

基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法

向枫桦, 杨宾锋, 李 博, 赵 震, 郭娇娇

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对梯度张量法在磁定位系统中存在进场误差大的不足,提出了基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法。首先,利用十字形传感器模型,推导了一阶磁梯度张量定位原理。然后,根据磁场衰减规律,提出了误差梯度矩阵的计算方法并利用免疫克隆算法进行优化处理。为了验证新算法的有效性,在 Matlab 中采用了3条不同的路线分别进行一阶梯度张量定位和优化算法定位计算并通过实际定位实验对新定位算法进行验证。研究发现:基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法在距离较近时,能够有效提高磁定位系统的精度。

关键词 免疫克隆算法;磁梯度张量;误差矩阵;磁定位

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.009

中图分类号 V249.32 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0053-07

A First-Order Magnetic Gradient Tensor Localization Method Based on the Immunocloning Algorithm

XIANG Fenghua, YANG Bin Feng, LI Bo, ZHAO Zhen, GUO Jiaojiao

(Information Engineering and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract For lack of gradient tensor large field error in magnetic localization system, a first-order magnetic gradient tensor localization method is proposed based on immune cloning algorithm. First, the cross-form sensor model is utilized for deriving the first-order magnetic gradient tensor localization principle. Then, an error gradient matrix calculating method is proposed by using the magnetic field decay law and the immune cloning algorithm is optimized. To verify the effectiveness of the new algorithm, three different routes are used in Matlab for one-step metric tensor localization and optimization algorithm localization calculation and to verify the new localization algorithm through actual localization experiments. It is found that the first-order magnetic gradient tensor localization method based on the immune cloning algorithm can effectively improve the accuracy of the magnetic positioning system.

Key words immunocloning algorithm; magnetic gradient tensor; error matrix; magnetic localization

目前,关于定位的手段和方法有诸多种,但是许多定位方法都有一个局限性,就是容易被干扰。另外,在一些特殊的场合,例如室内、地下、水下以及一

些其他的复杂环境,诸多导航定位手段就无法应用^[1-3]。无线电导航系统可以实现飞机的进场和着陆保障,但信号非常容易被干扰^[4]。卫星导航可以

收稿日期: 2021-09-18

基金资助: 国家自然科学基金(51577191)

作者简介: 向枫桦(1997—),男,湖南岳阳人,硕士生,研究方向为人工磁信标的定位。E-mail:2752703287@qq.com

引用格式: 向枫桦,杨宾锋,李博,等. 基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 53-59. XIANG Fenghua, YANG Bin Feng, LI Bo, et al. A First-Order Magnetic Gradient Tensor Localization Method Based on the Immunocloning Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 53-59.

实现高精度定位,但在室内等特殊场合无法接收到信号^[5]。而磁场信号拥有穿透性强和抗干扰能力强的优点,可以应用在室内、地下等特殊场合^[6]。因此,利用磁信号进行导航定位具有非常大的发展潜力。

关于磁信号定位的方法,目前有多种不同方法,其中梯度张量方法由于计算相对简单,因此应用也最广泛。对于梯度张量方法,国内诸多专家学者提出了不同的计算模型。邓国庆推导了一阶梯度张量定位机理,并将其应用在永磁体中,但传统的一阶梯度张量定位受地磁场和背景磁场影响大^[7]。李青竹等推导了二阶梯度张量定位机理,由于地磁场和背景磁场的二阶梯度张量十分小,因此该方法可以提高定位精度,但是无法直接测量二阶梯度张量矩阵^[8]。以上这些算法都是基于单磁偶极子推导,在远距离能够保持不错的测量精度,但是在距离较近或者磁源体积比较大时,单磁偶极子定位就存在误差大的不足,因此出现了许多误差补偿方法。袁鹏等运用梯度张量不变原理消除了椭圆误差,在正六面体测量阵列上有效提高磁信号的定位精度^[9]。Wang等利用最小二乘法对磁信号进行优化处理并运用一阶梯度张量进行定位计算,结果表明能够有效提高定位精度^[10]。为了解决梯度张量算法在进场定位误差大的不足,本文提出了基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法。

本文将免疫克隆算法融入到一阶磁梯度张量定位原理中,探究了新算法在进场时的定位精度。在一阶磁梯度张量定位原理的基础上,根据磁场衰减规律,提出了误差梯度矩阵的概念并推导了其计算方法。然后,利用免疫克隆算法对误差矩阵进行优化处理。为了验证新方法的有效性,在Matlab中采用了三条不同的路线进行计算并与一阶梯度张量定位算法进行对比分析。最后,通过无磁转台的旋转永磁体实际定位实验对算法的定位效果进行进一步的验证。研究发现:基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法在距离较近时,能够有效提高磁定位精度。

1 一阶梯度张量定位原理

1.1 梯度张量矩阵

以磁偶极子为原点,建立空间坐标系,在距离磁偶极子任意一点 $r(x, y, z)$ 的磁感应强度表达式为:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 p}{4\pi} \frac{3xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\ B_y &= \frac{\mu_0 p}{4\pi} \frac{3yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\ B_z &= \frac{\mu_0 p}{4\pi} \frac{2z^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \end{aligned} \quad (1)$$

磁梯度张量是磁感应强度在不同方向的偏导数,包括一阶梯度张量和二阶梯度张量,可以反应磁场在不同方向的变化率,拥有大量的磁场信息。磁感应强度的三分量在3个轴向方向上的分量变化率就是一阶磁梯度张量矩阵^[11],因此,一阶磁梯度张量矩阵一共有9个元素,记作 G ,如下式所示:

$$G = \nabla B = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据Maxwell方程组,磁感应强度的旋度和散度均为0^[11],可以得到:

$$\begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

将式(3)展开化简,可以得到:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x}$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial y}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial z}$$

(5)

由式(5)可知一阶磁场梯度张量矩阵 G 满足4个关系式,有6个不同的量满足两两相等的关系,剩下3个量满足一个等式,也就是说要想知道梯度张量矩阵 G ,最少要知道5个量的值并且都是独立的量。

将式(1)中的磁场三分量分别进行求偏导数计算,可以得到9个梯度张量的理论值,只取5个独立元素的表达式为:

$$B_{xx} = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{3z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{15x^2 z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \right)$$

$$B_{xy} = -\frac{\mu_0 p}{4\pi} \frac{15xyz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}}$$

$$B_{xz} = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{3x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{15xz^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \right)$$

$$B_{yy} = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{3z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{15y^2 z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \right)$$

$$B_{yz} = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{3y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{15yz^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \right)$$

(6)

1.2 测量阵列

用于测量磁梯度张量的传感器模型有诸多种,其中十字形传感器精度最高^[13]。如图 1 所示,该模型一共由 5 个参数一模一样的传感器组成,每个轴上都分布 3 个相同的传感器,其中 0 号传感器是公用的传感器。另外,任意相邻两个传感器之间的距离都相等,大小为 d 。

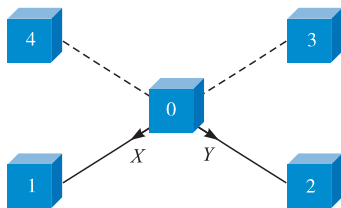


图 1 十字形传感器

根据数值微分知识中的三点法求导方法,可以得到相应的偏导数为:

$$\begin{aligned} B_{xx} &= \frac{B_{x5} - B_{x3}}{2d} \\ B_{xy} &= \frac{B_{x2} - B_{x4}}{2d} \\ B_{xz} &= \frac{B_{z5} - B_{z3}}{2d} \\ B_{yy} &= \frac{B_{y2} - B_{y4}}{2d} \\ B_{yz} &= \frac{B_{z2} - B_{z4}}{2d} \end{aligned} \quad (7)$$

1.3 一阶梯度张量定位

磁场的欧拉反褶积方程为:

$$x \frac{\partial H}{\partial x} + y \frac{\partial H}{\partial y} + z \frac{\partial H}{\partial z} = k(P - H) \quad (8)$$

式中: H 为磁感应强度; P 为环境噪声; k 为常数。对于磁偶极子来说, k 的值为 $3^{[14]}$ 。因此可以得到磁场的定位表达式为:

$$\begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = -3 \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.4 误差理论分析

如图 2 所示,十字形传感器是根据两点法来求解导数,而磁场的衰减并非线性关系,因此十字形传感器实际求解的是 B 点的梯度张量矩阵,而对于永磁体来说,应该求解 D 点的梯度张量值。因此,采用十字形传感器模型对梯度张量矩阵进行测量必然在原理上就存在误差。

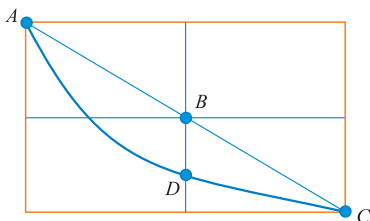


图 2 误差分析图

如图 3 所示,为了减小这种在原理上的测量误差,下面打算将测量的基线进行移动,保持测量基线 AC 的长度不变,将测量点 A 和测量点 C 进行平移至测量点 A_1 和测量点 C_1 ,此时十字形传感器实际测量的点为 B_1 ,相对于之前的测量点 B 来说,进行平移之后的测量点 B_1 更加接近理论值 D 点。因此,该思路能够在一定程度上减小十字形传感器的测量误差。

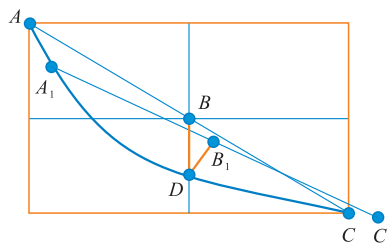


图 3 解决思路图

2 免疫克隆算法优化

2.1 目标函数构建

在实际测量中,由于磁场的衰减与距离并非线性关系,而求解偏导数是基于磁场衰减规律是线性的基础上,因此梯度张量矩阵肯定存在误差,可以将梯度张量的实测值 G_T 记为:

$$G_T = G + \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_4 & g_5 & g_6 \\ g_7 & g_8 & g_9 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为了便于计算求解,假设以下这几个等式成立:

$$\begin{aligned} r_{x+} &= \sqrt{(x+d+ad)^2 + y^2 + z^2} \\ r_{x-} &= \sqrt{(x-d+ad)^2 + y^2 + z^2} \\ r_{y+} &= \sqrt{x^2 + (y+d+bd)^2 + z^2} \\ r_{y-} &= \sqrt{x^2 + (y-d+bd)^2 + z^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: r_{x+} 、 r_{y+} 、 r_{x-} 、 r_{y-} 分别表示十字形磁力仪模型第 1、2、3、4 号磁力仪到永磁体的距离; x 、 y 、 z 分别表示第 0 磁力仪在空间三维坐标系 x 、 y 、 z 轴上的坐标值; d 表示十字形磁力仪模型中第 1、2、3、4 号磁力仪到第 0 磁力仪的距离; a 、 b 分别表示实际测量时 x 轴上的第 1、3 磁力仪、 y 轴上的第 2、4 磁力仪的实际测量位置到以固定距离 d 建立的十字形磁力仪模型的第 1、3 磁力仪和第 2、4 磁力仪位置的距离偏差。

由于采用两点法求导必然存在误差,因此根据磁场的衰减规律,误差矩阵系数为:

$$\begin{aligned}
\mathbf{g}_1 &= k \left[\frac{3(x+d+ad)z}{r_{x+}^5} - \frac{3(x-d+ad)z}{r_{x-}^5} \right] - \mathbf{B}_{xx} \\
\mathbf{g}_2 &= k \left[\frac{3xz}{r_{y+}^5} - \frac{2xz}{r_{y-}^5} \right] - \mathbf{B}_{xy} \\
\mathbf{g}_3 &= k \left[\frac{3z^2 - r_{x+}^2}{r_{x+}^5} - \frac{3z^2 - r_{x-}^2}{r_{x-}^5} \right] - \mathbf{B}_{xz} \\
\mathbf{g}_5 &= k \left[\frac{3(y+d+bd)z}{r_{y+}^5} - \frac{3(y-d+bd)z}{r_{y-}^5} \right] - \mathbf{B}_{yy} \\
\mathbf{g}_6 &= k \left[\frac{3z^2 - r_{y+}^2}{r_{y+}^5} - \frac{3z^2 - r_{y-}^2}{r_{y-}^5} \right] - \mathbf{B}_{yz}
\end{aligned} \quad (12)$$

$$k = \frac{u_0 p}{8\pi d}$$

根据梯度张量矩阵的性质有:

$$\begin{aligned}
\mathbf{g}_4 &= \mathbf{g}_2 \\
\mathbf{g}_7 &= \mathbf{g}_3 \\
\mathbf{g}_8 &= \mathbf{g}_6 \\
\mathbf{g}_9 &= -\mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_5
\end{aligned} \quad (13)$$

因此,目标函数可以表示为:

$$f = \mathbf{g}_1 k_1 + \mathbf{g}_2 k_2 + \mathbf{g}_3 k_3 + \mathbf{g}_5 k_5 + \mathbf{g}_6 k_6 \quad (14)$$

式中: k_1, k_2, k_3, k_5 和 k_6 分别表示各自系数的权重。

2.2 算法实现流程

由于免疫克隆算法不受目标函数以及维数的限制,能够较好地解决优化问题,因此下面采用免疫克隆算法对目标函数进行优化求解。

具体求解步骤如下:

Step 1 目标函数的构建。

确定问题的维数并根据磁场的衰减规律,构建梯度张量误差矩阵,设置目标函数为 f 。

Step 2 产生初始种群。

初始种群根据免疫维数、免疫个数以及免疫的上下门限来产生初始种群。

$$g = \text{rand}(D, n) * (r_+ - r_-) + r_- \quad (15)$$

Step 3 计算个体浓度和激励度。

个体浓度采用欧式距离进行计算,激励度根据相似度阈值来确定。

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (16)$$

Step 4 免疫循环。

免疫循环阶段根据种群的亲和度,不断挑选亲和度最高的个体,并将亲和度最高的个体带入目标函数中进行计算。

亲和力计算公式为:

$$(A_g)_k = \frac{1}{1 + t_k} \quad (17)$$

式中: t_k 是抗原和抗体 k 的结合强度。

Step 5 种群更新。

在不满足最优解的条件下,将新种群与旧种群进行合并并重新进入免疫循环阶段。

3 仿真计算

3.1 计算路线

为了验证免疫克隆算法优化的效果,设置了如图4所示的3条不同的路线。路线1保持 z 轴的坐标为 0.4 m, x 轴坐标与 y 轴坐标保持一定比值,路线2保持 y 轴的坐标为 0.4 m, x 轴坐标与 z 轴坐标保持一定比值,路线3保持 x 轴的坐标为 0.4 m, y 轴坐标与 z 轴坐标保持一定比值。因此,这3条路线能够代表整个空间的大体情况。在这3条不同的路线上,分别采用原始的一阶梯度张量和经过免疫克隆算法优化后的一阶梯度张量算法进行仿真定位实验。

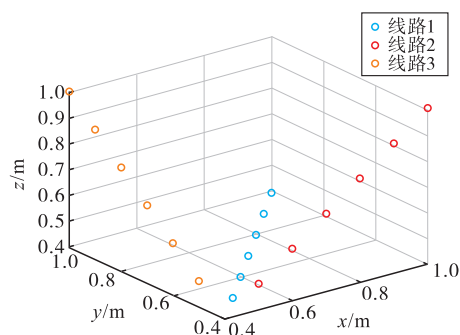


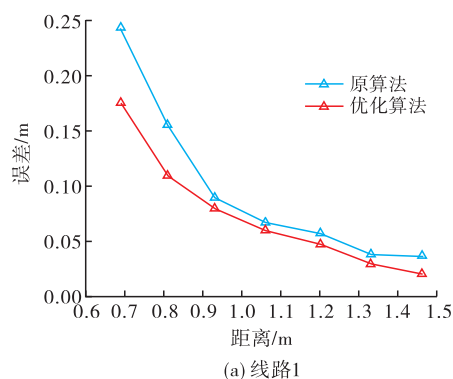
图4 测量路线分布图

3.2 定位精度

为了进一步比较定位效果,引入均方根误差进行对比分析:

$$E_r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (18)$$

对3条路线分别进行一阶梯度张量和经过免疫克隆算法优化的一阶梯度张量定位,不同路线的误差分布图如图5所示。



(a) 线路1

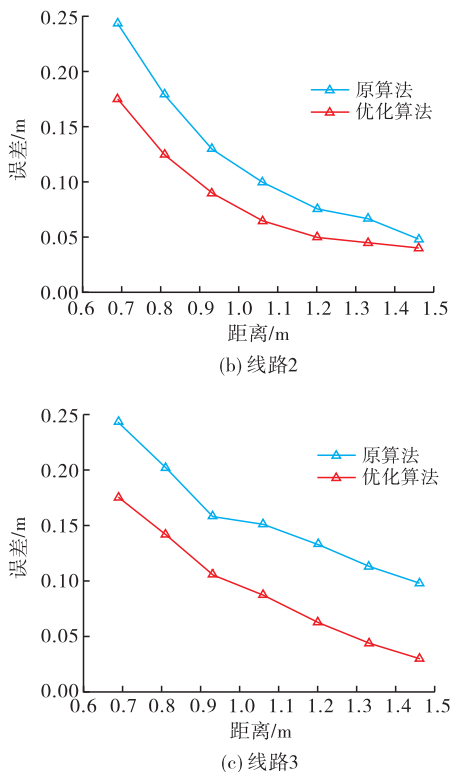


图 5 不同路线的误差分布图

在图 5 的 3 个误差分布图中可得以下结论:在比较近的距离条件下,经过免疫克隆算法优化后的一阶梯度张量定位精度明显比原算法定位精度高。

4 实验验证

4.1 实验步骤

根据文献[2],当磁力仪与永磁体之间的距离大于永磁体尺径的 10 倍时,可以将永磁体视为磁偶极子分析。本实验使用长为 9.6 cm、宽为 4.7 cm、高为 1.7 cm 的长方体永磁体。将永磁体放置在距离测量阵列 1 m 以上的位置,由于磁力仪与永磁体之间的测量距离远大于永磁体的尺径,因此,可以将永磁体当做磁偶极子分析。具体实验步骤如下。

Step 1 安装设备。

首先,调整三脚架,使支架的气泡位于中间;然后,如图 6 所示,将 5 个磁力仪分别安装在固定位置并给设备加上 24 V 的电源。当数据采集模块的 5 个指示灯全亮时,说明磁力仪连接方式都对,设备可以正常工作。

Step 2 放置永磁体。

如图 7 所示,将长方体永磁体固定放置于无磁转台的正中心上,设置无磁转台的旋转速率为 4 rad/s,给设备通上 24 V 的电源,使其匀速旋转。当数据采集模块出现调制波形时,说明成功接收了永磁体的磁场。

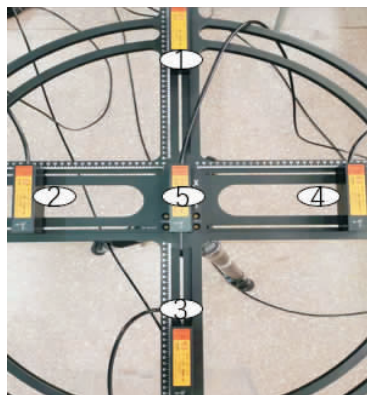


图 6 传感器模型

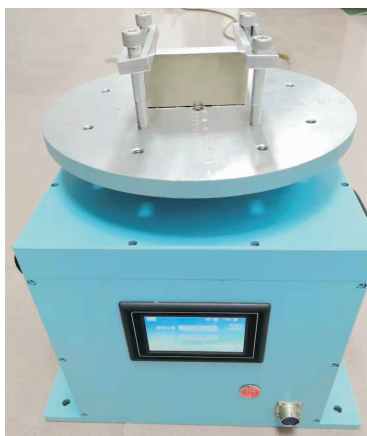


图 7 无磁转台

Step 3 数据采集。

设置数据采集的模式为连续采集,采集时间为 10 s,将 10 s 内采集的数据导入到文档中并且永磁体产生的磁场分布情况将会在磁场测量系统中显示出来。

Step 4 调整测量位置。

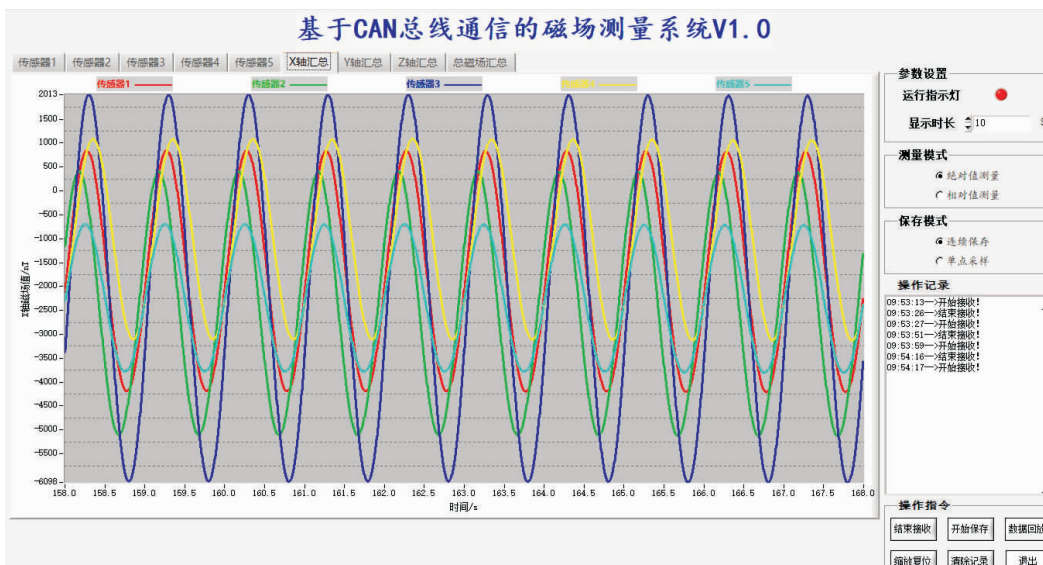
当上一个测量点的数据记录完毕时,调整十字形传感器的位置,将其放置在不同位置,继续重复数据采集模块的数据采集过程。

4.2 数据处理

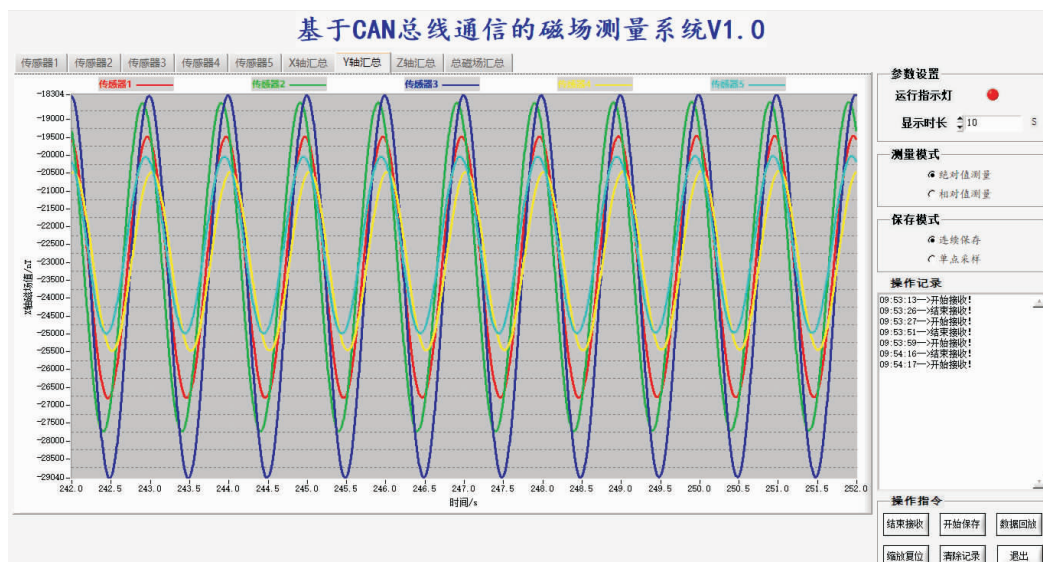
当永磁体以固定速率匀速旋转 10 s 时,将会得到永磁体在这一阶段产生的永磁体的磁场分布如图 8 所示。

在图 8 中,所有波形图的横坐标表示时间,单位为秒。图 8(a)的纵坐标表示 x 轴的磁场强度大小,图 8(b)的纵坐标表示 y 轴的磁场强度大小,图 8(c)的纵坐标表示 z 轴的磁场强度大小,图 8(d)的纵坐标表示总磁场强度大小,所有单位都为纳特。当永磁体匀速旋转时, B_x 、 B_y 、 B_z 、 B 都是调制信号,并且以一个固定信号波形周期性的重复出现。

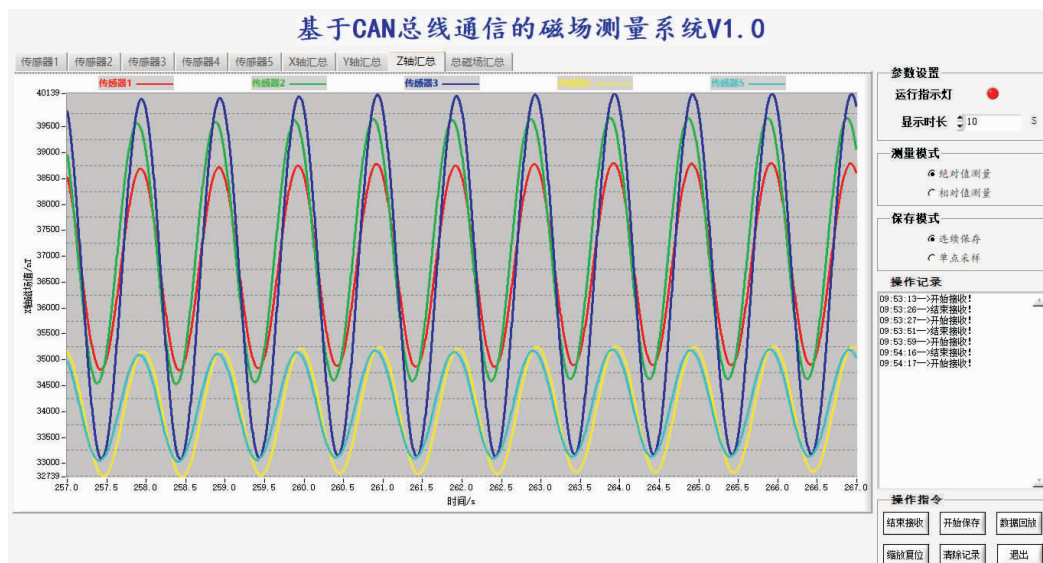
尽管实验的环境处于一个较为空旷的地方,但是测量数据难免会受到地磁场和环境磁场的影响,因此,必须对数据进行滤波处理。



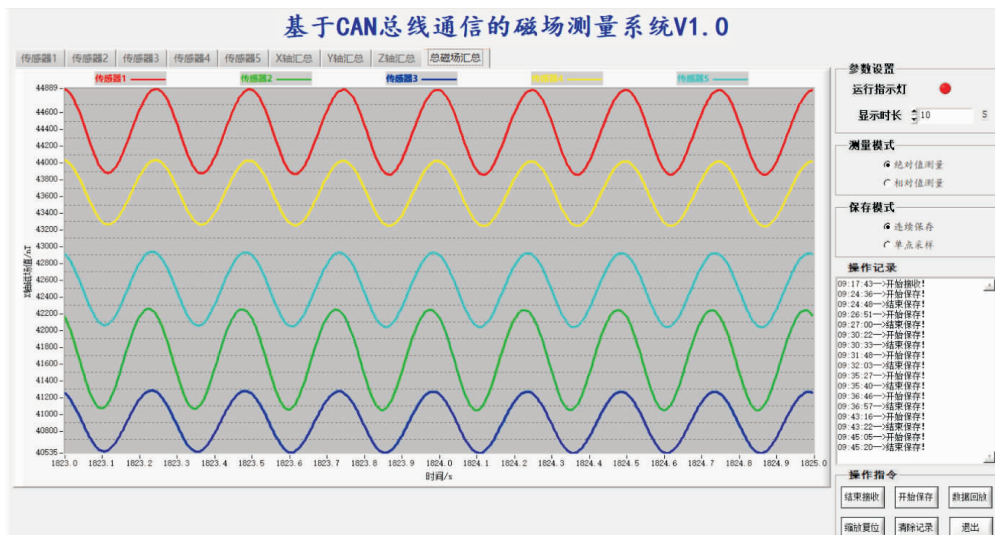
(a) x轴磁场分布



(b) y轴磁场分布



(c) z轴磁场分布



(d) 总磁场分布

图 8 旋转永磁体磁场分布

由于永磁体的旋转速率为 4 r/s,因此滤波器的中心频率为 4,通过滤波的方式,可以过滤掉地磁场和环境磁场,尽量减小外部环境对测量精度的影响。以传感器 1 为例,混有地磁场和环境磁场的原始数据见图 9,通过滤波处理后的数据见图 10。

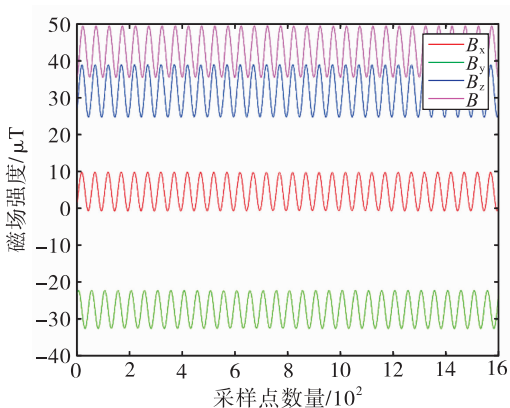


图 9 原始数据分布图

在图 9 中,旋转永磁体产生的 B_x 、 B_y 、 B_z 、 B 都是类似于正弦波的调制信号,并且这种信号具有周期性。传感器 2、3、4、5 的永磁体磁场信号与传感器 1 的永磁体磁场信号的趋势与之类似。

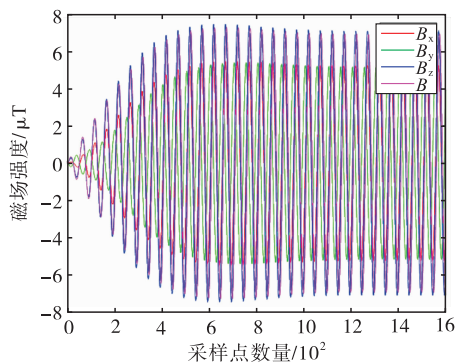


图 10 永磁体数据分布图

在图 10 中,磁场强度的大小明显下降,说明通过滤波的方式,将静止的干扰磁场成功地滤掉。由于无磁转台刚开始需要一个加速的过程,因此在图 10 中,刚开始的磁场不是恒定的,当转台匀速旋转时,磁场慢慢趋于稳定。当采样点到 600 左右时,磁场信号逐渐趋向于稳定状态。当磁场信号稳定后,提取磁场信号在每一周期的最大值,将其视为测量值,分别代入到原始算法和优化算法中,得到测量点的相对误差。然后,继续在实验室随机取点,重复以上步骤,得到其他测量点的相对分布如表 1 所示。

表 1 定位误差对比

测量点/m	原算法定位点/m	相对误差 1/%	优化算法定位点/m	相对误差 2/%
(1.5,0,0.6)	(1.54,0.11,0.57)	7.4	(1.53,0.10,0.58)	6.6
(0.5,2,0.6)	(0.24,2.02,0.67)	12.5	(0.42,1.95,0.55)	4.4
(1,2,0.6)	(0.89,2.28,0.45)	14.5	(1.08,2.13,0.53)	7.2
(1,2.5,0.6)	(1.06,2.55,0.92)	11.8	(0.86,2.59,0.65)	6.2

从表 1 可以看出,在距离较近时,经过免疫克隆算法优化后的定位精度比原算法定位精度平均高 5%左右,说明经过免疫克隆算法优化的定位效果略

比原始算法的定位精度好。

(下转第 81 页)

- 49504-49512.
- [8] ZHANG W, HAN Y, JIN M, LI X. An Improved ESPRIT-Like Algorithm for Coherent Signals DOA Estimation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 339-343.
- [9] 张文俊, 赵永波, 张守宏. 广义 MUSIC 算法在米波雷达测高中的应用及其改进[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 387-390.
- [10] 李晓刚. 基于最大似然算法的 DOA 估计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [11] 陈伯孝, 胡铁军, 郑自良, 等. 基于波瓣分裂的米波雷达低仰角测高方法及其应用[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1021-1025.
- [12] 赵光辉, 陈伯孝, 董玫. 基于交替投影的 DOA 估计方法及其在米波雷达中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 224-227.
- [13] 杨雪亚. 米波雷达阵列超分辨和测高方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [14] 蒋柏峰, 吕晓德, 向茂生. 基于广义 MUSIC 算法的低仰角估计新方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 422-429.
- [15] 朱伟. 米波数字阵列雷达低仰角测高方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [16] 郑轶松. 米波阵列雷达低仰角测高若干问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [17] 胡铁军, 杨雪亚, 陈伯孝. 阵列内插的波束域 ML 米波雷达测高方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 660-666.
- [18] 吴向东, 张守宏, 董玫. 一种基于线性预处理的米波雷达低仰角处理算法[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1668-1671.
- [19] 周成伟. 互质阵列信号处理算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 汪安戈, 胡国平. 实数域广义 MUSIC 的 MIMO 雷达低空目标仰角估计算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11): 128-131.

(编辑: 徐敏)

(上接第 59 页)

5 结语

本文研究了免疫克隆算法在一阶梯度张量中的应用。在一阶梯度张量算法的基础上, 提出了误差梯度张量矩阵并运用免疫克隆算法进行优化处理。在不同的路线上, 将原算法和免疫克隆优化的定位算法进行对比分析并利用实际实验对优化算法进行实际验证。研究表明: 在比较近的距离条件下, 经过免疫克隆算法优化后的一阶梯度张量定位精度得到明显提高。

参考文献

- [1] 常帅, 付晓梅, 张翠翠, 等. 基于磁信标的水下 SLAM 方法[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 277-283.
- [2] 邓国庆, 姚爱国, 龚正, 等. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2336-2344.
- [3] FURUICHI T. Magnetic Sensor and Manufacturing Method of the Same[J]. Journal of Medical Sciences, 2017, 11(1): 303-316.
- [4] 蔡隆慧. 浅析航空飞行器导航技术[J]. 中国新通信, 2019, 21(11): 90-91.
- [5] DELANEY J A, WILEMAN T M, PERRY N J, et al. The Validity of a Global Navigation Satellite System for Quantifying Small-Area Team-Sport Movements[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2019, 33(6): 1463-1466.
- [6] LI X J, XIAO T T, CHEN F W, et al. A Novel Superconducting Magnetic Levitation Method to Support the Laser Fusion Capsule by Using Permanent Magnets[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2018, 3(3): 104-109.
- [7] 邓国庆. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位系统研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017: 44-49.
- [8] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 基于二阶磁张量欧拉反褶积的磁源单点定位方法[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 915-924, 727.
- [9] 袁鹏, 祗会强, 靳鸿, 等. 基于磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1194-1199.
- [10] WANG R, YANG B F, ZHAO Z, et al. Research on MGT Target Location Method Based on Rotating Combined Magnetic Beacon[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021, 35(8): 1072-1087.
- [11] HE G X, HE T J, LIAO K X, et al. Experimental and Numerical Analysis of Non-Contact Magnetic Detecting Signal of Girth Welds on Steel Pipelines [J]. ISA Transactions, 2021, 6(1): 6-23.
- [12] 赵震, 杨宾峰, 王润, 等. 基于双十字形测量结构的磁信标定位方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 70-74.
- [13] ZHI S T, SUN X C, ZHANG Q Z, et al. Demagnetization Effect in a Meander-Core Orthogonal Fluxgate Sensor [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 937-949.
- [14] 刘刚, 行鸿彦, 张金玉. 一种优化的微弱信号检测方法[J]. 现代雷达, 2019, 41(6): 23-30.

(编辑: 姚树峰)