

# 一种简化的室内机器人电磁定位算法与系统

陈跃跃<sup>1</sup> 林海翔<sup>1</sup> 王侃<sup>1</sup> 徐孝东<sup>1</sup> 胡超<sup>1</sup> 冯忠晴<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(浙江大学宁波理工学院信息科学与工程学院 宁波 315100)

<sup>2</sup>(太原科技大学电子信息工程学院 太原 030024)

**摘要** 文章提出了一种简化的室内机器人的电磁定位算法。在定位空间内布置一个发射线圈和一个三轴接收线圈,形成电磁耦合系统。以接收线圈三轴为参考建立空间直角坐标系,并对发射线圈加载正弦电信号作为激励信号,产生交变电磁场。接收线圈感应到磁场的变化,通过测量计算感应耦合的强度特征值,确定移动目标的位置参数。本系统将三轴接收线圈固定,而将水平发射线圈置于平面移动机器人目标之上,这样可将定位算法简化。根据磁偶极子模型,提出了解析计算方法。通过仿真和实验,证明该方法能够满足室内机器人的定位要求,是可行且有效的。

**关键词** 移动机器人; 电磁定位; 磁偶极子模型

**中图分类号** TP 212.9 **文献标志码** A

## A Simplified Magnetic Localization Algorithm and System for Indoor Mobile Robot

CHEN Yueyue<sup>1</sup> LIN Haixiang<sup>1</sup> WANG Kan<sup>1</sup> XU Xiaodong<sup>1</sup> HU Chao<sup>1</sup> FENG Zhongqing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(School of Information Science and Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

<sup>2</sup>(School of Information Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** In this paper, a simplified magnetic localization method and system for indoor robot was proposed. A transmitter coil and a set of three axis receiver coils were ranged in the localization space to form the magnetic coupling system. The Cartesian coordinate system was built according to the three-axis orthogonal receiving coils. A magnetic field was setup by the transmitter coil which was activated by a sinusoidal current signal. The 3-axis receiver coils sensed the change of the magnetic signal around, and their intensities could be calculated to extract the characteristic parameters for computing the position of the transmitter coil. Here, the transmitting coil was fixed on the mobile robot, while the 3-axis receiver coil was located in a certain position of the building. The characteristic parameters could be calculated based on the magnetic dipole model. According to the simulation and experimental results, this method proves to have high efficiency and satisfactory accuracy which are suitable for mobile robot localization.

**Keywords** mobile robot; electromagnetic positioning; magnetic dipole model

收稿日期: 2015-01-13 修回日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61273332)

作者简介: 陈跃跃, 本科生, 研究方向为自动化; 林海翔, 本科生, 研究方向为自动化; 王侃, 本科生, 研究方向为自动化; 徐孝东, 本科生, 研究方向为自动化; 胡超(通讯作者), 博士生导师, 研究方向为自动化、智能信息处理和机器人控制, E-mail: huchao@nit.net.cn; 冯忠晴, 硕士研究生, 研究方向为自动化、嵌入式控制系统与应用。

## 1 引言

近年来, 机器人的应用在社会各行业飞速发展, 如军事、服务、娱乐、医疗等<sup>[1]</sup>。移动机器人是机器人的一个重要分枝。在室内, 移动机器人一般在平面上运动。为了对移动机器人进行高效可靠的控制, 需知道其所处位置, 即定位。近年来, 对定位技术的研究很受人们的重视, 产生了很多方法, 包括 GPS 定位<sup>[2]</sup>、超声定位<sup>[3]</sup>、机器视觉定位<sup>[4,5]</sup>和电磁定位<sup>[6]</sup>等。GPS 定位技术的原理是测量 GPS 接收器与卫星间的距离, 综合多颗不同卫星的距离数据来计算接收器的位置坐标。由于该技术要依赖于卫星信号, 室内往往难以检测, 且定位精度相对较低, 不适合室内移动机器人的定位。超声定位在军事、医学、工业和农业上都有广泛的应用。该技术的精度较高, 但是超声信号在传输过程中衰减很大, 影响了可测量的范围。此外, 室内空间环境复杂, 可能存在多个超声反射物体, 影响定位精度, 因此不太适用于室内定位。基于图像和机器视觉的定位技术定位精度很高, 但需要采集和处理的信息数据量较大, 处理速度要求高, 计算过程复杂耗时<sup>[5]</sup>, 且也有光线遮挡问题, 使定位失败或精度受到严重影响。电磁定位技术是一种比较适于室内定位的技术。该技术的实现首先通过向发射线圈加载交变的电流信号, 在周围定位空间内产生变化的电磁场; 接着作为跟踪目标的接收线圈感应到磁场变化, 产生相应的交变电信号; 最后根据该信号, 利用定位算法计算接收线圈相对于发射线圈的位置与方向<sup>[7]</sup>。电磁定位技术的优点是可以使用特定频率的电信号以及合理的信号处理方法来降低环境的干扰以提高定位精度, 实现较大范围的定位<sup>[8,9]</sup>。

通常情况下, 接收线圈的信号与发射线圈之间位置和方向呈非线性关系。电磁定位系统中, 接收线圈与发射线圈均可采用三轴正交线圈, 将

接收线圈固定在移动体上, 通过寻找发射线圈与接收线圈的耦合关系可得到接收线圈在空间的位置信息。然而, 该系统确定的非线性位置信息方程求解算法复杂<sup>[10]</sup>, 此外, 实验布置条件苛刻, 不易实现, 且容易受到周围环境的影响<sup>[11,12]</sup>。对于平面运动的移动机器人, 可根据其坐标变化的特殊性, 利用磁偶极子模型将算法进行简化。本文中提出了一种电磁定位方法, 将单轴激励线圈置于移动机器人上, 另用二轴正交或三轴正交线圈作为接收线圈, 检测接收磁场强度, 即可计算移动机器人上的发射线圈的位置。系统布置简单, 且用解析计算方法, 具有高效和简单的特点, 且能够实现较大范围的平面移动机器人的定位。

## 2 定位原理

室内机器人的移动可认为是在平面上的运动。定义一个空间直角坐标系  $Oxyz$ , 则机器人的位置可通过三维坐标  $(a, b, c)$  表示。若使  $xOy$  平面与机器人运动的平面平行, 则机器人所处位置高度可知, 即  $c$  已知。本文中提出的室内机器人的定位算法, 电磁耦合定位是在直角坐标系的  $xOy$  平面进行, 由于需要确定机器人的旋转角度, 至少需要 3 个接收线圈(或一个三轴接收线圈)确定移动机器人的坐标位置  $(a, b)$  以及角度  $\theta$ 。试验中将单轴发射线圈安装在移动机器人的非铁磁材料体上, 使其垂直于运动平面, 并将接收线圈固定在墙壁或天花板上, 如图 1 所示。其中,  $Q_1$  和  $Q_2$  表示接收线圈位置。

通常, 求取定位参数采用非线性求解方法, 但是非线性算法需要初始假定值, 可能存在局部最小问题, 当定位范围较大时, 算法甚至会失效。在本文试验中, 由于高度已经确定, 且机器人不存在俯仰和侧翻姿态, 因此问题简化为 3 自由度的平面问题。同时, 由于单轴发射线圈的主轴与运动平面垂直, 不提供偏转(即角  $\theta$ ) 信息,

因此问题进一步简化为 2 个未知数的平面定位问题。基于这种关系, 得到了解析计算的电磁定位算法, 简化了计算。

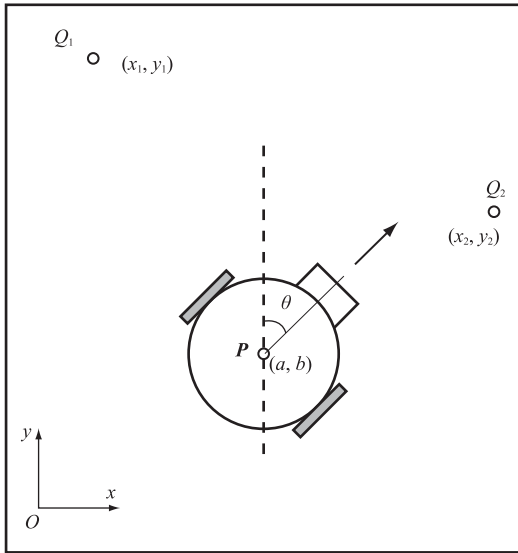


图 1 移动机器人定位方式

Fig. 1 Mobile robot localization mode

## 2.1 算法模型

给发射线圈加载激励信号后, 发射线圈成为信号发射源, 可视为磁偶极子, 如图 2 所示。发射线圈(即磁偶极子)的位置可以通过其坐标  $(a, b, c)$  来确定。这里移动机器人的高度  $c$  为一个已知量。发射线圈安装在移动机器人上, 且与地面平行, 即其轴向向量平行于坐标系  $z$  轴, 因此可以将轴向向量表示为  $\mathbf{H}_0 = (0, 0, 1)$ , 根据磁偶极子模型, 可以得到在接收线圈位置  $(x, y, z)$  处的磁感应强度公式:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k} \\ &= \frac{\mu_0 I^2 r}{4\pi} \left( \frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{P})\mathbf{P}}{R^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R^3} \right) \\ &= B_T \left( \frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{P})\mathbf{P}}{R^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R^3} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $B_x$ 、 $B_y$  和  $B_z$  分别是磁感应强度在  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴上的分量;  $\mu_0$  是空气磁导率;  $I$  是电磁线圈通入的电流大小;  $r$  是电磁线圈的半径;  $B_T$  是一个由发射线圈的尺寸大小、线圈匝数和通入

电流确定的常量, 其大小为  $\frac{\mu_0 I^2 r}{4\pi}$ ;  $\mathbf{P}$  是由发射线圈中心位置  $(a, b, c)$  和接收线圈位置  $(x, y, z)$  确定的向量,  $\mathbf{P} = [x-a, y-b, z-c]^T$ ;  $R$  是发射线圈中心与接收线圈的距离, 其大小为  $R = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}$ 。

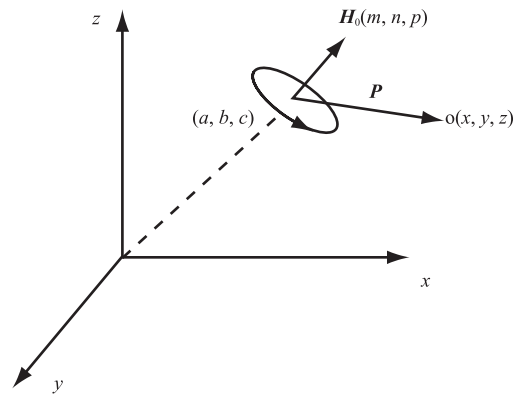


图 2 磁偶极子模型

Fig. 2 Magnetic dipole model

将发射线圈的轴向向量  $\mathbf{H}_0 = (0, 0, 1)$  带入公式(1)中, 得到:

$$B_x = B_T \frac{3(z-c)(x-a)}{R^5} \quad (2)$$

$$B_y = B_T \frac{3(z-c)(y-b)}{R^5} \quad (3)$$

$$B_z = B_T \left[ \frac{3(z-c)^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right] \quad (4)$$

由公式(4)可知, 运动空间内, 磁感应强度在  $z$  轴的分量  $B_z$  是关于两线圈之间的距离  $R$  的函数。在定点  $(x, y, z)$  处,  $c$  为已知量, 则  $B_z$  仅与  $R$  有关。这样就可以通过测量接收线圈在该点处的磁感应强度在  $z$  轴的分量  $B_z$  来确定  $R$  的值。根据  $R$  值, 求解公式(2)(3)可得到  $(a, b)$  的值, 即得到装有发射线圈的移动机器人的位置。

## 2.2 算法介绍

根据式(4)进行变化可以得到:

$$R^5 + \frac{B_T}{B_z} R^2 - 3 \frac{B_T}{B_z} (z-c)^2 = 0 \quad (5)$$

通过求解方程(5), 可以得到  $R$  的 5 个根, 对所有根进行约束区间的判断, 可以得到正确的  $R$  值。假设接收线圈被固定在已知坐标的位置  $(x, y, z)$  处, 其三轴正交各线圈的轴向向量分别与坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴平行, 三轴磁感应强度分量为  $B_x$ 、 $B_y$  和  $B_z$ , 采样得到的电信号值分别为  $V_x$ 、 $V_y$  和  $V_z$ 。采样值与磁感应强度之间是线性关系:

$$V_x = B_{Tx} \frac{3(z-c)(x-a)}{R^5} \quad (6)$$

$$V_y = B_{Ty} \frac{3(z-c)(y-b)}{R^5} \quad (7)$$

$$V_z = B_{Tz} \left[ \frac{3(z-c)^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right] \quad (8)$$

其中,  $B_{Tx}$ 、 $B_{Ty}$  和  $B_{Tz}$  为常数, 可以通过实验标定得到。求得  $R$  后, 再根据公式(6)可求得发射线圈  $x$ 、 $y$  轴位置的解析式:

$$a = x - \frac{B_x}{3B_{Tx}} R^5 / (z-c) \quad (9)$$

$$b = y \pm \sqrt{R^2 - (x-a)^2 - (z-c)^2} \quad (10)$$

即可得到移动目标发射线圈的位置坐标  $(a, b)$ 。

### 3 仿真与性能评价

根据上述算法的思路, 使用 Matlab 进行仿真计算, 并对有噪声干扰的情况进行轨迹跟踪和性能评价。

#### 3.1 算法仿真举例

假定发射线圈位置在  $(a, b, c) = (6, 5.5, 0.8)$ , 线圈轴向向量为  $\mathbf{H}_0 = (0, 0, 1)$ ; 另外一方三轴正交接收线圈位置固定在  $(x, y, z) = (4, 3, 3)$  处, 通过仿真计算得到:

$$R = \sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2 + (z_1 - c)^2} = 3.8846$$

$$\frac{B_x}{B_T} = \frac{3(z-c)(x-a)}{R^5} = -0.014923$$

$$\frac{B_z}{B_T} = \left[ \frac{3(z-c)^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right] = -0.00064439$$

由测量得到  $\frac{B_z}{B_T}$ , 通过公式(5), 求解得到  $R$  的五个根为:  $-5.6205 + 10.383i$ 、 $-5.6205 - 10.383i$ 、 $11.104$ 、 $3.8846$ 、 $-3.7475$ 。

因  $R$  为正实根, 取第三个  $11.104$  与第四个根  $3.8846$ 。当  $R=3.8846$  时, 根据公式(9)得到  $a=6$ ; 而当  $R=11.104$  时, 根据公式(6), 得  $a=385.68$ , 根据定位边界条件,  $a=385.68$  超过定位范围, 应舍弃。因此, 正确的根应该为  $R=3.8846$ 。然后通过公式(10)得到  $b_1=5.5$  和  $b_2=0.5$ , 再根据公式(8), 取  $b_1=5.5$ , 即得到发射线圈的位置为  $(6, 5.5)$ 。

#### 3.2 混有噪声时算法性能评估

为了对这种简化的定位算法进行性能评估, 在样本值  $B_x$ 、 $B_y$  和  $B_z$  中加入不同水平的随机噪声, 噪声的水平与样本值成正比。假定接收线圈的位置在室内的中心位置处, 定义为  $(x_r, y_r) = (0, 0)$ , 高度为  $z_r=3$  m, 发射线圈的位置分别在  $A=(3, 2, 0.8)$  和  $B=(6, 4, 0.8)$ 。定位误差情况如图 3 和图 4。

由图 3 和图 4 可看出, 定位误差的大小与噪声水平基本成正比, 且当发射线圈与接收线圈距离较近时, 误差较小。

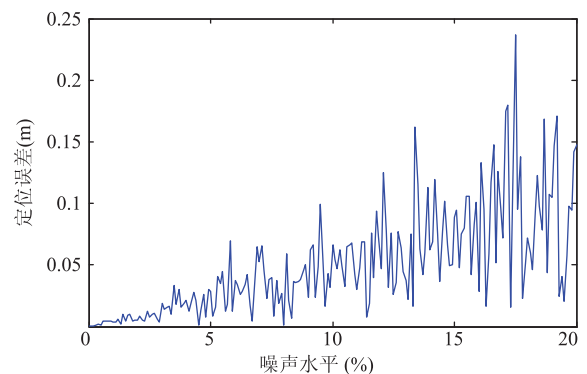


图 3 A 点定位误差与噪声水平(磁感应强度的百分比)的关系图

Fig. 3 The localization error with respect to noise level (percentage of the magnetic intensity)

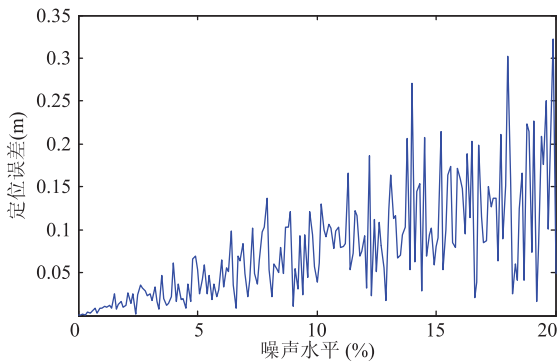


图4  $B$ 点定位误差与噪声水平(磁感应强度的百分比)的关系图

Fig. 4 The localization error with respect to noise level (percentage of the magnetic intensity)

### 3.3 混有噪声时轨迹跟踪情况

图5所示为加入噪声大小为 $B_z$ 的2.5%时对机器人位置移动的跟踪情况。此时,接收线圈在 $(x_r, y_r, z_r) = (0, 0, 3)$ , 装载有发射线圈的移动机器人在以 $(3, 2, 0.8)$ 为中心, 半径为4 m的圆形(图中蓝线表示)轨迹上运动, 72个位置点用红色的\*表示。由图可知, 计算得到的位置坐标在距离接收线圈位置 $(x_r, y_r)$ 较近时误差较小, 在两者距离较远时, 误差较大。 $x$ 轴平均定位误差为0.052 m,  $y$ 轴平均定位误差为0.046 m, 在 $xOy$ 平面的距离定位误差为0.079 m。

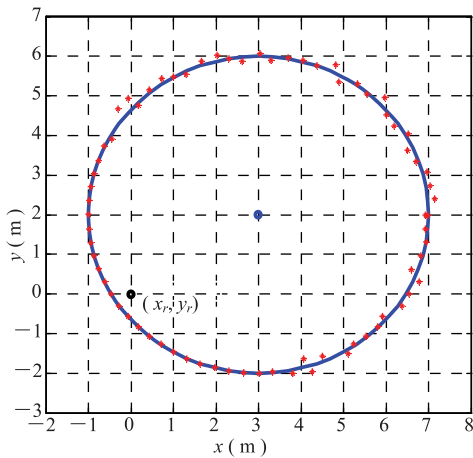


图5 2.5%的噪声时移动机器人轨迹跟踪

Fig. 5 Tracking locus of the mobile robot on noise with 2.5% magnetic intensity

## 4 系统实验

根据提出的简化的室内机器人电磁定位算法搭建实验平台, 并采集数据对其进行性能评估。实验中使用单轴发射线圈, 三轴正交接收线圈。将发射线圈固定在移动体上, 且其轴向向量与建立的直角坐标系 $z$ 轴平行, 发射线圈在 $z=1$  m的平面上运动, 接收线圈为三轴正交线圈, 固定在直角坐标系的 $(0, 0, 2.2$  m)处。

实验中采用发射线圈与接收线圈如图6和图7所示, 发射线圈是使用0.35 mm的漆包线绕制300圈制成, 线圈半径为30 cm, 激励信号是频率为2 kHz的正弦波信号。接收线圈由0.08 mm的漆包线绕制1600匝制成, 线圈半径为0.5 cm, 为了增加磁导率, 线圈中心放置磁芯。激励信号产生的变化的磁场在三轴接收线圈上产生3个电压信号, 采集信号进行定位计算。采集数据如表1所示。表中,  $x_s$ 和 $y_s$ 表示发射线圈放置位置;  $E_x$ 、 $E_y$ 和 $E_z$ 为三个接收线圈的采样信号;  $x_r$ 和 $y_r$ 表示系统测量得到的位置。



图6 三轴正交接收线圈

Fig. 6 3-axis orthogonal receiving coils



图 7 发射线圈

Fig. 7 Transmitting coil

首先通过标定反推得到公式(6)、(7)和(8)中的  $B_{Tx}$ 、 $B_{Ty}$  和  $B_{Tz}$  值, 其中  $B_{Tx}=17.35$ ,  $B_{Ty}=24.99$ ,  $B_{Tz}=21.35$ 。根据搭建的定位系统测得接收线圈上的电压即可得到线圈在该点处的磁感应强度, 然后根据本文方法求解得到发射线圈的位

置, 即可得到移动机器人的位置。在平面上选取 22 个位置进行定位实验, 计算得到系统所测位置与真实位置的实验结果如图 8 所示。

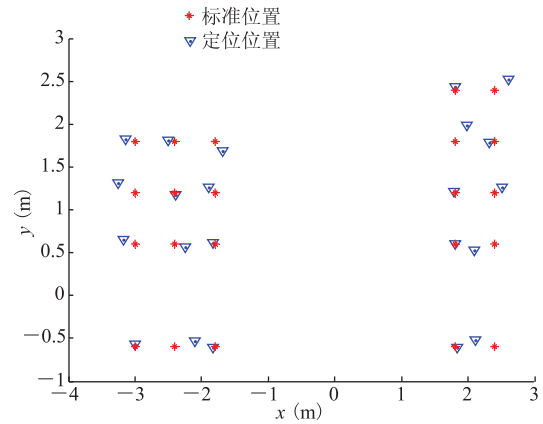


图 8 固定位置点定位实验

Fig. 8 Localization results for fixed positions

表 1 实验数据

Table 1 Experimental results

样本编号	标准位置(m, m)		测量电压信号(V)			计算位置(m, m)	
	$x_s$	$y_s$	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$x_r$	$y_r$
1	-3.0	-0.6	0.4817	0.1320	-0.3589	-3.0062	-0.5719
2	-3.0	0.6	0.4990	-0.1468	-0.3563	-3.1819	0.6499
3	-3.0	1.2	0.3901	-0.2264	-0.3233	-3.2552	1.3116
4	-3.0	1.8	0.2740	-0.2279	-0.2844	-3.1478	1.8178
5	-2.4	1.8	0.4343	-0.4519	-0.3684	-2.5036	1.8086
6	-2.4	1.2	0.6878	-0.4890	-0.4210	-2.3827	1.1771
7	-2.4	0.6	0.9640	-0.3519	-0.4418	-2.2408	0.5679
8	-2.4	-0.6	0.9531	0.3447	-0.4452	-2.1042	-0.5283
9	-1.8	-0.6	1.9698	0.9488	-0.2764	-1.8243	-0.6101
10	-1.8	0.6	1.9693	-0.9556	-0.2785	-1.8320	0.6172
11	-1.8	1.2	1.2196	-1.1677	-0.4212	-1.8956	1.2601
12	-1.8	1.8	0.6373	-0.9194	-0.4380	-1.6880	1.6907
13	1.8	-0.6	-1.9870	0.9512	-0.2745	1.8329	-0.6092
14	1.8	0.6	-1.9697	-0.9480	-0.2715	1.8056	0.6033
15	1.8	1.2	-1.2068	-1.1725	-0.4148	1.7908	1.2080
16	1.8	1.8	-0.6356	-0.9148	-0.4293	1.9864	1.9849
17	1.8	2.4	-0.3131	-0.6055	-0.3682	1.8080	2.4275
18	2.4	2.4	-0.2582	-0.3585	-0.2999	2.6080	2.5140
19	2.4	1.8	-0.4148	-0.4588	-0.3717	2.3253	1.7857
20	2.4	1.2	-0.6876	-0.5001	-0.4172	2.5051	1.2650
21	2.4	0.6	-0.9555	-0.3438	-0.4476	2.0957	0.5235
22	2.4	-0.6	-0.9543	0.3401	-0.4458	2.1034	-0.5218

定位的目标是在普通室内环境  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  范围内, 定位精度要求为  $x$  和  $y$  轴平均误差小于  $10\text{ cm}$ 。由上述实验数据以及实验仿真结果可以看出, 实验结果在  $x$  轴上的平均定位误差为  $7.72\text{ cm}$ , 在  $y$  轴上的平均定位误差为  $5.89\text{ cm}$ 。由于实验中系统所处环境, 信号受到噪声的干扰以及操作的影响, 有一定误差, 但是定位误差在允许的范围內。

我们还对算法的计算速度进行了测试。电磁定位常用的算法是非线性最小化寻优算法 Levenberg-Marquardt (LM) 算法。与其他非线性算法相比, LM 算法具有较高的效率, 因此将本文算法与 LM 算法进行比较。Matlab 环境下, 采用本文方法计算的平均耗时为  $6\text{ ms}$ , 而 LM 算法在  $18\text{ ms}$  左右。同时, 非线性算法需要初始定位值, 当定位范围增大, 初始值误差超过  $0.5\text{ m}$  时, LM 算法会因为陷入局部最小问题而失效; 而本文方法则不存在这一问题。因此可认为本文方法具有求解简单, 计算速度快, 定位范围大的特点。

## 5 结 论

本文提出的简化的室内机器人定位算法是一种基于磁偶极子模型的电磁定位技术, 适用于平面定位。实验采用单轴发射线圈和三轴正交接收线圈。根据接收线圈的三轴建立直角坐标系, 将发射线圈固定在移动机器人上, 且其轴向向量与坐标系的  $z$  轴平行, 接收线圈固定在空间中已知位置, 采集接收线圈输出信号, 利用接收线圈与发射线圈的耦合关系进行定位计算。算法利用求解出的解析式计算发射线圈的位置坐标  $(a, b)$ , 与非线性寻优算法相比, 具有求解简单, 计算耗时少, 定位范围大的特点, 能满足移动机器人在室内的实时定位要求; 同时由于发射和接收线圈减少, 相对于其他电磁定位系统, 结构与电路系

统也大为简化。由于实验材料为自制、实验过程中人工操作以及环境的干扰等原因, 实验结果有一定误差。后期可以在上述方面进行改进, 减小实验误差, 使该方法的精度得到提高。

## 参 考 文 献

- [1] 王卫华. 移动机器人定位技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [2] 卢望. 基于ARM 的 GPS 定位系统的研究与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [3] Shen JY, Molisch AF, Salmi J. Accurate passive location estimation using TOA measurements [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11 (6): 2182-2192.
- [4] 王连朝. 微创手术机器人视觉定位系统的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [5] Wu CS, Yang Z, Liu YH, et al. WILL: wireless indoor localization without site survey [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24 (4): 839-847.
- [6] Song S, Qiao W, Li BP, et al. An efficient magnetic tracking method using uniaxial sensing coil [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50 (1): 4003707.
- [7] Hu C, Song S, Wang XJ, et al. A novel positioning and orientation system based on three-axis magnetic coils [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48 (7): 2211-2219.
- [8] Song S, Hu C, Li BP, et al. An electromagnetic localization and orientation method based on rotating magnetic dipole [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49 (3): 1274-1277.
- [9] 宋霜, 胡超, 李抱朴, 等. 面向机器人运动跟踪的电磁定位系统 [J]. 集成技术, 2013, 2 (2): 8-15.
- [10] 包建孟, 胡超, 林卫星, 等. 平面电磁定位跟踪系统 [J]. 传感技术学报, 2014, 4: 518-523.
- [11] Shin H, Chon Y, Cha H. Unsupervised construction of an indoor floor plan using a smartphone [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2012, 42 (6): 889-898.
- [12] Cheng L, Wu CD, Zhang YZ. Indoor robot localization based on wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57 (3): 1099-1104.