

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.05.002

基于低频磁信标的全天时自主定位方法

王冠, 夏红伟, 刘超越, 马广生, 王常虹

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 由于以 GPS、北斗为代表的 GNSS 信号容易受到天气和位置的影响, 单纯使用 GNSS 在某些条件下会有较大的定位误差, 甚至无法提供定位服务。针对这种情况研究了基于低频磁信标的自主定位方法, 分析了电磁学中的毕奥-萨伐尔定律等原理, 建立了基于低频磁信标定位的系统模型, 给出了分离式双信标定位方法。通过实验分析了信标安装的误差特性, 最后通过仿真和实际实验验证了该定位方法的有效性, 对于室内机器人导航、地下生物探索、水下跟踪定位等单独采用 GNSS 定位影响较大的场景下的自主定位与导航具有重要的工程应用价值。

关键词: 低频磁信标; GNSS; 自主定位方法

中图分类号: V249

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)05-0007-06

All-Day Autonomous Localization Method Based on Beacons of Low Frequency Magnetic Field

WANG Guan, XIA Hong-wei, LIU Chao-yue, MA Guang-sheng, WANG Chang-hong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Since the GNSS signals represented by GPS and Beidou can be easily affected by weather and location, the use of GNSS alone may have large positioning errors under certain conditions and may not even provide positioning services. Aiming at this problem, the autonomous positioning method based on low frequency magnetic beacon is studied, the principle of Biot-Savart law in electromagnetism is analyzed, a system model based on low frequency magnetic beacon positioning is established, and a separate double beacon positioning method, which is used to analyze the error characteristics of the beacon installation, is given. Finally, the effectiveness of the positioning method is verified by simulation and experiments. It has important engineering application value for autonomous positioning and navigation in many situations, such as indoor robot navigation, underground biological exploration, underwater tracking and positioning, where the results of GNSS positioning may be greatly influenced.

Key words: Beacons of low frequency magnetic field; GNSS; Autonomous localization method

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61304108)

作者简介: 王冠(1994-), 男, 研究生, 主要从事导航定位技术方面的研究。

通信作者: 夏红伟(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事飞行器导航、控制与仿真技术的研究。

E-mail: xiahongwei@hit.edu.cn

0 引言

在现代生产生活中,导航技术关系到生产生活的各个方面^[1-2]。以全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、北斗为代表的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)作为当前应用最广的定位导航手段^[3],在一些特殊环境下,如地下、水下、室内、城市或高山峡谷等地区,GNSS信号容易受到干扰,有被阻断的风险。此外,基于超声波^[4]、光学^[5]、超宽带^[6](Ultra Wideband, UWB)、射频^[7](Radio Frequency, RF)窄带信号的定位方案,典型的如 ZigBee^[8]技术使用现有的硬件,具有低功耗、低成本的特性,但在室内环境中的性能可能因为多径或带内干扰而降低。低频准静态磁场^[9]有2个优势,一是能穿透树叶、土壤、建筑物、水、岩石和许多其他类型的介质;另一个优势是不受恶劣的天气条件和昼夜变化的直接影响。其穿透力强、损失小、不易受干扰等特点^[10],使得磁信标定位定向方法显示出独特的优越性和广阔的应用前景,在许多室内和室外的应用十分方便,低频磁信标的使用已经成为一项具有竞争力的技术,在定位、通信、石油勘探、低空物探及测绘^[11]等多个技术领域具有重要的应用前景。

国外学者提出了许多有价值的利用磁场进行导航定位的技术,典型的如美国人 Saxena 利用地磁匹配手段进行定位^[12]。美国雷神公司提出的类 GPS 方法^[13],如图 1 所示,主要原理是利用 3 个以上的磁信标,利用差分几何算法仿照 GPS 定位原理,通过卡尔曼滤波技术进行数据优化。根据已知的绝对位置得到待测目标的实际位置,此研究并未说明具体的解算步骤和相关误差方程等细节问题,但却为利用交变磁场定位提供了一种新思路。意大利人 PaTsku 提出了磁测距和航位推算融合^[14],如图 2 所示。结合电磁感应定律场源位置与信号接收器的关系,利用三维位置与方向融合的方法进行定位。英国人 Markham 利用多磁线圈追踪地下生物^[15],如图 3 所示。这种方案的原理依旧是电磁感应原理的相关知识,其设计为天线阵列的布局,信标均悬挂在地面以上 1.2m 处,如图 4 所示。Arie Sheinker^[16]提出了可以实现平面和立体测量的磁信标定位方法,上述方法具有各自的优势和特点,但大多停留在理论实验验证阶段,实际定位效果如何急需工程实践进行分析验证。

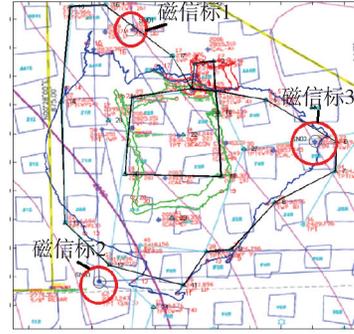


图 1 类 GPS 定位方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of positioning method similar to GPS



图 2 洞穴双磁线圈示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double magnetic coil in cave

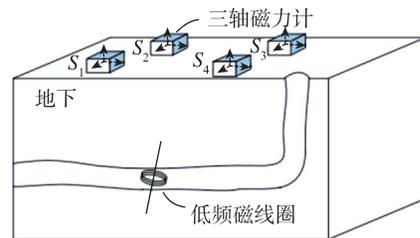


图 3 地下多磁信标示意图

Fig. 3 Underground multi-magnetic beacon

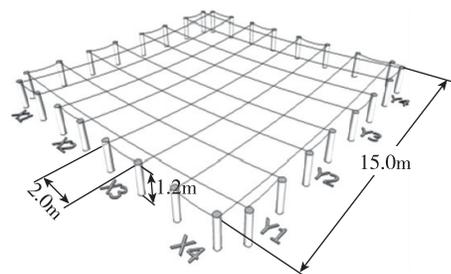


图 4 天线阵列布局的磁信标

Fig. 4 Magnetic beacon for antenna array layout

在这种背景下,本文在 Arie Sheinker 等研究成果的基础上,研究了一种低频磁信标定位方法,分析了该定位技术的工程应用问题,并通过仿真以及

实地陆测、海测等实验验证了方法的有效性和可行性。

1 毕奥-萨伐尔定律

低频磁场定位技术最基本的原理是静磁学中的毕奥-萨伐尔定律(Biot-Savart Law)。在静磁学中,毕奥-萨伐尔定律于 19 世纪初期被提出并用于描述电流源与磁场的关系,具体如下

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (1)$$

并且有如下关系,

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \oint d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3} \quad (3)$$

式(2)和式(3)称为毕奥-萨伐尔定律。

毕奥-萨伐尔定律由于在实验中无法得到电荷能在其中做恒定运动的电流元,因而不能直接由实验验证,但是当把它应用到各种电流分布时,计算得到的总磁感应强度和实验测得的结果相符,因而间接证明了其正确性。

2 分离式双信标定位方法

对于一个空心载流线圈产生的磁场,电流 I 通过 N 匝的面积为 A 的线圈,通常产生磁矩表达式

$$\mathbf{M} = A \cdot N \cdot I \quad (4)$$

由式(4)知,磁矩 \mathbf{M} 是具有线圈轴线方向的矢量。在大于线圈最大尺寸但小于激励电流的电磁波长的距离上,由线圈产生的磁场可表示为偶极子域。磁感应强度关系式如下^[16]

$$\mathbf{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) r^{-5} [3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - \mathbf{M}r^2] \quad (5)$$

磁场强度 \mathbf{H} 由式(5)得

$$\mathbf{H} = r^{-5} [3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - \mathbf{M}r^2] \quad (6)$$

这里, r 是从测量点到线圈的矢量, μ_0 是自由空间的磁导率。由式(6)可以看出,磁场强度的大小是磁矩 \mathbf{M} 和 r^{-3} 的线性函数。

假设要定位的对象仅在 $x-y$ 平面中移动,因此可以仅使用 2 个坐标描述其位置

$$r = x\hat{x} + y\hat{y} \quad (7)$$

其中, M_1 在 x 方向上具有幅度的信标的磁矩由式(8)给出

$$\mathbf{M} = M_1\hat{x} \quad (8)$$

并且有如下关系

$$\mathbf{H}_1 = M_1 [(3x^2r^{-5} - r^{-3})\hat{x} + (3xyr^{-5})\hat{y}] \quad (9)$$

用 a_1 定义 2 个非零向量之间的比例

$$a_1 = \frac{H_1\hat{x}}{H_1\hat{y}} = \frac{x}{y} - \frac{(x^2 + y^2)}{3xy} \quad (10)$$

进而化简得

$$2x^2 - 3a_1xy - y^2 = 0 \quad (11)$$

求得方程的解^[16]

$$x = 0.25(3a_1 \pm \sqrt{9a_1^2 + 8})y \quad (12)$$

用 k_1 定义反映 x, y 坐标之间的比例因数

$$k_1 = \frac{x}{y} = 0.25(3a_1 \pm \sqrt{9a_1^2 + 8}) \quad (13)$$

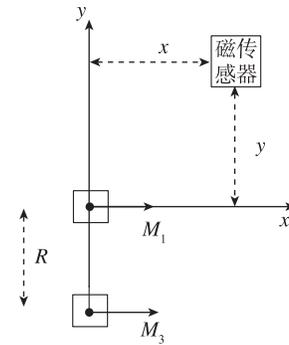


图 5 基于分离双磁信标的定位配置

Fig. 5 Localization configuration based on separate dual magnetic beacons

要实现定位,还需要添加另一个信标,根据上面的分析,第 2 个信标 H_2 的磁场可由式(14)给出

$$\mathbf{H}_2 = M_1 [(3x^2r^{-5} - r^{-3})\hat{x} + 3x(y+R)r^{-5}\hat{y}] \quad (14)$$

根据式(13),可得

$$x = k_1y \quad (15)$$

类比式(15)与(3-5),得到传感器位置与第 2 个信标的位置关系

$$x = k_2(y+R) \quad (16)$$

用 a_2 定义 2 个非零向量之间的比例

$$a_2 = \frac{H_2\hat{x}}{H_2\hat{y}} \quad (17)$$

同样类比式(17)与式(13),同时定义 k_2

$$k_2 = 0.25(3a_2 \pm \sqrt{9a_2^2 + 8}) \quad (18)$$

进而得到传感器的位置坐标的表达式

$$y = Rk_2(k_1 - k_2)^{-1} \quad (19)$$

因此,通过按照图 5 配置摆放的一对信标,信标 I 放在原点,通入频率为 f_1 的正弦信号,信标 II 放在 $(0, -R)$ 处,通入频率为 f_2 的正弦信号,使用磁传感器测量 2 个信标在空间某点所产生的磁场信

息,基于锁相环技术可以提取不同频率信标所产生的磁场信息,然后利用式(10)和式(17)分别求出 a_1 和 a_2 ,用式(13)和式(18)求出 k_1 和 k_2 ,最后代入式(19)和式(15)求出 y 和 x 坐标值,从而实现传感器的定位^[16]。至此,给出了基于低频磁信标的定位方法原理的推导。

3 数学仿真

下面通过一个仿真实验验证上述方法的有效性。具体步骤为:

- 1) 选择一个恰当合理的待测区域;
- 2) 在这片区域中进行连续的移动,并记录作为目标的实际位置;
- 3) 在每个位置的计算过程中加入零均值和标准偏差(Standard Deviation, STD)为 1pT 的高斯白噪声;
- 4) 采用分离式双信标定位方法进行位置测算;
- 5) 绘制真实轨迹和融合算法得到的仿真对比图。

以前文的定位算法的研究作为基础,经过仿真发现,通过该定位方法获得的连续定位构建的估计轨迹非常接近实际轨迹,从而验证了本文定位算法的有效性,对比结果如表 1 所示。

表 1 仿真实验位置与估计位置对比
Tab. 1 Comparison of simulation experiment position and estimated position

	实际位置/m	估计位置/m	误差/m
1	(5.00,10.00)	(4.36,9.25)	0.99
2	(15.00,12.00)	(15.26,11.59)	0.26
3	(20.00,16.00)	(19.24,16.09)	0.76
4	(26.00,18.00)	(26.53,17.32)	0.86
5	(35.00,20.00)	(34.10,20.35)	0.97
6	(44.00,22.00)	(45.23,22.00)	1.23
7	(50.00,21.00)	(50.50,21.06)	0.51
8	(60.00,20.00)	(61.04,20.28)	1.06
9	(75.00,10.00)	(75.30,9.80)	0.36
10	(80.00,30.00)	(79.50,30.20)	0.54

4 实际测试与分析

4.1 系统组成

分离式双信标系统由信标激磁部分、信标本体部分、信号测量及处理部分组成,如图 6 所示。实验

中所采用磁通门传感器测量范围为 $\pm 70\mu\text{T} \sim \pm 250\mu\text{T}$,带宽 $\text{DC} \sim 1\text{kHz}$,精度为 0.01nT 。

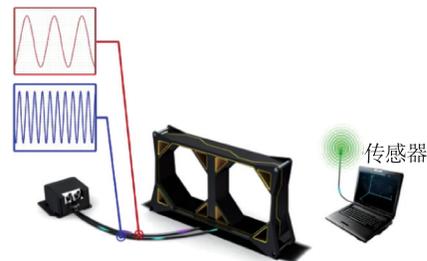


图 6 系统组成原理图

Fig. 6 Schematic of system composition

4.2 陆测结果

为了验证上述定位方法的实际性能,首先在陆地上进行了相关测试,信标系统实物如图 7、图 8 所示,单个信标设计为边长为 1.5m 的正方形,220 匝,2 个信标中心相距 1.6m,工作时通入电流 3.5A,电阻 6Ω 左右。



图 7 陆测磁信标摆放

Fig. 7 Magnetic beacon placement during land survey



图 8 陆地测量实验

Fig. 8 Land survey experiment

将实验测量得到的估计位置与实际位置进行对比,并把陆测结果总结如表 2 所示。

表 2 陆地测试实际位置与估计位置对比

Tab. 2 Comparison of estimated position and actual position from land survey experiment

	实际位置/m	估计位置/m
1	(2.00,0.95)	(1.86,0.97)
2	(6.50,3.15)	(6.37,3.59)
3	(15.00,10.00)	(14.24,9.86)

4.3 海测结果

为了进一步验证这种低频磁信标定位方法在更苛刻的环境下的测量效果,进行了海下定位测试,退潮时的信标安装位置如图 9 所示,实验时海水完全淹没信标。工作时通入电流 7.5A,电阻 6Ω 左右。



图 9 海上测量实验

Fig. 9 Sea survey experiment

将海上实验测量得到的估计位置与实际位置进行对比,并把海测结果总结如表 3 所示。

表 3 海上测试实际位置与估计位置对比

Tab. 3 Comparison of estimated position and actual position from sea survey experiment

	实际位置/m	估计位置/m
1	(1.50,2.00)	(1.71,2.09)
2	(3.50,5.00)	(3.42,4.85)
3	(8.50,6.00)	(7.93,5.76)

4.4 信标安装特性

磁信标在工程应用中需要考虑安装误差特性,通过实际实验测试,该信标定位系统具有以下特点:

1)对信标之间的距离要求不高,即可以间隔一定距离安装,也可以紧贴着安装(见图 10 和图 11),实际测试磁强信号变化小于 5%;

2)信标与传感器的正交关系存在 3° 以内的误差时,实际测试误差小于 5%;

3)实际测试表明,信标可摆放在任意位置,对

信标是否按照地球磁极方向摆放要求不高。

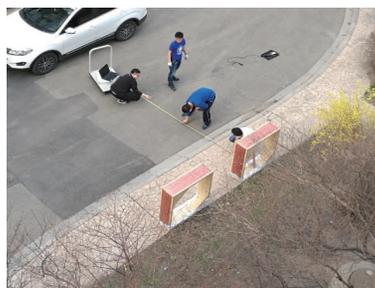


图 10 两信标相距 2m 时的定位情况

Fig. 10 The positioning with two beacons 2 meters apart



图 11 两信标相距 1.1m 时的定位情况

Fig. 11 The positioning with the two beacons 1.1 meters apart

5 结论

1)本文研究了一种基于低频磁信标的全天时自主定位方法,分析了分离式双信标定位原理,并给出了数学仿真精度分析;

2)通过工程实验验证了该方法的可行性,实际实验表明,信标安装要求简单,可以适应水下、地下、室内等环境,适应性强,该方法在几十米的范围内可以达到亚米级定位精度;

3)磁信标自身误差、传感器的对准误差等因素对系统定位精度的影响分析是下一步研究要解决的问题。

参考文献

[1] 黄才,赵思浩. 国家定位导航授时基础设施现状及能力展望[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(5): 19-26.
 [2] 潘献飞,穆华,胡小平. 单兵自主导航技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(1): 1-11.
 [3] Zhu B, Meng F. Integrity monitoring with MAIME upon integrated GNSS/SINS for SGEs[C]// IEEE International Conference on Computer and Communi-

- cations. IEEE, 2017:1595-1600.
- [4] Park S W, Kim M H. Numerical method for exposure assessment in the low-frequency ranges [C]// Ursi Asia-Pacific Radio Science Conference. IEEE, 2017: 1-2.
- [5] Angelis A D, Moschitta A, Carbone P, et al. Design and characterization of a portable ultrasonic indoor 3-D positioning system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64 (10): 2616-2625.
- [6] Hile H, Borriello G. Positioning and orientation in indoor environments using camera phones[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 2008, 28(4): 32-39.
- [7] Gezici S, Tian Z, Giannakis G B, et al. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.
- [8] He S, Chan S H G. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(1): 466-490.
- [9] Schwarzer S, Vossiek M, Pichler M, et al. Precise distance measurement with IEEE 802.15.4 (ZigBee) devices[C]// Radio and Wireless Symposium. IEEE, 2008: 779-782.
- [10] Erolkantarci M, Moustah H T, Oktug S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 487-502.
- [11] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.
- [12] Saxena A, Zawodniok M. Indoor positioning system using geo-magnetic field [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE, 2014: 572-577.
- [13] Davis C. GPS-like navigation underground[C]// Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 2010:1108-1111.
- [14] Pasku V, Fravolini M L, Moschitta A. Effects of antenna directivity on RF ranging when using space diversity techniques [J]. Measurement, 2015, 98: 429-438.
- [15] Markham A, Trigoni N, Macdonald D W, et al. Underground localization in 3-D using magneto-inductive tracking[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1809-1816.
- [16] Sheinker A, Ginzburg B, Salomonski N, et al. Localization in 2D using beacons of low frequency magnetic field[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 6(2): 1020-1029.