**人名需要确定一下**

一种基于三轴磁线圈的新型定位定向系统

该定位定向系统由准静态磁场中的三轴激发线圈和三轴感应线圈组成。三轴激发线圈互相正交固定，由不同频率的交流电（AC）信号激励。它们可以产生一组类似于三个正交磁偶极子产生的磁场。利用感应线圈中感应信号的幅度和相位信息，可以通过使用适当的算法来计算感应线圈的位置和方向。本文提出了一种新的算法，通过一些确定的方程组直接计算感应线圈的位置，从而可以更轻松、更快速地计算其位置和方向参数。基于这种方法，本文设计了一个带有外围电路的系统，并应用了一些特殊的信号采集和采样方法。该亮点为，提出了一种信号提取（函数拟合）的方法来获取感应线圈的耦合交流信号幅度，从而简化了硬件电路，提高了信号采集精度。仿真和实际实验结果表明，该系统工作良好，精度高。

目前有两种磁定位和定向技术，由准静态磁线圈法和磁体法实现。这两种技术都使用磁偶极子作为激励源的模型，并且使用一些磁传感器用于检测来自偶极子的信号。利用偶极子和传感器之间的耦合信号，通过应用一些适当的算法来计算位置和方向参数。磁体偶极子法的优点是源偶极子无需电源，易于实现。但是，磁铁的信号是不变的；它必须在没有磁干扰的环境中工作。例如医疗应用中跟踪人体内部的设备。另一方面，线圈偶极子法向激发线圈施加低频交流电流。传感器线圈从产生线圈接收特定频率的交流磁信号，以便系统可以确定这些耦合信号的位置和方向参数。这种线圈偶极子方法通过应用适当的信号处理方法可以具有很高的抗干扰能力。因此，工作空间可以大得多，环境约束也不会像磁体定位情况那样严格。

通常，激发线圈和感应线圈正交布置，然后提出一些具体的硬件和计算方法。 F. H. Raab 等人建议使用由三轴磁偶极子源和三轴磁传感器组成的系统；所有源线圈都由相同的信号激励，然后测量传感器的信号并确定传感器位置和方向的微小变化以更新先前的测量值。 E. Paperno 等人建议使用一对励磁线圈在空间和相位正交中产生旋转磁场，因此产生的励磁场在近场区域的任何位置都呈椭圆形旋转。因此，可以通过查找三轴感应线圈输出的极值来计算传感器的位置和方向。 P. D.戴维斯等人使用一对正交磁传感器，并找到它们的输出相对于可变磁场的矢量，由此可以确定磁性物体的运动。

我们还努力开发了一种电磁定位和定向系统，该系统专门用于脊柱手术导航[10]，[11]。在我们的系统中，三个正交线圈用作产生磁偶极子体，三个正交线圈用作传感器。为了保持较高的执行速度，所有的激发线圈同时被不同频率的信号激励。通过对采样数据应用函数拟合法直接确定具体交流传感信号的幅值和相位，这种方法不仅简化了硬件电路，而且提高了信号采集精度。然后，通过适当的算法计算偶极子物体的位置和方向。在这里，我们提出了一种新颖的算法，该算法使用几个数学方程直接计算相对于发电线圈中心的传感器位置参数

感测信号的幅度值和相位值。与其他通常使用矩阵计算或非线性优化方法的方法相比，该方法可以通过一些确定的方程来计算位置和方向参数，并且所有的计算都是用解析表达式来实现的。因此，这种方法更简单、更快、更适用。根据信号采集方法和定位算法，我们设计了用于产生和驱动产生线圈的信号以及用于接收线圈的信号放大和滤波的电子电路。最后制作了一个完整的系统，实验结果表明，均方根位置误差约为0.6 mm，方位误差小于0.3。

本文的其余部分安排如下。 第二节介绍磁偶极子产生的磁场的数学模型。 在第三节中，将介绍定位和定位方法。 在第四节中，将介绍硬件电路。 在第五节中，将展示模拟和实际实验结果，然后在第六节中得出结论。

系统数学模型

如图1所示，该系统使用了3轴激发线圈和3轴感应线圈和相关电路。3轴激发线圈发射的信号可以通过时分或者频率耦合的方式被三轴感应线圈检测到。通过定义坐标系，三轴激发线圈的位置就可以由坐标定义。3轴感应线圈的位置和方位就可以由()定义；其中是感应线圈的坐标；代表了感应线圈相对于全局坐标系的旋转角度。

通电的线圈形成磁偶极子。 通过使用图2所示的坐标系，偶极子的位置由定义，其方向由向量()定义，然后空间位置的磁通量可以由下式定义[21]

(1)

*，，*为空间位置沿着三个轴的磁通量分量；其中为相对磁导率，为真空磁导率；是一个定义了偶极子磁强度的常数；是一个从激发线圈坐标中心指向空间中一点的向量；为一个定义向量长度的标量。[17], [21]。

定位和定向方法

1. 旋转矩阵

这里，我们假设三轴发电线圈分别是正交的，使三个激发线圈的方向平行于坐标系的三个轴。 此外，我们将定义为空间位置沿传感线圈三个主轴的磁强度分量，于是可以得到

其中是与旋转角相对应的正交旋转矩阵。

根据式(1)，可以可到：

其中，=，

由于可以独立检测三轴激发线圈中每个线圈产生的磁信号，我们可以推导出以下等式。

将激发线圈的线圈1固定到x轴，可以得到，从式(4)，可以得到：

将激发线圈的线圈2固定到y轴，可以得到，可以得到：

将激发线圈的线圈3固定到z轴，可以得到，可以得到：

1. 基于等式算法

因为式(2)中的旋转矩阵是正交的，所以可以得到：

为了简化问题，令.对于激发线圈1，由式(5)-(7)，可以计算磁通量：

相似地，对于线圈2和线圈3，可以得到：

将他们加起来，我们得到：

回到式(15),(16),(17)，可以得到：

现在，我们需要找出x,y,z的符号。从式(2)，我们知道向量的内积，所以我们得到：

于是，的符号就可以由表1确定。举例子来说，当的符号为时，的符号就会是或；当的符号为时，无解。在实际应用中，我们还可以使用顺序消息来确定这些符号：将其中一个轴定义为正，于是便确定了唯一的解。

计算了之后,就可以由式(4)解出，于是旋转矩阵就可以由式(2)从3轴感应线圈的采样数据确定。

所以物体的位置和方位都被确定下来。

C 非线性优化算法

从式(2)-(4)，我们知道是传感线圈位置参数和方向参数的函数。我们为每个激发线圈和三轴感应线圈获得三个方程。由于有六个有关位置和方向的参数，两个单轴发电线圈是解决六个未知参数的最小值。 为了提高精度，最好使用更多的激发线圈，并让所有信号都可以在一个合适的时间段内被采样。

假设多个三轴激发线圈位置以如下方式排列，其中，代表了激发线圈的三个轴；，代表了三轴激发线圈的数量。为了简化问题，所有三轴激发线圈的方向都固定在相同的方向上，其中线圈的三个方向矢量是，然后，我们有九个方程与每对三轴生成线圈和三轴传感器线圈对于，就像式(5)-(13)。定义

式中指在三轴感应线圈位置相对于第个激发线圈的第个轴的采样磁场强度。分别为旋转矩阵的第1、2、3行，对应了第个激发线圈。结合式(24),w我们定义误差目标函数为

现在，我们需要求得()的最佳参数使 最小化。如果有两个以上的三轴激发线圈，这就是一个带有冗余消息的优化问题。目前有多种方法可以用来解决这个问题[18]-[21]。 通过试验，我们发现 Levenberg-Marquardt (LM) 方法具有良好的计算精度和鲁棒性[26]。

但是，与基于方程的方法相比，LM方法的执行速度较低，且当参数的初始猜测误差较大时，可能无法给出正确的解。为了解决这个问题，我们提出了一种结合这两种算法的新算法。算法中首先使用基于方程的算法找到定位和定向参数，然后使用这些计算的初始参数应用到非线性算法进行进一步计算。由于这些初始参数非常接近全局真实的位置和方向参数，非线性算法可以很容易地收敛到正确的解。因此，该系统具有令人满意的定位精度和时间效率。如表 II 所示，我们对该算法进行了50次测试，每次测试中的初始猜测误差从；并且所有样本的计算误差都。 LM算法的执行时间随着初始猜测误差的增加而增加，而基于方程和 LM 算法（Eq. +LM）在跨导为左右的结果非常接近。我们还发现 LM 算法在初始猜测误差为时出现了三次失败。

系统组成和信号采样

电路系统

图3展示了系统和电路PCB。该系统（图4显示了其框图）由发生器和接收器部分组成。在发射器部分，由MAX038（美国Maxim公司产品）产生特定频率的正弦交流信号，并由功率放大器LM3886（美国NS公司产品）供电。如图5所示，三轴激发线圈的外形尺寸为5cm\*5cm\*5cm，每个线圈300匝。线圈由这个电路激发，且这个电路的输出可以由工作站通过数字输出端口打开或关闭。

对于接收器部分，激发线圈发射的交流信号中磁通量部分由感应线圈感应（如图5(b)所示），它的外形尺寸为3cm\*3cm\*3cm，每个线圈有1600匝，带有铁芯以加强信号。然后信号经过前置放大器放大，特定频率的磁耦合信号经过带通滤波器处理。然后工作站通过模数转换器 (ADC) 对来自感应线圈的信号进行采样。 为了满足信号采样ADC卡（PCI-1730U，Advantech，台湾）的电压范围，采用可编程放大器对不同范围的磁耦合信号进行不同的放大。

B 信号提取方法

为了保证位置和方向的精度，最重要的一步是尽可能准确地提取输出电压。由于运动物体的范围大，信号可能很微弱，因此必须找到高质量的放大和滤波电路以及合适的信号提取方法[11]。

A 通过锁相放大器提取信号

为了获得磁耦合信号强度，使用锁相放大器将交流信号相对于参考信号变为直流信号。 在我们的系统中，锁相放大器由一个放大器AD630和一个低通滤波器组成。AD630有两个输入：信号输入和参考；参考信号起到选择开关的作用。当参考信号为正时，信号直接通过；当它为负时，信号反向通过它。低通滤波器用于拾取锁定放大器AD630输出的直流分量，该分量与输入信号的幅度成正比。图6和图7显示了AD630相对于不同参考的输出，其中黄色曲线是输入，蓝色曲线是AD630的输出。我们观察到不同参考相位的输出是不同的，理想情况是参考信号的与输入信号的相位差为或者。

为了对不同幅度的输入保持等效放大，我们必须固定锁定放大器的相位，理想的参考与输入信号的相位相同（或反相）（图 6）。 然而，在实际电路中，我们发现很难保持这种状态，并且输入信号的相位相对于参考信号的相位会发生一定程度的变化，因此精度可能不太理想。

通过函数拟合提取信号

在这里，我们提出了一种方法，通过提取交流耦合信号的采样信号的幅度来代替锁相放大器的幅度。传感器信号经过放大和滤波后，系统直接通过ADC对来自感应线圈的交流信号进行采样。当工作站接收到足够的数据时，采用函数拟合方法提取确定发射频率的信号。

把交流信号看作，我们可以重新写成如下形式

对这个信号进行采样，可以得到

其中。函数通过最小二乘法匹配采样信号，可以得到如下等式

解如上方程式，可以得到。使用代表信号幅度（因为线圈信号为交流信号，所以常量c不起作用而被忽略）。

与特定空间位置的磁场强度成正比，其实际值可以通过特定的激发线圈对应的接收线圈的耦合灵敏度计算得出，而灵敏度可以通过校准过程确定。

这种函数拟合方法没有锁相放大的步骤，因此具有较高的精度。 缺点是它必须获取足够的数据才能获得高精度，因此执行速度就可能会被影响。 所以我们必须设计一个快速的ADC采样电路和快速开关控制对不同的感应线圈进行采样。

表现评估

在本节中，所提出方法的性能将通过仿真实验来评估。

功能拟合评估

图8显示了频率为70Hz的信号拟合不同频率 80Hz、10Hz、130Hz、130Hz，分别对应相位51.34°、51.34°、51.34°、38.66°的输出信号幅度。我们观察到拟合的结果输出误差随着样本的增加而减小，当样本增加到无穷大时接近于零。图9显示了一个具有频率70Hz的信号与具有噪声频率的不同输入信号相匹配的输出信号幅度。 红色曲线1仅包含 70 Hz 的信号。 蓝色曲线2的信号为：

绿色曲线3的信号为：

我们观察到：

1. 当输入信号频率与拟合信号频率一样时，没有拟合误差
2. 拟合信号与噪声信号的频差越大，拟合误差越小
3. 拟合误差随样本数周期性减小。

定位和定向算法评估

该算法在MATLAB程序中进行了测试，并在1m\*1m\*1m的均匀空间下测试了3轴感应线圈。定义3轴激发线圈的坐标为.

为了测试该方法的抗干扰能力，在传感器信号中加入白噪声。为了评估性能，我们将定位误差和方向误差定义为

其中，为理论位置和理论方位，为通过我们提出的算法计算得出的结果。

图 10 显示了噪声水平为0.001(\*Bt)时定位误差和方向误差的仿真结果。图11显示了噪声水平范围为0(\*Bt)到0.01(\*Bt)下的位置误差和方向误差。从结果中，我们观察到误差随着噪声的增加而增加；当噪声水平较低(<0.002\*Bt)且传感器与发生器之间的距离不远(<1.2m)时，定位定位方法可以具有良好的性能，定位误差约为1~2 mm，定位误差约为0.34°~0.4°。

图 12 显示了系统跟踪螺旋轨迹的定位特性，其中三轴线圈放置在 (0, 0, 0.12 m) 处，信噪比为 10:1。 我们观察到，当接收机在（x：0.5：0.5 m）、（y：0.4：0.6 m）和（z：0：0.25 m）的空间内移动时，跟踪误差可以控制在几毫米以内

真实系统评估

我们用三个3轴激发线圈和两个3轴感应线圈构建了如图13所示的实时跟踪系统，。实时跟踪是由工作站通过放大和采样电路实现的。图 14 显示了实时跟踪的界面。可显示2D/3D跟踪轨迹和1到3个物体的位置和方向参数。样品如图17所示均匀分布在 500mm\*400mm\*400mm的空间内，测试结果如图 15-17所示。

我们观察到每个轴上的位置误差变化在 2 mm 以内，平均误差在 1 mm 左右。平均定向误差小于1°。稳定性也进行了测试，图 18 显示了在 7000 秒时间内位置误差都在 0.5 毫米内。

表III展示了位置和方向的平均误差和均方误差。我们观察到绝对平均位置误差为0.87 mm，绝对平均方向误差为0.64°；而均方根位置误差为0.60 mm，平均方向误差为0.26°。该精度与电磁定位系统的其他商业产品相当：例如，NDI 有几种类型的 Aurora 电磁测量系统，均方根位置误差约为0.80～1.1mm，均方方位误差约为0.15°～0.20°； Ascension Technology Corporation的“trackSTAR2”电磁定位系统的均方根位置误差约为1.4 mm，均方根方位误差约为0.5°。