

面向机器人运动跟踪的电磁定位系统

宋霜¹ 胡超^{1,2} 李抱朴¹ 李萧萧¹ 乔琬¹ 孟庆虎^{1,3}

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

² (浙江大学宁波理工学院信息学院 宁波 315100)

³ (香港中文大学电子系 香港 999077)

摘要 电磁定位具有精度高、速度快和易实现等优点,所以对手术、室内和室外机器人跟踪是一个良好的选择。电磁定位以交变电磁信号作为源信号。交变的电流信号激励发射线圈(信号激励部件)在空间中产生交变的电磁场,感应线圈(信号感应部件)在交变的电磁场中输出频率相同的信号。根据输出信号的幅值和相位信息,我们可以计算出感应线圈相对于发射线圈的位置和方向信息。本文面向机器人定位跟踪,介绍电磁定位系统的原理与实现,包括磁场模型、电磁定位算法与系统软硬件的搭建与实验。本文介绍两种不同的激励模式,分别为分时激励3轴正交发射线圈模式与同时激励2轴正交发射线圈模式,两种模式中的感应线圈均采用3轴正交线圈。实验结果表明,定位系统可以达到1 mm的定位精度。

关键词 电磁定位; 6维定位定向; 交变电磁场信号

Electromagnetic Localization and Orientation Method and System

SONG Shuang¹ HU Chao^{1,2} LI Bao-pu¹ LI Xiao-xiao¹ QIAO Wan¹ Meng Qing-hu^{1,3}

¹(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(School of Information Science & Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

³(Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract Electromagnetic localization and orientation method has the advantages of high accuracy, high speed and high applicability, so that it is a reasonable choice to be used in surgical, indoor and outdoor robots. It uses alternating signals as excitation source. The generating coils (used as the excitation part) are applied with low-frequency AC currents to generate alternating electromagnetic field in space, while sensor coils (used as the sensing part) output the same frequency signal. By using the amplitude and phase information of the output signals from the sensor coils, the position and orientation information of the sensor coils related to generating coils can be calculated. In this paper, the electromagnetic localization and orientation system is presented toward the robot localization, including the magnetic model, localization algorithm and the hardware\software of the system. Two different excitation methods are used in the system, which are the time-sharing with 3-axis generating coils and phase-division with 2-axis generating coils. Sensor coils used in these two types are 3-axis coils. Experimental results show that the system can have a good accuracy with 1 mm.

Keywords electromagnetic localization and orientation; 6D localization; alternating magnetic signal

1 引言

近年来,各种机器人技术在工业、农业、交通、

医疗、海洋、航空和社会生活中得到了越来越多的应用。机器人的工作空间已从一个小的固定机器操作范围(机械手),扩大到各种室内环境,如工厂车间、仓库、公共大厅、医院等;又从室内运动扩大到室外

作者简介: 宋霜,博士研究生,研究方向为计算机应用和定位技术, E-mail: shuang.song@siat.ac.cn; 胡超,教授,博士生导师,研究方向为自动化、机器人控制和传感器技术; 李抱朴,副研究员,博士生导师,研究方向为生物医学工程、图像处理和模式识别; 李萧萧,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统和传感器技术; 乔琬,研究助理,研究方向为模式识别、图像处理; 孟庆虎,教授,博士生导师, IEEE Fellow,研究方向为生物医学工程、机器人控制、自动化和传感器技术。

更加广阔的空间, 如自动驾驶机器人、农业操作机器人、水上机器人等。对现代机器人的控制要求达到高精度、高可靠性、高自主性, 这需要对机器人的运动信息能有高准确的实时反馈, 对机器人的本体、或其机械臂和关节实施位置和旋转变化进行跟踪, 也即要求可靠的定位技术。

定位技术随着信息技术的发展而迅速发展, 常用的技术有GPS^[1]、超声波^[2]、惯性^[3]、UWB (超宽带)^[4]、RFID (射频标签)^[5]、视频^[6]和电磁定位^[11]。GPS一般用于室外, 其定位精度在零点几米到几米范围, 所以难以应用在室内和精度要求高的场合。超声波定位采用时间到达法 (TOA)、一般在机器人的本体上布置主测距器, 在机器人运动的空间内布置超声波标签 (接收器或反射器); 主测距器发出超声波, 超声波标签接收到后又反射回主测距器, 从而确定标签与主接收器之间的距离; 超声波定位精度可以达到室内范围下的厘米级, 但是其信号衰减大, 影响其测量范围。惯性定位是一种相对机器人本体的定位技术, 一般利用加速度 (惯性) 传感器对机器人本体的运动加速度进行跟踪, 然后计算出其位置和方向; 惯性定位有一个误差积累问题, 当机器人运行一定时间后其误差会很大, 所以要与其他绝对定位技术相配合。UWB和RFID定位都是无线射频技术。UWB常采用TDOA (时间到达差) 技术, 速度快, 发射功率低, 其室内定位精度可达几到几十个厘米, 但是受环境干扰影响大, 实现较复杂。RFID在无线射频信号基础上加上了电子标签技术, 可以存储位置数据信息, 多个电子标签置于特定的空间位置上, 作为LANDMARK, 机器人能够通过通信技术读写的相关信息, 发现临近的电子标签, 并利用RSSI (信号强度法) 计算出机器人的定位参数, 目前的RFID定位精度在1 m左右。视频定位采用图像和机器视觉技术, 一是将图像传感器置于机器人本体之上, 机器人内对视频图像进行处理和辨识, 并综合机器人内的 (地理或地图库) 信息数据, 确定所处的位置和方向; 二是在机器人的运动空间范围内固定位置布置图像传感器, 拍摄机器人的运动, 然后利用图像处理 and 机器视觉技术发现机器人目标, 并确定其位置和方向变化; 视频定位的优点是信息全面、精度较高, 但是数据量大、处理速度要求高, 要求快速的信息计算能力。

相对上述的定位方法, 电磁定位技术具有精度高 (毫米级)、处理速度快、数据量少和实现方便等优

点。基于磁场的定位跟踪技术多为利用一个或者多个磁源在空间中产生磁场, 利用传感器等感应设备测量空间中特定位置的磁场强度来计算传感器与磁源之间的相对位置和方向关系。磁源有静磁场和交变的电磁场两种模式。基于静磁场的定位技术可利用永磁体作为磁源和跟踪的目标, 在空间中利用磁传感器检测磁场强度, 进而反算出永磁目标的位置和方向信息^[7,9,10,12]; 其优势在于不需供电和连接导线且实现简单, 应用于跟踪小范围内无线目标, 如用于检查人体肠胃道的无线胶囊内窥镜^[8,11,13]; 缺点是易受周围环境中磁场的影响, 定位范围小。基于电磁场的定位技术是利用交变的信号激励线圈在空间中产生变化的磁场, 利用磁传感器或者电磁线圈作为跟踪目标, 感应变化的磁场, 计算出目标相对于激励线圈的位置和方向参数。其优点是可以使用特定的信号频率和合适的信号处理方法来降低环境磁场干扰的影响来提高精度, 可以实现较大范围的定位。

电磁定位技术通常使用单个或多个线圈作为信号源在空间中产生变化的磁场, 使用2轴或者3轴正交线圈感应变化的磁场, 输出相应的电压信息, 进而计算出感应线圈的位置和方向参数^[14-23]。激励信号为周期变化的信号, 多使用正弦信号激励, 也有使用脉冲信号完成定位算法。由于电磁定位系统的抗干扰能力强, 定位范围广, 因而在人机交互, 虚拟现实, 微创手术等领域有着广泛的应用。

本文主要介绍面向机器人运动跟踪的电磁定位系统与算法。介绍了两种不同激励模式下的定位算法: 分时激励模式和相位正交激励模式。其中分时激励模式采用3轴正交线圈最为激励源, 分时接通激励信号产生变化的磁场, 使用3轴正交接收线圈感应磁场信号完成位置和方向参数的计算。计算方法有非线性最优化方法和解析解的方法。基于相位正交的模式采用两轴发射线圈作为激励源, 同时激励幅值频率相同, 相位正交的正弦信号, 同样使用3轴正交的感应线圈感应磁场强度完成计算, 计算方法为解析解的方法。两种激励方式下, 都可以得到目标的6维位置和方向信息。文章结构如下: 文章将在第2部分介绍机器人的电磁定位跟踪方法; 第3部分介绍算法中使用的磁场数学模型; 之后在第4部分介绍基于分时方式的电磁定位算法; 基于相位正交方式的定位算法将在第5部分介绍; 第6部分将介绍定位系统软硬件环境和实验结果; 第7部分为总结。

2 电磁定位机器人跟踪方式

图1为电磁定位原理图。计算机控制驱动电路使发射线圈 (Generating coils) 以特定的频率产生电磁信号。接收感应线圈 (Sensor coils) 就感应出电势信号。感应信号通过带通滤波放大器放大, 并通过相敏检波电路转换成直流信号。然后, 计算机通过AD转换器对该信号进行采样。该信号的大小即与发射与感应线圈之间的耦合关系有关; 若控制发射线圈的电流恒定, 感应线圈的感应电势幅值与其与发射线圈的相对位置和方向有关。如图1, 发射线圈中心位置为 (a,b,c) , 感应线圈的中心位置为 (x,y,z) 且其相对发射线圈的方向用三个旋转角 (α,β,γ) 表示, 电势幅值 E_M 是相对位置参数 $(x-a,y-b,z-c)$ 和角度参数 (α,β,γ) 的函数, 即 $E_M=f(x-a,y-b,z-c,\alpha,\beta,\gamma)$ 。如果有六种或以上独立的发射线圈和感应线圈 (如正交两个发射线圈和三个正交的感应线圈) 配对关系, 对不同发射线圈激励下的感应线圈电势信号进行采样, 通过算法能够计算出六个位置参数 $(x-a,y-b,z-c)$ 和角度参数 (α,β,γ) 。

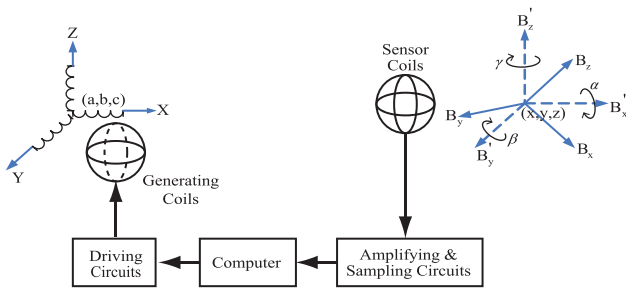


图1 电磁定位原理图

对于机器人的定位跟踪, 有多种应用方式。如对脊柱外科手术机器人的跟踪, 要求对机器人的手术器械与脊柱接触的头部实现三维位置和三维方向的精确跟踪^[27], 要求精度在1 mm以内; 同时, 对人体手术部位也要有跟踪, 这样当人体有运动时, 机器人就能对人体运动干扰进行补偿。对于这种定位, 定位空间范围不大, 但是要求精度和稳定性要高; 所以, 将发射电磁线圈置于机器人手术器械头部, 而接收线圈固定在附近的平台上, 可以采用多个感应线圈以提高定位精度。同时, 要求机器人端定位装置体积尽可能的小, 与手术器械有很好的配合。

对于室内移动机器人的定位, 主要是要跟踪机器人的运动位置变化^[25]。对于大范围室内定位, 可以将发射电磁线圈定位装置装在机器人上端较合理。而感应电磁线圈尺寸可以大些, 并以分布式线圈阵列形式布置于房间的房间四周或顶部的墙面上, 且应尽量避

免其近距离周围有铁磁材料以产生磁场干扰。机器人在室内的运动大多是二维平面运动, 但是其运动时可能有某种倾斜, 定位以三维位置确定更为合理。分布式线圈阵列的密度取决于对机器人的定位精度要求。

对于室外移动机器人的定位, 多数为机器人的运动位置跟踪, 如对智能自动小车的跟踪^[26]。同样, 可以将发射电磁线圈定位装置装在机器人上端; 而以分布式线圈阵列形式, 将大尺寸感应电磁线圈分布在地面或在机器人运动路线的侧面, 实现对发射线圈的定位, 进而完成机器人的运动跟踪。若跟踪范围较大, 则要提高发射线圈的激励电流, 并采用高性能的滤波放大器来提升信号的信噪比。

3 电磁线圈磁场数学模型

电磁定位常采用磁偶极子模型。如图2所示, 磁偶极子的定义为: 一个载流电路的圆形回路。一个磁场源可以用磁偶极子模型计算的条件是磁源自身的尺寸远小于磁源到磁场测量点的距离。由于发射线圈和接收线圈的尺寸相对于定位空间很小, 我们可以采用磁偶极子来计算发射线圈在空间中产生的磁场强度。

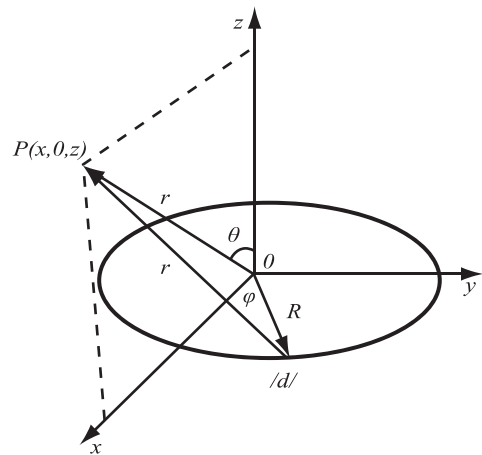


图2 载流电流圆形回路

图3所示为定位跟踪系统中使用的磁偶极子模型。磁偶极子在空间中的位置为 (a,b,c) , 磁场方向 $H_0=(m,n,p)$, 在空间中点 $P=(x,y,z)$ 产生的磁场强度可以用下面的公式表示:

$$\mathbf{B} = B_T \left(\frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{P})\mathbf{P}}{R^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R^3} \right) \quad (1)$$

其中 B_T 为常量, 大小与线圈的匝数、尺寸以及激励电流大小有关。 R 为磁偶极子到点 P 的距离。 (m,n,p) 为方向向量。

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

$$m^2 + n^2 + p^2 = 1$$

(1)分解为正交方向上的3轴分量形式为:

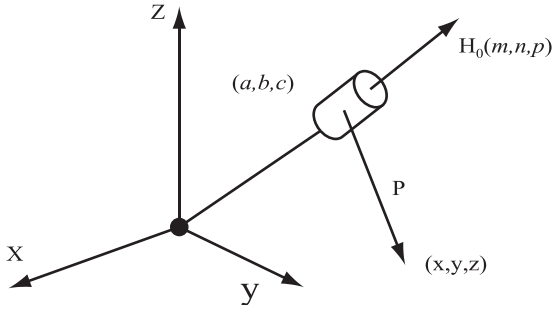


图3 磁偶极子模型

$$B_x = B_r \left(\frac{3(m(x-a) + n(y-b) + p(z-c))(x-a)}{R^5} - \frac{m}{R^3} \right) \quad (2)$$

$$B_y = B_r \left(\frac{3(m(x-a) + n(y-b) + p(z-c))(y-b)}{R^5} - \frac{n}{R^3} \right) \quad (3)$$

$$B_z = B_r \left(\frac{3(m(x-a) + n(y-b) + p(z-c))(z-c)}{R^5} - \frac{p}{R^3} \right) \quad (4)$$

后面章节中介绍的算法均是以(2)(3)(4)为基础得出。

4 基于分时激励的定位系统

这里采用三个发射线圈和三个接收线圈方案。定位系统在工作时,采用分时激励的方法。3个发射线圈依次激励频率相同的正弦信号。3个感应线圈总计感应到9组交变的信号,可以建立9个方程,求解出6个未知的参数。

定位系统示意图如图4所示。其中激励源由3个正交的线圈组成,感应线圈同样由3个正交线圈组成。基于激励线圈的3个正交方向建立定位坐标系,感应线圈的6维位置方向参数可以表示为 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 其中 (x, y, z) 表示感应线圈在定位坐标系中的位置坐标, (α, β, γ) 表示感应线圈分别绕X轴、Y轴和Z轴的旋转角度参数。

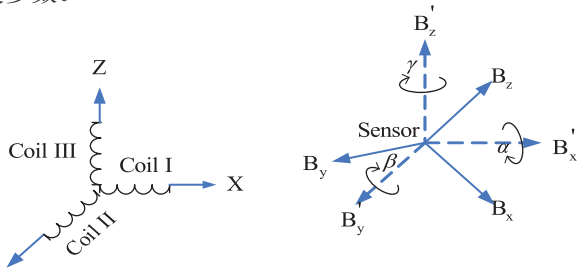


图4 电磁定位系统坐标系

图4中 (B_x, B_y, B_z) 为感应线圈感应的磁场强度值; (B'_x, B'_y, B'_z) 表示在感应线圈位置上,平行于发射线圈3

个坐标轴方向上的理论磁场强度值。两者的关系由旋转矩阵R确定:

$$\mathbf{R} \begin{pmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \text{Rot}(z, \gamma) \text{Rot}(y, \beta) \text{Rot}(x, \alpha)$$

其中,

$$\text{Rot}(x, \alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\text{Rot}(y, \beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$\text{Rot}(z, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对于每一个发射线圈, (B'_x, B'_y, B'_z) 的值可以由(2)(3)(4)计算得到, 结果为:

对于线圈I, 位置参数为 $(a, b, c) = (0, 0, 0)$, 方向参数为 $(m, n, p) = (1, 0, 0)$, 根据(2)(3)(4), 我们可以得到:

$$B'_{x1} = B_r \left(\frac{3x^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right)$$

$$B'_{y1} = B_r \frac{3xy}{R^5}$$

$$B'_{z1} = B_r \frac{3xz}{R^5}$$

对于线圈II, 位置参数为 $(a, b, c) = (0, 0, 0)$, 方向参数为 $(m, n, p) = (0, 1, 0)$, 根据(2)(3)(4), 我们可以得到:

$$B'_{x2} = B_r \frac{3xy}{R^5}$$

$$B'_{y2} = B_r \left(\frac{3y^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right)$$

$$B'_{z2} = B_r \frac{3yz}{R^5}$$

对于线圈III, 位置参数为 $(a, b, c) = (0, 0, 0)$, 方向参数为 $(m, n, p) = (0, 0, 1)$, 根据(2)(3)(4), 我们可以得到:

$$B'_{x3} = B_r \frac{3xz}{R^5}$$

$$B'_{y3} = B_r \frac{3yz}{R^5}$$

$$B'_{z3} = B_r \left(\frac{3z^2}{R^5} - \frac{1}{R^3} \right)$$

(B_x, B_y, B_z) 正比于感应线圈上产生的信号电压值。

$$(B_x, B_y, B_z) = k(V_x, V_y, V_z)$$

这里k值可以通过系统标定得到。这样每一个发射线圈与每一个感应线圈组合可以建立3个方程, 3个发射线圈共可以组成9个方程。方程中的未知数就是

我们要求的感应线圈3维位置参数和3维方向参数。求解该方程组有两种方法，一种是采用最优化算法求解，得到基于误差最小的最优解；一种是采用直接计算求解解析解的方法，得到未知数的表达式。

(1) 最优化算法求解

定义

$$\begin{pmatrix} b_{x1} \\ b_{y1} \\ b_{z1} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{pmatrix}$$

建立误差函数：

$$E = (b_{x1}, b_{y1}, b_{z1}, b_{x2}, b_{y2}, b_{z2}, b_{x3}, b_{y3}, b_{z3}) \\ - (B_{x1}, B_{y1}, B_{z1}, B_{x2}, B_{y2}, B_{z2}, B_{x3}, B_{y3}, B_{z3})$$

利用非线性最优化算法使 $E^T E$ 的值最小，如LM算法，我们可以求解出位置和方向参数 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 。

(2) 解析法求解

由于最优化算法存在计算速度慢，且计算结果依赖初始值的问题，我们提出了解析法。由(5)可以得到：

$$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \quad (6)$$

结合(6)与磁偶极子模型公式，我们可以得到：

$$\sum_{CoilI} B^2 = B_T^2 \left(\frac{3x^2}{R^8} + \frac{1}{R^6} \right) \quad (7)$$

$$\sum_{CoilII} B^2 = B_T^2 \left(\frac{3y^2}{R^8} + \frac{1}{R^6} \right) \quad (8)$$

$$\sum_{CoilIII} B^2 = B_T^2 \left(\frac{3z^2}{R^8} + \frac{1}{R^6} \right) \quad (9)$$

由(7)(8)(9)可以得到：

$$\sum B^2 = \sum_{CoilI} B^2 + \sum_{CoilII} B^2 + \sum_{CoilIII} B^2 = \frac{6B_T^2}{R^6} \\ \Rightarrow R^6 = \frac{6B_T^2}{\sum B^2} \quad (10)$$

将(10)带回(7)(8)(9)，我们可以得到感应线圈的位置参数：

$$x = \pm \frac{\sqrt{\sum_{CoilI} B^2 / B_T^2 - \sum B^2 / 6B_T^2}}{\sqrt{3} \left(\sum B^2 / 6B_T^2 \right)^{\frac{2}{3}}} \\ y = \pm \frac{\sqrt{\sum_{CoilII} B^2 / B_T^2 - \sum B^2 / 6B_T^2}}{\sqrt{3} \left(\sum B^2 / 6B_T^2 \right)^{\frac{2}{3}}} \\ z = \pm \frac{\sqrt{\sum_{CoilIII} B^2 / B_T^2 - \sum B^2 / 6B_T^2}}{\sqrt{3} \left(\sum B^2 / 6B_T^2 \right)^{\frac{2}{3}}}$$

(x, y, z) 的符号可以由下表确定，其中：

$$B_{ij} = B_{xi} B_{yj} + B_{yi} B_{xj} + B_{zi} B_{zj}$$

表1 坐标正负关系

B_{12}	B_{13}	B_{23}	x	y	z
+	+	+	+	+	+
+	+	+	-	-	-
+	-	-	-	-	+
+	-	-	+	+	-
-	+	-	+	-	-
-	+	-	-	+	+
-	-	+	+	-	+
-	-	+	-	+	-

例如，当 (B_{12}, B_{13}, B_{23}) 的值为 $(+, -, -)$ ，则 (x, y, z) 的符号为 $(-, -, +)$ 或者 $(+, +, -)$ 。没有出现在表中的符号组合表示不存在。在定位系统中我们定义了 $z > 0$ ，这样 (x, y, z) 的符号便可以确定。

得到感应线圈的位置参数后，我们便可以计算出 (B'_x, B'_y, B'_z) 的值，进而可以求出旋转矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} B_{xcoil1} & B_{xcoil2} & B_{xcoil3} \\ B_{ycoil1} & B_{ycoil2} & B_{ycoil3} \\ B_{zcoil1} & B_{zcoil2} & B_{zcoil3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B'_{xcoil1} & B'_{xcoil2} & B'_{xcoil3} \\ B'_{ycoil1} & B'_{ycoil2} & B'_{ycoil3} \\ B'_{zcoil1} & B'_{zcoil2} & B'_{zcoil3} \end{pmatrix}^{-1}$$

利用旋转矩阵，我们可以计算出3个旋转角度 (α, β, γ) 。至此，我们得到了感应线圈相对于发射线圈的6维位置和方向信息。

5 基于相位正交的定位系统

上述电磁定位系统由于采用了分时激励的模式，最少需要3个信号周期才能完成定位；同时总共需要采集9组数据来完成计算，计算量偏大。为了解决上述问题，我们提出了一种基于旋转磁偶极子模型的电磁定位算法，该方法采用相位正交的2轴激励线圈模式，2个正交的线圈同时激励幅值频率相同、相位正交的正弦信号。系统同样采用3轴正交感应线圈来感应磁场强度。该方法可以在1个信号周期完成定位，同时只需要处理3组数据就可以完成定位。因此可以简化硬件搭建，减少数据处理，提高系统定位速度。

系统如图5所示。激励源由两个正交的线圈组成。定位坐标系建立在两线圈之上。X轴激励信号为 $I \cos(\omega t)$ ，Y轴激励信号为 $I \sin(\omega t)$ ，这样的激励模式等效于一个在XY平面上以角速度 ωt 绕Z轴旋转的磁偶极子，其磁场强度大小恒定，正比于激励电流 I ，方向 $(\cos(\omega t), \sin(\omega t), 0)$ 随时间变化。

定位系统中感应线圈的位置和方向参数定义与上节相同，为 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 。图中 (V_x, V_y, V_z) 表示感应线圈输

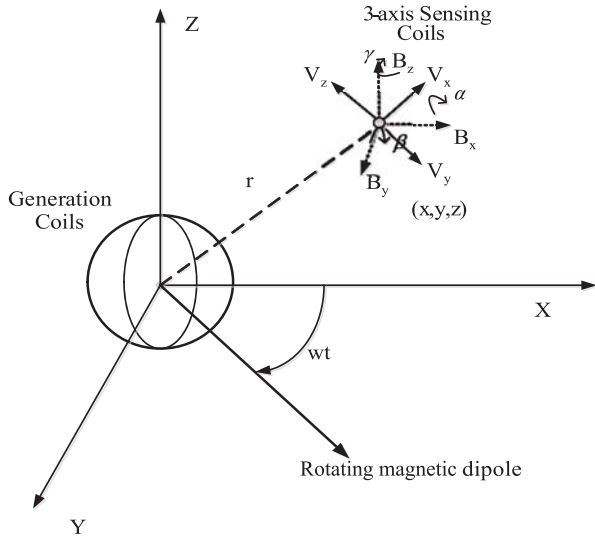


图5 基于旋转磁偶极子模型定位系统

出信号, (B_x, B_y, B_z) 表示平行于坐标轴方向上的理论磁场强度。两者关系为:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

同样我们可得到:

$$V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \quad (12)$$

定义 $u=x/r$, $v=y/r$, $w=z/r$ 。将 $(a, b, c)=(0, 0, 0)$ 和 $(m, n, p)=(\cos \omega t, \sin \omega t, 0)$ 带入(2)(3)(4), 可以得到:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_r}{r^3} \left((3u^2 - 1) \cos \omega t + 3uv \sin \omega t \right) \\ \frac{B_r}{r^3} \left(3uv \cos \omega t + (3v^2 - 1) \sin \omega t \right) \\ \frac{B_r}{r^3} (3uw \cos \omega t + 3vw \sin \omega t) \end{pmatrix} \quad (13)$$

于是,

$$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 = \frac{B_r^2}{r^6} \left(\frac{3}{2} (u^2 - v^2) \cos(2\omega t) + 3uv \sin(2\omega t) + \frac{3}{2} (u^2 + v^2) + 1 \right)$$

感应线圈输出的信号可以表示为:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \sin(\omega t + \varphi_x) \\ A_y \sin(\omega t + \varphi_y) \\ A_z \sin(\omega t + \varphi_z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \cos \omega t + b_x \sin \omega t \\ a_y \cos \omega t + b_y \sin \omega t \\ a_z \cos \omega t + b_z \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中 A 为信号幅值, φ 为信号相位信息, 且,

$$\begin{aligned} a^2 + b^2 &= A^2 \\ \operatorname{tg} \varphi &= b/a \end{aligned}$$

于是,

$$\begin{aligned} V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 &= \frac{1}{2} \sum (a^2 - b^2) \cos 2\omega t + \sum ab \sin 2\omega t + \frac{1}{2} \sum (a^2 + b^2) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \sum a^2 &= a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 \\ \sum b^2 &= b_x^2 + b_y^2 + b_z^2 \\ \sum ab &= a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \end{aligned}$$

由(12)我们可以得到:

$$\begin{cases} 3 \frac{B_r^2}{r^6} (u^2 - v^2) = \sum a^2 - \sum b^2 \\ 3 \frac{B_r^2}{r^6} uv = \sum ab \\ 3 \frac{B_r^2}{r^6} (u^2 + v^2) = \sum a^2 + \sum b^2 - 2 \frac{B_r^2}{r^6} \end{cases}$$

解之得:

$$\begin{aligned} r &= \left(\frac{2B_r^2}{\sum a^2 + \sum b^2 - \sqrt{(\sum a^2 - \sum b^2)^2 + 4(\sum ab)^2}} \right)^{\frac{1}{6}} \\ u &= \sqrt{\frac{r^6 \sum a^2}{3B_r^2} - \frac{1}{3}} \\ v &= \begin{cases} \sqrt{\frac{r^6 \sum b^2}{3B_r^2} - \frac{1}{3}} & (\text{if } \sum ab \geq 0) \\ -\sqrt{\frac{r^6 \sum b^2}{3B_r^2} - \frac{1}{3}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ w &= \sqrt{1 - u^2 - v^2} \end{aligned}$$

这样我们就得到了位置参数的解析表达式。

由(13)(14)可以得到:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{B_r}{r^3} \begin{pmatrix} 3uv & 3u^2 - 1 \\ 3v^2 - 1 & 3uv \\ 3vw & 3uw \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \cos \omega t \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \\ a_z & b_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \cos \omega t \end{pmatrix}$$

于是,

$$\begin{pmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \\ a_z & b_z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \frac{B_r}{r^3} \begin{pmatrix} 3uv & 3u^2 - 1 \\ 3v^2 - 1 & 3uv \\ 3vw & 3uw \end{pmatrix}$$

这样我们可以计算出旋转矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_y & b_y & c_y \\ a_z & b_z & c_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{B_r}{r^3} 3uv & \frac{B_r}{r^3} (3u^2 - 1) & c_1 \\ \frac{B_r}{r^3} (3v^2 - 1) & \frac{B_r}{r^3} 3uv & c_2 \\ \frac{B_r}{r^3} 3vw & \frac{B_r}{r^3} 3uw & c_3 \end{pmatrix}^{-1}$$

其中,

$$\begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_r}{r^3} 3uv \\ \frac{B_r}{r^3} (3v^2 - 1) \\ \frac{B_r}{r^3} 3vw \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{B_r}{r^3} (3u^2 - 1) \\ \frac{B_r}{r^3} 3uv \\ \frac{B_r}{r^3} 3uw \end{pmatrix}$$

得到旋转矩阵后，我们便可以计算出旋转角度。

6 实验结果

为了实现上述的电磁定位算法，我们搭建了如图6所示的电磁定位系统。系统由发射线圈、感应线圈、信号发射采集电路和主机软件界面组成。信号发射和采集电路如图7所示，包括信号发生芯片、功率放大芯片、滤波电路、放大电路和电源芯片。发射感应线圈如图8所示。定位系统由3组3轴正交的发射线圈组成，3组线圈以等腰三角形分布在同一平面上。主机通过信号发射电路控制每个发射线圈的选通，并通过数据采集卡将感应线圈感应到的信号采集处理，将计算出的位置和方向参数在主机显示界面上显示，显示界面如图9所示，包括目标的3D轨迹线和2D平面轨迹线，以及目标的位置坐标信息和旋转角度信息。

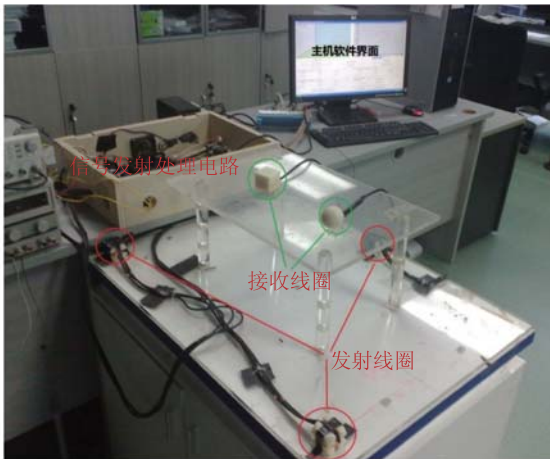


图6 电磁定位系统整体图



图7 电磁定位系统信号发生与采集电路

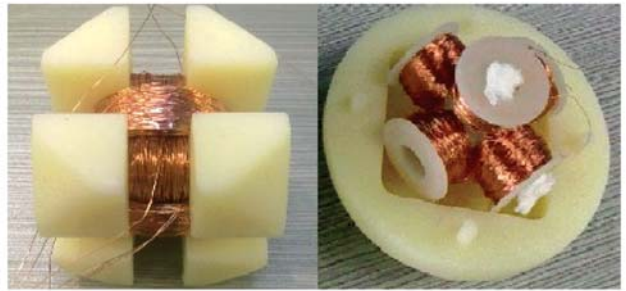


图8 发射线圈与感应线圈

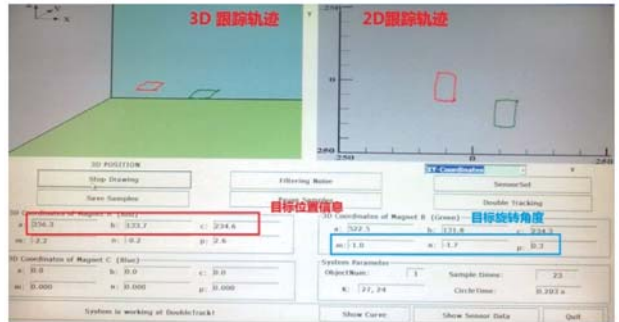


图9 电磁定位系统运行显示界面

我们在空间中选取了12个位置点测试了基于相位正交发射模式的定位算法。测试的定位算法为基于相位正交的激励模式下的算法。测试中使用了1组发射线圈的两轴作为激励源，使用3轴感应线圈作为跟踪目标。测试点实验结果如图10所示。其中红色的点为真实位置，绿色的点为计算结果。

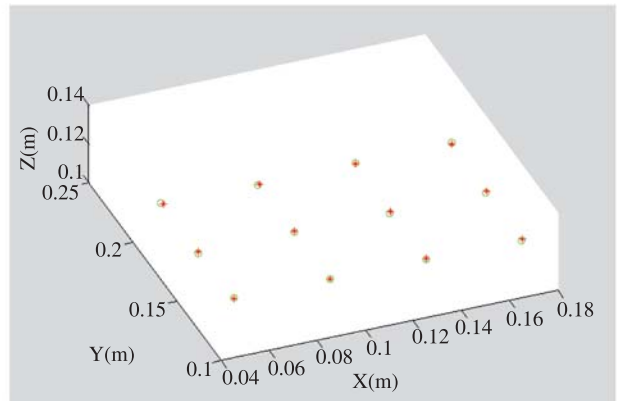


图10 定位系统测试点和测试结果

定义位置误差和方向误差函数如下：

$$E_p = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2 + (z_c - z_r)^2}$$

$$E_o = (|\alpha_c - \alpha_r| + |\beta_c - \beta_r| + |\gamma_c - \gamma_r|) / 3$$

其中 $(x_c, y_c, z_c, \alpha_c, \beta_c, \gamma_c)$ 表示利用电磁定位算法得到的计算结果， $(x_r, y_r, z_r, \alpha_r, \beta_r, \gamma_r)$ 表示真实的位置和方向信息。

图11所示为12个测试点的精度信息，其中平均定位误差由于1 mm，平均定向误差为2.4°。

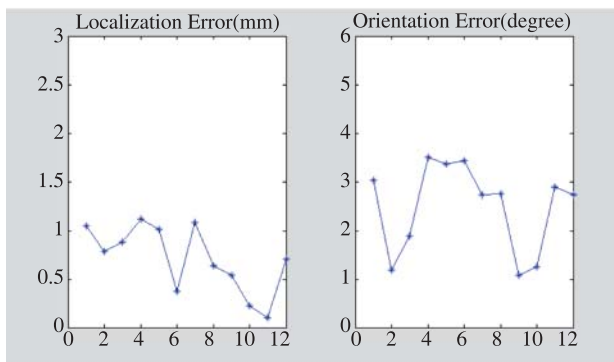


图11 定位系统测试点精度

7 总 结

本文介绍了基于变化电磁场的6维定位算法和系统。系统可以采用基于分时激励3轴发射线圈模式,也可以采用基于相位正交2轴发射线圈模式。实验结果表明,系统具有很好的精度。在未来的工作中,我们将继续改进线圈的制作工艺,完善信号发射与采集电路,进一步提高系统的精度和实用性。

参 考 文 献

- [1] Drawil N M, Amar H M, Basir O A. GPS localization accuracy classification: a context-based approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1): 262-273.
- [2] Saad M M, Bleakley C J, Balle T, et al. High-accuracy reference-free ultrasonic location estimation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(6): 1561-1570.
- [3] Hegrenas O, Hallingstad O. Model-aided INS with sea current estimation for robust underwater navigation [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(2): 316-337.
- [4] Mahfouz M R, Kuhn M J, To G, et al. Integration of UWB and wireless pressure mapping in surgical navigation [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(10): 2550-2564.
- [5] Ni L M, Zhang D. RFID-based localization and tracking technologies [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011: 45-51.
- [6] Charlson E J, Graham H L, Zhuang X. Video camera method for moving-vehicle localization [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, 47(2): 686-693.
- [7] Schlageter V, Besse P A, Popovic R S, et al. Tracking system with five degrees of freedom using 2D-array of hall sensors and a permanent magnet [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 92(1): 37-42.
- [8] Enpuku K, Kuroda D, Yang T Q, et al. High TC SQUID system and magnetic marker for biological immunoassays [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13(2): 371-376.
- [9] Birsan M. Recursive bayesian method for magnetic dipole tracking with a tensor gradiometer [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(2): 409-415.
- [10] Yang W A, Hu C, Meng M Q H, et al. A six-dimensional magnetic localization algorithm for a rectangular magnet objective based on a particle swarm optimizer [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(8): 3092-3099.
- [11] Hu C, Song S, Wang X, et al. A novel positioning and orientation system based on 3-axis magnetic coils [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(7): 2211-2219.
- [12] Hu C, Li M, Song S, et al. A cubic 3-axis magnetic sensor array for wirelessly tracking magnet position and orientation [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2010, 10(5): 903-913.
- [13] Paperno E, Sasada I, Leonovich E. A new method for magnetic position and orientation tracking [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(4): 1938-1940.
- [14] 胡超, 宋霜, 阳万安, 等. 胶囊内窥镜位置方向磁场定位技术的研究 [J]. *集成技术*, 2012, 1(1): 105-113.
- [15] Kalmus H P. A new guiding and tracking system [J]. *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, 1962, 9: 7-10.
- [16] Raad F E, Blood E B, Steiner T O, et al. Magnetic position and orientation tracking system [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, AES-15(5): 709-717.
- [17] Kuipers J. Apparatus for generating a nutating electromagnetic field: U.S. Patent 40170858 [P]. April 1977.
- [18] Suzuki T S, Ando S. A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 3291-3293.
- [19] Plotkin A, Shafir O, Paperno E, et al. Magnetic eye tracking a new approach employing a planar transmitter [J]. *IEEE Transactions in Biomedical Engineering*, 2010, 57(5): 1209-1215.
- [20] Li H, Yan G, Ma G. An active endoscopic robot based on wireless power transmission and electromagnetic localization [J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2008, 4: 355-367.
- [21] Paperno E, Sasada I, Leonovich E. A new method for magnetic position and orientation tracking [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(4): 1938-1940.
- [22] Li M, Song S, Hu C, et al. A novel method of 6-DoF electromagnetic navigation system for surgical robot [C] // *Proceedings of 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 2010: 2163-2167.
- [23] Tian J, Song S, Wang X. An improved method and algorithm for electromagnetic localization [C] // *Proceedings in IEEE International Conference on Information Automation*, 2011: 406-411.
- [24] Plotkin A, Paperno E, Vasserman G, et al. Magnetic tracking of eye motion in small, fast-moving animals [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11): 4492-4495.
- [25] Cheng L, Wu C, Zhang Y. Indoor Robot Localization Based on Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(3): 1099-1104.
- [26] Chang B L, Wang D W. GPS-based tracking control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(4): 480-484.
- [27] 韩建达, 宋国立, 赵忆文, 等. 脊柱微创手术机器人研究现状 [J]. *机器人技术与应用*, 2011, 4(7): 1004-6437.