

Research on Indoor Pedestrian Location Algorithm Based on Magnetometer Array*

LI Taiyu, KUANG Jian*, NIU Xiaoji

(GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: Due to the ubiquity of magnetic field signals, magnetic field positioning has become one of the mainstream consumer indoor positioning methods. Aiming at the low dimensionality of the magnetic field fingerprint observed by a magnetometer, this paper uses an array of 18 magnetometers for magnetic field positioning. By increasing the dimension of the magnetic field fingerprint of a position, the position discrimination of the magnetic field fingerprint is improved, and the purpose of improving the response speed and positioning performance of the positioning system is achieved. The experimental results show that when the length of the magnetic field intensity sequence reaches about 3.5 meters, the magnetometer array method based on the dynamic time warping algorithm can achieve a 90% matching success rate and a positioning accuracy of 0.5 meters.

Key words: indoor positioning, pedestrian positioning, magnetic field matching, magnetometer array

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.10.008

基于磁强计阵列的室内行人定位算法研究*

李泰宇, 旷 俭*, 牛小骥

(武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 由于磁场信号无处不在的特点, 磁场定位已经成为主流的消费类室内定位方法之一。针对 1 个磁强计观测的磁场指纹维度低等问题, 本文使用由 18 个磁强计组成的阵列进行磁场匹配定位。通过增加单个位置的磁场指纹维度, 提升磁场指纹的位置辨别度, 达到提升定位系统的响应速度和定位性能的目的。实验结果表明, 在磁场强度序列长度达到约 3.5 m 时, 基于动态时间规整算法的磁强计阵列方法可达到 90% 的匹配成功率和 0.5 m 的定位精度。

关键词: 室内定位; 行人定位; 磁场匹配; 磁强计阵列

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2020)10-1425-07

因室外环境广泛应用的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 无法穿透到室内环境, 无法提供可靠的室内定位服务, 为了满足人们对室内环境的位置服务需求, 现阶段已有多种室内定位方法被提出。根据定位信号源不同, 国内外学者将室内定位方法分为两大类^[1]: 基于射频信号的室内定位技术, 例如超宽带定位、WiFi 定位等; 基于设备内置传感器的室内定位技术, 如磁场定位、行人航位推算等。其中, 磁场定位因磁场信号无处不在, 信号稳定性好, 以及无需布设额外设备等优点, 倍受学者青睐。

在建筑物内, 由于钢筋等铁磁性物质的存在, 严

重破坏了地磁场, 从而在室内环境中形成特有的磁场异常分布场。Ghodsi^[2], Angerman^[3] 等研究现代建筑的内部结构与磁场变化特征之间的联系, 表明不同的建筑物结构及不同的室内环境磁场变化快慢不同。非磁性建筑物指的是由低磁钢筋混凝土建成的建筑物^[4], 测试表明这种结构的建筑物本身也存在磁场, 会使建筑物内空间的磁场分布不均匀。Li^[5] 通过实验证明了磁场用于室内定位的可行性。针对建筑物内不同位置磁场的差异性和可行性, 学者提出了诸多磁场定位方法。Haverinen^[6] 使用粒子滤波技术进行磁场定位; Subbu^[7] 引入动态时间规整 (Dynamic Time Warping, DTW) 算法进行磁场

项目来源: 国家重点研发计划子课题项目 (2016YFB0502202)

收稿日期: 2020-06-19 修改日期: 2020-09-24

定位; Du^[8] 根据磁场值的方差将目标区域划分为波动区域和稳定区域,在此基础上采用改进的分段 K 近邻(K Nearest Neighbor, KNN) 算法进行定位; Lee^[9] 通过从磁场序列中提取特征,利用深度神经网络对磁性标志进行特征分类从而实现定位等。

目前,制约磁场定位性能提升的最大因素是如何提升单个位置的磁场指纹辨别度。常见方法有:①扩展磁场指纹维度^[10],比如使用北向、东向和垂向 3 维指纹或水平和垂直 2 维指纹,但这类方法依赖于传感器姿态角估计精度;②将连续多给位点的磁信号进行矢量化处理^[11],但该方法依赖精准可靠的轨迹形状;③将位置的磁偏角作为一个维度的磁场指纹加入到磁场匹配算法^[12]等等。

上述方法只能利用单一位置处的单点磁场信息,无法利用该位置处周边的空间磁场信息。考虑到磁场强度随距离磁体的三次方递减,而距离墙体距离不同,磁场也会发生变化。为此,本文尝试使用磁阵列测量同一点位在垂直面内多个相邻空间位置的磁场信息,从而构建单个地理位置的高维磁场空间指纹信息,达到提升位置辨别度的效果。

1 理论方法

室内磁场定位主要分为两个部分:磁场指纹库构建和实时匹配定位^[10]。磁场指纹库构建,是指建立磁场指纹与地理位置的一一映射关系;实时匹配定位,是指在指纹库数据库中查询与当前观测磁场指纹库最相似的参考磁场指纹,并输出对应的地理位置。

1.1 磁强计标定

由于器件生产装配等工艺差异和受外界铁磁物质和铁磁环境的影响,磁强计观测值通常包含多种误差,导致无法反映真实的环境磁场。因此,在进行磁场定位前,需要对磁强计进行标定校准工作。其中,磁强计误差主要包括:零位偏差、交轴耦合、比例因子、软磁和硬磁效应。而对于消费级磁强计,由传感器零位偏置和硬磁效应形成的等效零偏误差远大于其他部分的误差(如交轴耦合和比例因子等)。因此,本文对磁强计的误差模型进行简化,只考虑磁强计的零偏误差。简化后的磁强计观测值与真实值之间的关系描述如下

$$\hat{\mathbf{M}} = \tilde{\mathbf{M}} - \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{M}} = [\hat{m}_x \quad \hat{m}_y \quad \hat{m}_z]^T$ 为真实的环境磁场强度观测值, $\tilde{\mathbf{M}} = [\tilde{m}_x \quad \tilde{m}_y \quad \tilde{m}_z]^T$ 为 3 轴磁强计测量值, $\mathbf{B} = [b_x \quad b_y \quad b_z]^T$ 为 3 轴磁强计零偏。

常用的磁强计标定方法有椭球拟合法^[13]、高斯

牛顿迭代法^[14]等。考虑到磁场标定工作的操作便捷性和标定精度需求,本文选择椭球拟合法进行磁强计零偏标定。该方法基于单点位置的磁场总强度模值不变的假设,当磁强计绕着传感器测量中心旋转时,磁强计观测值分布在一个椭球面上,而对应的椭球中心则为待估计的磁强计三轴零偏。具体标定算法请参考文献[13]。

相较于一个磁强计,磁强计阵列在结构上有一定的区别,如图 1 所示,18 个磁强计以相同间距排列,从而组成 0.5 m×0.2 m 的平面。当对磁强计阵列进行旋转标定时,整个磁强计阵列设备绕着阵列中心点进行旋转,此时当空间磁场变化剧烈时(比如室内环境),不能认为磁场总强度模值不变。因此,磁强计阵列标定工作在室外空旷场地进行,认为室外场景无干扰源,可满足局部小范围内磁场强度总模值处处相同。

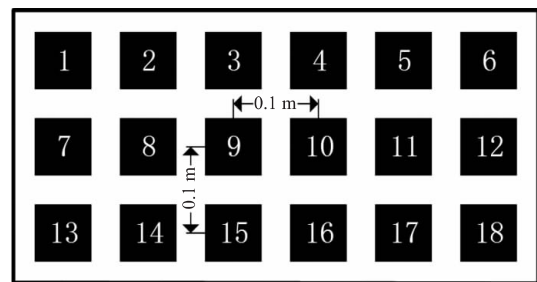


图 1 磁强计阵列结构示意图

图 2 给出了磁强计阵列零偏标定前后的磁场强度观测值比较。从图中可以看出,标定所有磁强计的零偏并补偿后,所有磁强计观测值都重叠在一起,说明磁强计观测值得到了有效地补偿。

1.2 磁场指纹库构建

磁场指纹库是磁场特征匹配定位的基础,且磁场指纹库的形式决定磁场匹配算法的选取。磁场指纹库的基本元素包括:参考点坐标和磁场信息。其中,本文磁场指纹库中参考点坐标以数据采集阶段的轨迹顺序存储,即按照逐条轨迹的形式存储,然后对每个地理位置赋予磁场信息,从而形成磁场指纹库。

数据采集阶段,本文假设已经通过其他方式(比如地图)提前获得少量的已知坐标点(控制点)。然后,从一个控制点向着另一个控制点进行匀速直线行走,并记录每次经过控制点的时间,从而完成磁场指纹数据的快速采集^[15],对应的地理位置标签采用线性内插方法给出。图 3 为数据采集人员行走示意图, L_1, L_2, L_3 表示控制点,菱形代表脚步,每次经过控制点则通过数据采集软件记录时间。需要说明的是,本文磁强计阵列采集的数据是当前地理位置对应的一个空间面型的空间磁场强度信息,正反向

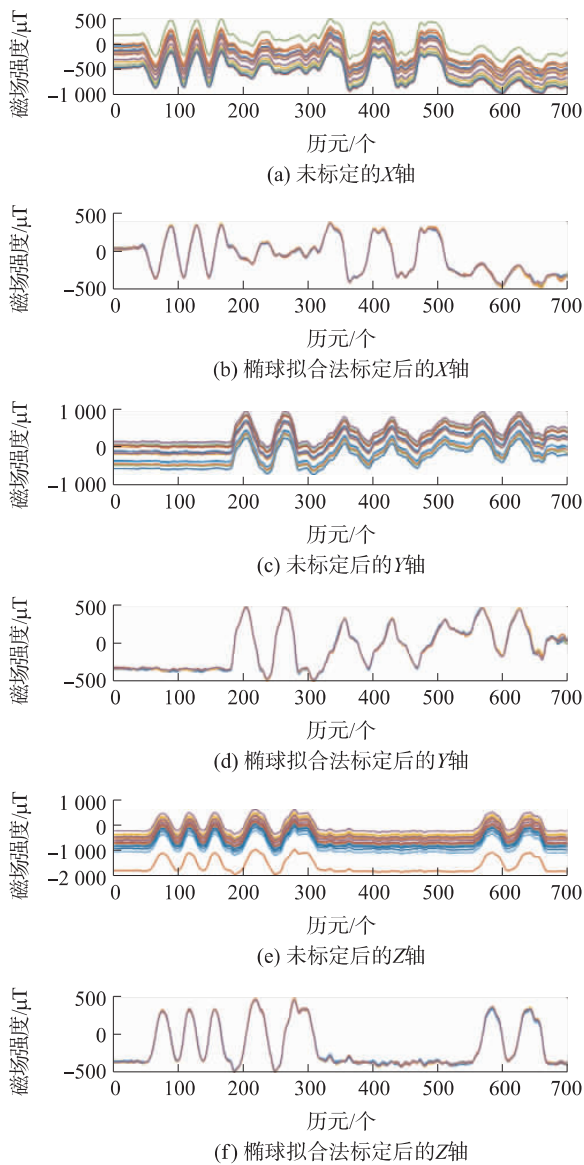


图 2 标定前后的磁强计观测值对比

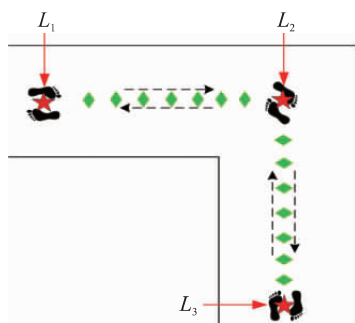


图 3 磁场数据库采集示意图

行走到同一个地理位置时,对应的某空间位置点上并不是同一个磁强计。为了避免磁强计差异的影响,相同的轨迹需正反采集两次,生成两条不同磁场指纹。

数据采集完成后,结合经过控制点的时间,提取出该时间段内 MEMS IMU 微机电系统惯性测量单

元(Micro-Electro-Mechanical System Inertial Measurement Unit, MEMS IMU)输出的加速度计数据,并进行脚步探测(脚步探测方法见 1.3 节描述),从而获得总脚步数量;接着,基于步长不变的假设,对两个控制点之间的距离进行均匀分配,并结合当前控制点到下一个控制点的直线方向,获得每个脚步点的位置坐标,即图 3 中菱形的坐标;最后,假设一个脚步周期内为匀速运动,使用线性内插的方法获得脚步时间点之间的位置坐标。基于上述方法,就能够获得所有时间点对应的地理位置坐标。

基于时间信息,即可关联地理位置坐标和磁强计阵列观测值。为了获得准确的磁场信息,本文进行以下处理:首先,通过 1.1 中的标定方法求出各磁强计零偏,对所有磁强计观测值进行零偏扣除,获取较为准确的磁场值;然后,对单个磁强计的观测值求模值处理,降低对传感器姿态的依赖,最后,使用均值滤波,降低磁强计噪声的影响。其中,磁强计阵列之间的空间关系通过预设的编号确定。最终,本文存储的磁场指纹形式表述如下:

$$FP_k = \{ P_k \parallel M_1 \parallel_k \cdots \parallel M_n \parallel_k \} \quad (2)$$

式中: FP_k 为第 k 个指纹点, P 为指纹对应的地理位置坐标向量, $\parallel M_n \parallel$ 为指纹对应的第 n 个磁强计的磁场强度模值。

另外,考虑到磁场强度随空间变化而不同和数据采样率高的(比如 50 Hz)特点,本文对高采样率的原始磁场指纹进行重采样,即间隔一定距离(本文设置为 0.1 m)生成一个磁场指纹,通过将该距离内的磁场强度进行均值处理生成新的磁场指纹,从而在不损失定位性能的条件下,减少磁场指纹库存储量的目的。

1.3 实时匹配定位算法

实时匹配定位是指从指纹库中查找与当前观测的磁场指纹最相似的磁场指纹,并输出对应的地理位置作为匹配定位结果。对于磁强计阵列而言,虽然通过增加磁强计数量提升了不同位置的辨别度,但仅依靠磁强计阵列在单点位的位置辨别度仍无法满足磁场匹配定位。因此使用磁场序列用于匹配定位进一步提升定位性能。当前动态时间规整(DTW)算法是应用最多的磁场序列匹配算法^[16],主要原因是 DTW 算法能够局部压缩或拉伸序列,从而达到两个序列相似度最优计算,能够很好地适应行人室内定位场景行人运动速度无法准确估计的现象。本文使用 DTW 算法进行磁场匹配定位。

磁场匹配定位流程主要步骤如下:

- ①观测的磁场序列生成。定位请求启动后,累

积观测的磁场数据,并进行零偏扣除和均值滤波处理,获得磁场指纹序列。另外,由于磁场分布与空间相关,使用脚步检测模块对用户的行进距离进行粗略的计算,以便使用足够空间距离的磁场序列进行匹配定位。本文使用加速度模值波峰进行脚步探测,即脚步判断窗口中间时刻的加速度模值等于这一窗口内加速度模值的最大值为一个脚步点^[10],具体公式如下:

$$\|f_b\|_{l/2} = \text{Max}\{\|f_b\|_1 \cdots \|f_b\|_{l/2} \cdots \|f_b\|_l\} \quad (3)$$

式中: $\|f_b\|$ 为加速度模值, l 为窗口长度。

②候选参考磁场序列生成。为了提供分辨率更高的匹配定位结果,需要将参考指纹库中的磁场长序列分解成多个短序列。具体思路如下:首先,设定磁场序列匹配长度为 N 个脚步,然后,假设行人步长固定为 L ,磁场指纹的位置分辨率为 f ,此时第 1 个参考磁场序列由第 1 到 $L \times N / f$ 个数据组成;接着,第 2 个磁场序列由第 $L/2 \times f$ 到 $L \times (N+1) / f$ 个数据组成;最后,以此类推,生成所有的候选参考磁场序列。

③磁场序列相似度计算。记观测的磁场序列 $\mathbf{M} = [\mathbf{M}_1 \cdots \mathbf{M}_n]^T$, 候选的磁场序列 $\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1 \cdots \mathbf{N}_m]^T$ 。采用 DTW 算法的基本思路:首先,计算距离矩阵 \mathbf{D} , 距离矩阵则为 $n \times m$ 维,某一元素则通过以下公式计算:

$$d(i, j) = \|\mathbf{M}_i - \mathbf{N}_j\| \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_i = [M_i^1, \cdots, M_i^k]$ 和 $\mathbf{N}_j = [N_j^1, \cdots, N_j^k]$ 分别代表磁强计阵列观测值向量。然后,从距离矩阵中搜索最短路径。采用的搜索方法为:第一个点 $D(1, 1)$ 从出发,从点 $d(i+1, j)$, $d(i, j+1)$, $d(i+1, j+1)$ 中选择距离值最小的点作为进格点,直到到达最后一个格点 $D(n, n)$,再求得相似度 dist 。 dist 值越小,波形相似度越高。

$$D(i, j) = D(i-1, j-1) + \min\{d(i+1, j), d(i, j+1), d(i+1, j+1)\} \quad (5)$$

式中: $D(i, j)$ 为矩阵第 i 行第 j 列的格点处最优路径的累计距离。

2 实验过程及结果分析

2.1 实验描述

本文使用的实验设备为自主研发的磁强计阵列,如图 4 所示,由 18 个磁强计和 1 个惯性传感器模块构成(白色模块为惯性传感器,惯性传感器器件精度如表 1 所示;红框部分为磁强计,磁强计型号为: Honeywell HMC5983,测量范围为 ± 8 Gauss,测量

精度为 2 mGauss,航向精度为 $1 \sim 2^\circ$)。磁强计呈 3 行排列,每行 6 个,相邻两个磁强计之间的距离相同,为 0.1 m,图 4 中磁强计与图 1 采用相同的编号;惯性传感器分布在中间磁强计附近,用于检测行人脚步。数据采集阶段,由手机发送命令开始和停止,可实现所有磁强计和惯性传感器时间同步。磁强计阵列和惯性传感器模块数据存在内置的存储卡中,数据采集频率为 50 Hz。

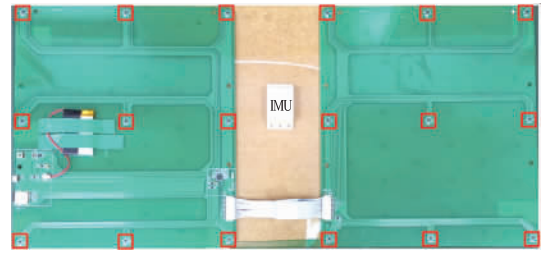


图 4 磁强计阵列实物图

表 1 IMU 器件精度

指标参数	陀螺	加速度计
动态范围	2 000 °/s	16 g_n
零偏不稳定性	10 °/h	0.2 mg_n
传感器噪声	0.24 °/ \sqrt{h}	0.06 $m \cdot s^{-1} \cdot h^{1/2}$

实验场地位于武汉市武汉遥感与空间信息工业技术研究院办公楼 2 层~3 层走廊(简称:场景 1)。图 5 给出了办公楼的几何结构图,走廊由直线组成,总长度约为 90 m。实验阶段,测试人员在 2 层行走一个来回,然后上 3 层,同样行走一个来回,累计行走长度约为 360 m,约行走 520 步,行走轨迹如图 5 所示。

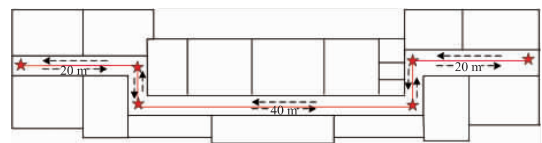


图 5 测试轨迹示意图

为探索磁强计数量及匹配序列长度(即 1.3 中的观测的磁场序列)对位置辨别度的影响,本文设计了如下实验:如图 6 所示,手持磁阵列,选择一个磁强计(如 9 号)、一行 1×6 个磁强计(如 7 号~12 号)和所有 3×6 磁强计阵列(如 1 号~18 号)。使用单个点位的观测值,分别构成点、线和面空间形式的磁场指纹特征。接着,设置不同行走距离得到不同长度的磁场序列,从而形成线、面和体空间形式的磁场指纹特征,并使用 DTW 算法进行匹配定位。重复进行上述各种配置下的实验 3 次。基于磁场匹配的定位方法通常假定磁场不随高度变化^[6,9],实测表明,使用一列 3×1 磁强计相较于使用单个磁强计进行磁场匹配的定位结果改进效果不明显,是因为

建筑物结构中对建筑物内环境磁场影响较大的铁磁性物质主要由垂直方向的梁柱造成^[17], 故在后续测试结果中未做讨论。



图 6 测试人员持握磁强计阵列示意图

本实验中, 定位阶段采用与构建指纹库时相同方法获得参考位置。定位结果评价指标包含匹配成功率和定位精度。匹配成功的条件是楼层匹配正确且位置误差小于 10 m, 匹配成功率即为匹配成功的定位结果在所有定位结果中的百分比。定位精度即定位误差, 为所有匹配成功的点的位置误差均值。位置误差为磁场定位算法输出的位置与参考位置的空间距离。为更好的呈现实验结果, 小节 2.2 和 2.3 的实验使用的都是相同的数据, 将 3 次实验结果求平均后作为最终实验结果进行详细说明。

2.2 单点位匹配

为体现磁强计阵列可以提升不同位置的磁场辨别度, 从 2 楼走廊中截取出一段长度为 30 m 的磁场强度变化较小的区域(其余区域磁场强度变化较大), 图 7 为该区域的磁场强度分布图。以该走廊非急剧性磁场变化部分为例(如 0~5 m, 6 m~8 m, 20 m~24 m 等), 单个磁强计在该区域内测出的走廊磁场变化不到 20 μT , 走廊长度方向不同位置的磁场特征相似, 位置辨别度很低; 而磁强计阵列在该区域中任意一点, 测出垂直面内相邻空间位置的磁场变化可达 20 μT ~50 μT , 且在走廊长度方向不同位置的垂直面内相邻空间位置的磁场变化不同, 从而显著提升了不同位置的磁场辨别度。

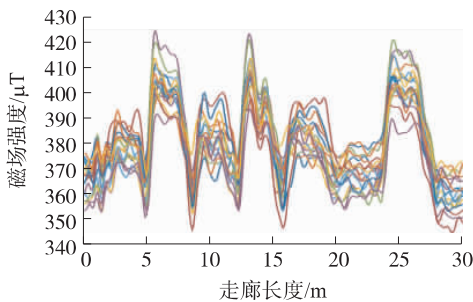


图 7 磁阵列测得的走廊磁场变化图(共 18 个磁强计)

为了定量分析磁强计阵列提升磁场指纹位置分

辨率后, 带来的定位性能提升。图 8 给出了基于不同数量磁强计的磁场匹配定位误差累积分布图。定位误差累积分布图的横坐标为位置误差, 纵坐标为所有定位结果中位置误差小于某个值所占百分比(误差累积分布图中曲线斜率越大, 定位效果越好), 以(1 m, 40%)为例, 它表示共计 40% 的定位结果位置误差小于 1 m。可以看出, 随着磁强计数量的增加, 相同定位误差处, 累计百分比明显升高。表 2 统计了不同数量磁强计对应的点匹配定位位置误差及匹配成功率。可知, 相较于使用单个磁强计, 使用一行磁强计进行匹配定位, 定位精度提升了 38.9%, 匹配成功率提升了 76.2%; 使用 18 个的磁强计, 定位精度提升了 63.9%, 匹配成功率提升了 222.8%。因此, 使用磁强计阵列可以提升单个位置的磁场辨别度。在磁强计间距相同情况下, 数量越多, 位置辨别度提升越大, 不同位置的磁场特征更加独特, 从而能够明显提升定位精度和匹配成功率。

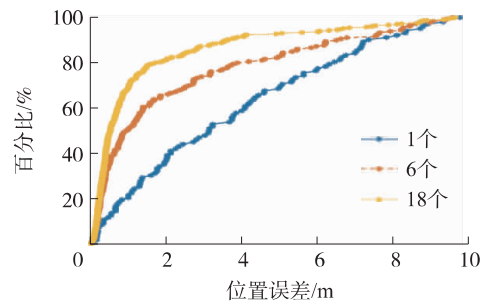


图 8 场景 1 单点位匹配定位误差累积分布图

表 2 单点位匹配定位结果统计表

磁强计配置	单个	1×6=6 个	3×6=18 个
定位精度	3.6 m	2.2 m	1.3 m
匹配成功率	19.3%	34.0%	62.3%

2.3 序列匹配

由 2.2 节可知, 磁强计阵列可以通过提高单个位置的辨别度来实现定位精度及匹配成功率的提升。然而, 18 个磁强计阵列的匹配成功率依然只有 62.3%。使用多个连续历元的磁场信息组成磁场序列, 通过序列匹配可以提升磁场信息的辨别度。本部分通过设置不同长度的磁场强度序列进行匹配, 探究基于磁强计阵列的磁场定位性能。

本实验假设行人向前迈出一步的距离固定为 0.7 m, 分别选取 1 个、3 个、5 个、7 个、10 个行人脚步对应的磁场强度序列, 即 0.7 m, 2.1 m, 3.5 m, 4.9 m, 7 m, 进行匹配定位。

图 9~图 11 给出了 1 个、6 个和 18 个磁强计对应的定位误差累积分布。可以看出, 使用相同数量

的磁强计,越长的磁场强度序列长度,在相同定位误差处的百分比越高;使用相同长度的磁场强度序列时,磁强计数量越多,在相同定位误差处的百分比越高。

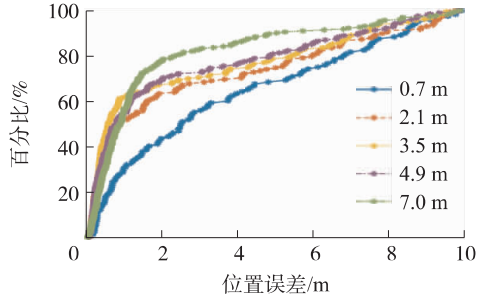


图 9 使用单个磁强计匹配定位误差累计分布图

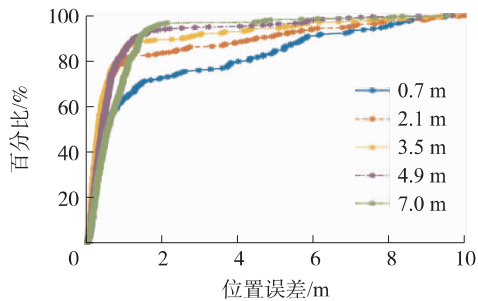


图 10 使用一行(1x6)磁强计匹配定位误差累计分布图

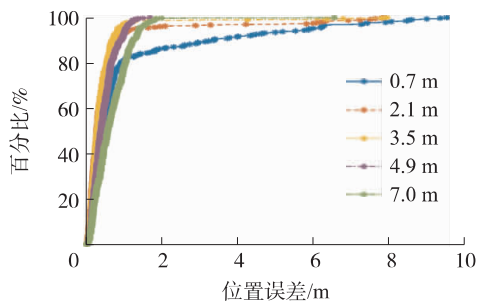


图 11 使用全部(3x6)磁强计阵列匹配定位误差累计分布图

表 3 统计了不同磁场序列长度下,不同数量磁强计对应的磁场定位误差和匹配成功率(括号内)。

表 3 场景 1 不同匹配序列长度的定位结果统计表

序列长度/m	单个	1x6=6 个	3x6=18 个
0.7	3.5(23.3%)	1.9(40.1%)	1.1(65.6%)
2.1	2.6(32.0%)	1.2(61.2%)	0.6(80.7%)
3.5	2.3(38.7%)	0.9(76.6%)	0.5(90.0%)
4.9	2.2(46.4%)	0.8(84.5%)	0.5(94.7%)
7.0	1.8(56.0%)	0.9(90.0%)	0.6(97.6%)

从表 2 可以看出:

①使用多个磁强计提升了单个点位的磁场指纹辨别度后,可以降低对磁场强度序列长度的依赖。

比如单个磁强计即使在磁场序列长度为 7.0 m 条件下,匹配成功率也仅有 56%;而 6 个磁强计能够在磁场序列为 2.1 m 时即可达到匹配成功率 61.2%;相较而言,18 个磁强计则可在磁场序列仅为 0.7 m(一个脚步)时即可达到匹配成功率 65.6%。

②磁强计阵列所带来的磁场指纹辨别度提升,能够最终带来定位精度的提升。比如使用 6 个磁强计的匹配定位,随着匹配序列长度的增加,定位误差最终收敛到 0.8 m~0.9 m;而使用 18 个磁强计的阵列,定位误差最终收敛到 0.5 m~0.6 m。

③对于由 18 个磁强计组成的 3x6 阵列而言,匹配序列长度达到 3.5 m(即 5 个脚步)即可达到理想的定位效果(90%匹配成功率和 0.5 m 精度)。而当没有条件使用完整的磁阵列时,单行 1x6 的磁强计配置在匹配序列大于 4.9 m(即 7 个脚步)时,也能取得实用的定位效果(80%~90%匹配成功率和 0.8 m~0.9 m 精度)。

3 结论

目前,室内磁场特征匹配定位技术最大的制约因素是如何提升单个点位上的磁场指纹辨别度,本文通过使用由 18 个磁强计组成的 3x6 阵列来提升不同位置的磁场指纹辨别度,探究了磁强计数量及磁场匹配序列长短对定位效果的定量影响。

典型室内走廊环境的多组实测结果表明:使用单磁强计进行磁场匹配定位,匹配成功率低且定位精度差;而使用由 18 个磁强计组成的阵列,仅需 3.5 m 长度(5 个脚步)的磁场强度序列即可达到 90%的匹配成功率和 0.5 m 的定位精度。

参考文献:

- [1] 陈锐志,陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报,2017,46(10):1316-1326.
- [2] Mojtaba Ghodsi, Sased Mohammad Reza Loghmanian. Effect of Forging on Ferromagnetic Properties of Low-Carbon steel [C]// Modeling, Simulation and Applied Optimization(ICMSAO), 2011 4th International Conference on. IEEE, 2011.
- [3] Angermann M, Frassl M, Doniec M, et al. Characterization of the Indoor Magnetic Field for Applications in Localization and Mapping [C]//2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN). IEEE, 2013.
- [4] 刘大明,郭成豹. 非磁性建筑物空间磁场预测技术[J]. 海军工程大学学报,2005(1):36-40.
- [5] Binghao Li, Thomas Gallagher, Andrew G Dempster, et al. How Feasible is the Use of Magnetic Field Alone for Indoor Positioning? [C]//Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), 2012 International Conference on. 2012.

- [6] Haverinen J, Kempainen A. Global Indoor Self-Localization Based on the Ambient Magnetic Field [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(10) : 1028–1035.
- [7] Subbu K P, Gozick B, Dantu R. Indoor Localization Through Dynamic Time Warping [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Anchorage, Alaska, USA*. IEEE, 2011.
- [8] Du Y, Arslan T. Magnetic Field Indoor Positioning System Based on Automatic Spatial-Segmentation Strategy [C] // *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE, 2017.
- [9] Lee N, Han D. Magnetic Indoor Positioning System Using Deep Neural Network [C] // *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2017: 1–8.
- [10] 旷俭. 基于捷联 PDR 和磁场特征匹配的智能手机多源室内定位算法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [11] Shu Y, Bo C, Shen G, et al. Magicol: Indoor Localization Using Pervasive Magnetic Field and Opportunistic WiFi Sensing [J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2015, 33(7) : 1443–1457.
- [12] 保金宏, 尚俊娜, 施浒立. 基于动态时间规整的磁偏角修正地磁匹配导航算法 [J]. *传感技术学报*, 2019, 32(10) : 1499–1506.
- [13] 李勇, 刘文怡, 李杰, 等. 基于椭圆拟合的三轴磁传感器误差补偿方法 [J]. *传感技术学报*, 2012, 25(7) : 917–920.
- [14] 庞鸿锋, 潘孟春, 王伟, 等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(7) : 67–72.
- [15] Jian Kuang, Xiaoji, et al. Indoor Positioning Based on Pedestrian Dead Reckoning and Magnetic Field Matching for Smartphones. [J]. *Sensors*, 2018.
- [16] 李由. 基于 MEMS 惯性传感器、WiFi、磁场特征的移动智能终端室内行人导航算法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [17] Gozick B, Subbu K P, Dantu R, et al. Magnetic Maps for Indoor Navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(12) : 3883–3891.



李泰宇(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为室内定位, taiyuli@whu.edu.cn;



旷 俭(1990—), 男, 博士后, 主要研究方向为行人导航、室内定位、组合导航, kuang@whu.edu.cn;



牛小骥(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事惯性导航和多源信息融合导航方面的研究, xjniu@whu.edu.cn。