯噪声,该信息用来模拟测试人员沿着走廊行走时,脚落地后的指向与行进的方向存在的近似

固定的夹角,显然方差的变化趋势类似于图8(a),而均值的变化趋势与图8(a)正好互补(两者之和恒为10),这是由固定夹角导致的.图8(c)则是以不可信的磁数据测量为参考,显然基于该参考对半解析定向方法的评估结果与图7,图8(a)和图8(b)截然相反.相应的图8(d)是以测量和走廊信息的某个融合系数($W=0.5$)为参考的,此时的评估结果呈V形分布的,评估的最优值对应的正是融合系数 $W=0.5$ 处的结果.

由上述分析可见,同样的测量结果,评估的标准不同(不同的航向参考)导致有差异的甚至是不同的评估结论;相反,统一评估标准和评估参数可以进一步促进方法的改善,比如在知道真实参考为图8(b)时,可以将固定夹角这一先验信息和走廊方向信息进行融合,并进一步与解析定向信息进行融合,改善定向精度.

3.5 讨论

综上所述,进一步讨论如下:在没有高精度的航向测量参考时,可以将走廊方向作为一种粗糙的航向参考,虽然这不能计算出精确的误差指标,但可以快速验证方法的有效性,以及粗略估计方法在某些条件下的误差量级.另外需要指出的是,所提出的半解析定向方法只适合有着简单几何关系的走廊区域的人员的定向,虽然大部分定位区域都能满足这一要求,但不可否认,所提出的方法仍对定位场景的先验信息(几何结构、人员行走路径信息等)要求较高,针对一些特殊的场景如空旷的大厅、复杂几何形状的过道等定向精度差,甚至失效.

室内定向作为室内定位的一个重要分支和重要内容,其应用场景包括基于路径的或基于走廊的定位定向场合,如室内环境下人员、机器人、无人车、无人机的运动方向估计、方向校准、定向巡航、定向作业等.所提出方法的应用价值是在磁失真环境下,为上述应用环境提供鲁棒的和较高精度的定向服务.

4 结论

由于室内环境下磁失真严重,基于地磁的解析定向方法很难在室内环境下适用.本文提出一种半解析定向方法来解决上述问题.所提出的方法集磁失真度量与判断、空间上下文信息提取、融合定向于一体,具有较好的鲁棒性,可以有效改善基于路径的或基于走廊的定向精度.同时,值得一提的是,由于人体运动的复杂性和客观条件下缺少可靠的航向测量设备,很难实现磁航向的全轨迹评估;此外,研究磁场波动以及磁失真的有效物理模型,便于从根本上对室内泛在的地磁信号进行实时度量、判断甚至补偿,加上智能的和弹性的融合系数确定策略,有望进一步用好室内地磁,提供定向甚至定位服务.

参考文献

- [1] 中国移动.室内定位白皮书[R/OL].精准定位联盟.[2020].http://www.chuangze.cn/third_1.asp?txtid=1678.
- [2] 刘公绪.室内人员自主定位定向方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2020.
LIU G X. Autonomous Positioning and Orientation Method for Indoor Pedestrians[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [3] LIU G X, SHI L F, XUN J H, et al. An orientation estimation algorithm based on multi-source information fusion[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(11): 1-11.
- [4] LEE K M, KIM Y, YUN J M, et al. Magnetic-interference-free dual-electric compass[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 120(2): 441-450.
- [5] FIORILLO F, SANTONI F, FERRARA E, et al. Soft magnets for passive attitude stabilization of small satellites[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2): 670-673.
- [6] ROETENBERG D, SLYCKE P, VENTEVOGEL A, et al. A portable magnetic position and orientation tracker[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 426-432.
- [7] LIU G X, YU B G, HUANG L, et al. Human-interactive mapping method for indoor magnetic based on low-cost MARG sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [8] LIU G X, SHI L F, CHEN S, et al. Focusing matching localization method based on indoor magnetic map[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(17): 10012-10020.
- [9] LIU G X, SHI L F, XIN D J. Data integrity monitoring method of digital sensors for internet of things applications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 4575-4584.
- [10] LI M, AMMANABROLU J. Indoor way-finding method using IMU and magnetic tensor sensor measurements for visually impaired users[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2021, 3: 1-19.
- [11] SLLIN A, KOK M, WAHLSTRÖM N, et al. Modeling and interpolation of the ambient magnetic field by Gaussian processes[J]. IEEE Transactions on robotics, 2018, 34(4): 1112-1127.
- [12] 吴志东,唐涛,王鼎.基于磁势梯度与高斯过程的空间磁场构建方法[J].电子学报,2020,48(12): 2304-2312.
WU Z D, TANG T, WANG D. An ambient magnetic field construction method based on the gradient of the magnetic potential and Gaussian processes[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(12): 2304-2312. (in Chinese)
- [13] LI T, ZHANG J, WANG S, et al. A novel compensation method for magnetic distortion field with noise uncertain-

- ty[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 9704-9711.
- [14] 王勇, 王沙沙, 田增山, 等. 基于FMCW雷达的双流融合神经网络手势识别方法[J]. 电子学报, 2019, 47(7): 1408-1415.
WANG Y, WANG S S, TIAN Z S, et al. Two-stream fusion neural network approach for hand gesture recognition based on FMCW radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(7): 1408-1415. (in Chinese)
- [15] XU S, YAROVY A. Joint features extraction for multiple moving targets using (ultra-) wideband FMCW signals in the presence of doppler ambiguity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 6562-6577.
- [16] 李双洋, 白宝明, 马啸. 超奈奎斯特传输技术:现状与挑战[J]. 电子学报, 2020, 48(1): 189-197.
LI S Y, BAI B M, MA X. Faster-than-nyquist signaling: Status and challenges [J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(1): 189-197. (in Chinese)
- [17] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [18] LIU Y, ZHU D, PENG J, et al. Real-time robust stereo visual SLAM system based on bionic eyes[J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2020, 2(3): 391-398.
- [19] WILSON S, EBERLE H, HAYASHI Y, et al. Formulation of a new gradient descent MARG orientation algorithm: Case study on robot teleoperation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 183-200.
- [20] MADGWICK S O H, WILSON S, TURK R, et al. An extended complementary filter for full-body MARG orientation estimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 2054-2064.
- [21] WÖHLE L, GEBHARD M. SteadyEye-Head—improving MARG-sensor based head orientation measurements through eye tracking data[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2759.
- [22] 张宏欣, 周穗华, 张伽伟. 三轴磁强计实时自校正算法[J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1750-1757.
ZHANG H X, ZHOU H H, ZHANG J W. Real-Time self-calibration algorithm for three-axis magnetometer[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1750-1757. (in Chinese)
- [23] GU F, HU X, RAMEZANI M, et al. Indoor localization improved by spatial context: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 2019, 52(3): 1-35.
- [24] LIU G X, SHI L F. Adaptive algorithm of magnetic heading detection[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(11): 1-8.
- [25] LIU G, YU B, SHI L, et al. Fast and robust position and

attitude estimation method based on MARG sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.

- [26] ABDULRAHIM K, HIDE C, MOORE T, et al. Using constraints for shoe mounted indoor pedestrian navigation [J]. The Journal of Navigation, 2012, 65(1): 15-28.

作者简介



刘公绪 男, 1992年生, 河南兰考人. 现为西安电子科技大学控制科学与工程流动站博士后, 超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室成员, 电子工程学院讲师. 主要研究方向为室内外无缝定位、光电磁地图重构、多源信息融合等.
E-mail: liugongxu@xidian.edu.cn



高新波 男, 1972年生, 山东莱芜人. 国家“万人计划”科技创新领军人才, 新世纪百千万人才工程国家级人选, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 全国创新争先奖获得者. 现为西安电子科技大学模式识别与智能系统教授, 重庆邮电大学计算机科学与技术教授. 主要研究方向为人工智能、机器学习、图像处理、计算机视觉和模式识别等.

E-mail: xbgao@mail.xidian.edu.cn



何立火 男, 1985年生, 浙江松阳人. 现为西安电子科技大学副教授. 主要研究方向为图像/视频质量评估、认知计算和计算视觉等.

E-mail: lhhe@mail.xidian.edu.cn



解宇 男, 1993年生, 山西交城人. 现为山西大学计算智能与中文信息处理教育部重点实验室讲师. 主要研究方向为深度表示学习、图数据挖掘、人工智能安全等.

E-mail: sxlljexy@gmail.com



路建民(通信作者) 男, 1983年生, 河南安阳人. 于2012年从西安电子科技大学获得电路与系统专业博士学位, 现为西安电子科技大学超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室讲师. 主要从事高速数字中互连线和电源地网络等结构的分析与建模、信号完整性/电源完整性/电磁兼容的分析与设计、光电磁地图重构等领域的研究工作.

E-mail: jmlu@xidian.edu.cn