



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103575271 A

(43) 申请公布日 2014. 02. 12

(21) 申请号 201310516908. 3

(22) 申请日 2013. 10. 29

(71) 申请人 复旦大学

地址 200433 上海市杨浦区邯郸路 220 号

(72) 发明人 邬小玫 沙敏 王一枫 丁宁

金炼

(74) 专利代理机构 上海正旦专利代理有限公司

31200

代理人 陆飞 盛志范

(51) Int. Cl.

G01C 21/00(2006. 01)

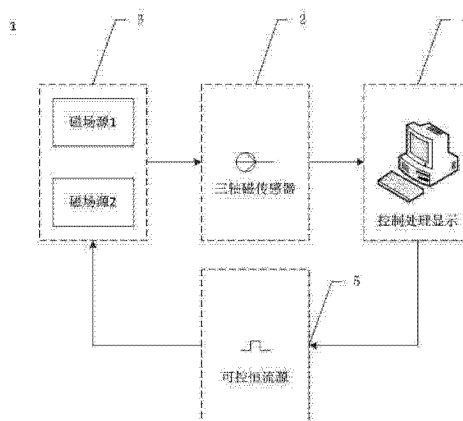
权利要求书4页 说明书8页 附图7页

(54) 发明名称

基于电控旋转磁场的电磁跟踪系统及方法

(57) 摘要

本发明属于电磁跟踪技术领域,具体为一种电控旋转磁场的电磁跟踪系统及方法。本发明由三轴磁传感器装置、磁场源装置、可控恒流源装置和控制处理显示装置组成。本发明用可控恒流源激励三个正交的线圈组成磁场源;控制处理显示装置通过可控恒流源装置输出的各路激励电流强度,使磁场源产生的合成磁感应强度最大值按照搜索策略进行扫描,并最终指向三轴磁传感器装置;根据两个磁场源扫描并最终指向三轴磁传感器所获得的两组角度信息以及它们中心点之间的距离信息,计算传感器六自由度的位置和姿态。本发明不依赖于某种假定的磁场模型或迭代算法,稳定性高,计算复杂度低,可应用于微创手术的导航,亦可运用于虚拟(增强)现实、三维超声成像等领域。



1. 一种基于电控旋转磁场的电磁跟踪系统,其特征在于:由一个三轴磁传感器装置、一个磁场源装置、一个可控恒流源装置和一个控制处理显示装置组成;其中:

所述三轴磁传感器装置附着于跟踪目标上,用于测量所在位置三个正交方向的磁感应强度;

所述磁场源装置包括相对位置和姿态已知的第一磁场源 1 和第二磁场源 2,两个磁场源分别由三个缠绕在软磁铁氧体材料做成的磁芯上、中心点重合且相互正交的线圈组成;两个磁场源中心点之间的距离为  $d$ ,且三组对应线圈相互平行;

所述可控恒流源装置为各线圈提供激励电流;分别改变三轴线圈激励电流强度,可控制第一磁场源 1、第二磁场源 2 产生的合成磁感应强度最大值指向的改变;

所述控制处理显示装置通过控制可控恒流源装置输出的各路激励电流强度,使磁场源产生的合成磁感应强度最大值按照一定的搜索策略进行扫描,并最终指向三轴磁传感器装置;根据两个磁场源扫描并最终指向三轴磁传感器所获得的两组角度信息以及它们中心点之间的距离信息,由位置和姿态算法,计算传感器六自由度的位置和姿态;

磁场源装置和三轴磁传感器装置的空间位置及姿态,由如下定义的五个坐标系描述:

第一坐标系 1:由第一磁场源 1 的初始位置和姿态定义的坐标系,组成第一磁场源 1 的三个线圈的轴线分别沿该坐标系的三个坐标轴,该坐标系也是系统坐标系,坐标系原点为  $(0,0,0)$ ;

第二坐标系 2:由第二磁场源 2 的初始位置和姿态定义的坐标系,组成第二磁场源 2 的三个线圈的轴线分别沿该坐标系的三个坐标轴,第二坐标系 2 的原点在系统坐标系中的坐标为  $(d,0,0)$ ,各坐标轴与系统坐标系中的相应坐标轴平行;

第三坐标系 3:第一坐标系 1 的 X 轴旋转至第一磁场源 1 产生的磁感应强度最大值指向时所构成的坐标系;

第四坐标系 4:第二坐标系 2 的 X 轴旋转至第二磁场源 2 产生的磁感应强度最大值指向时所构成的坐标系;

第五坐标系 5:原点与三轴磁传感器的中心点重合,坐标轴方向分别与三轴磁传感器相应检测轴方向一致的坐标系;

$X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$  表示坐标系  $n$  的三个坐标轴; $n=1,2,\dots,5$ ;

描述三轴磁传感器装置空间位置和姿态以及磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向的角度定义如下:

经度角:指从第一坐标系 1 的原点到三轴磁传感器中心点之间的连线在  $X_1Y_1$  平面的投影与  $X_1$  轴之间的夹角;或者磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向在  $X_1Y_1$  平面的投影与  $X_1$  轴之间的夹角;

纬度角:指从第一坐标系 1 的原点到三轴磁传感器中心点之间的连线与该连线在  $X_1Y_1$  平面的投影之间的夹角;或者磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向与该指向在  $X_1Y_1$  平面投影之间的夹角。

2. 根据权利要求 1 所述的基于电控旋转磁场的电磁跟踪系统,其特征在于所述可控恒流源装置由恒流源、控制电路组成;恒流源输出的电流强度由控制处理显示装置控制;控制电路将恒流源输出的电流整形为脉冲形式,为磁场源装置各线圈提供合适的激励电流,并且实现对构成第一磁场源 1、第二磁场源 2 的两组线圈的交替激励。

3. 根据权利要求 1 所述的基于电控旋转磁场的电磁跟踪系统,其特征在于所述控制处理显示装置,由控制单元、算法单元和显示输出单元组成;

控制单元包括两个部分:采样处理模块和激励电流控制模块;采样处理模块用于采样处理来自三轴磁场传感器装置的信号;激励电流控制模块控制可控恒流源装置对磁场源装置的各线圈提供合适强度的激励电流;

算法单元一方面根据采样处理模块的输出数据计算当前三轴磁场传感器装置检测到的磁感应强度值,进而根据搜索策略决定组成磁场源各线圈的激励电流强度;另一方面,当磁场源装置中的两个磁场源形成的合成磁感应强度最大值分别指向磁传感器时,计算磁传感器的空间位置坐标和空间姿态;

显示输出单元将磁传感器的定位信息显示/输出。

4. 基于权利要求 1-3 之一所述电磁跟踪系统的电磁跟踪方法,其特征在于具体步骤为:

三轴磁传感器装置测量其所在位置的三个正交方向上的磁感应强度值,送至控制处理显示装置;

控制处理显示装置计算当前的合成磁感应强度值,并根据搜索策略控制可控恒流源装置输出适当强度的电流分别激励磁场源装置中第一磁场源 1 的三轴线圈,第一磁场源 1 的三轴线圈产生的磁感应强度最大值均沿各自轴向,并按照矢量合成的原理形成方向与各线圈激励电流强度相关的合成磁感应强度最大值;

改变三个线圈的激励电流强度,从而改变磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向,对传感器进行搜索;当三轴磁传感器装置检测到最大磁感应强度时,表明由第一磁场源 1 产生的合成磁感应强度最大值指向磁传感器,根据此时磁场源装置的三轴线圈的激励电流强度,计算出此时磁感应强度最大值指向在第一坐标系 1 中的经纬度角;

磁场源装置中第二磁场源 2 通过与第一磁场源 1 相似的步骤搜索并最终指向磁传感器装置,即获得另外一组经纬度角;

根据所获得的两组经纬度角信息,结合磁场源装置中第一磁场源 1 和第二磁场源 2 中心点之间的距离  $d$ ,即计算求得磁传感器装置的六自由度空间位置和空间姿态。

5. 根据权利要求 4 所述的电磁跟踪方法,其特征在于在电控磁场旋转的过程中,需保证三轴电流合成后的模一致,为简化起见,假设模为 1,则轴线为 X 轴、Y 轴、Z 轴的三个线圈的激励电流强度  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  需满足下式:

$$|F_1|^2 + |F_2|^2 + |F_3|^2 = 1$$

若要求磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向的经纬度角为  $A$ 、 $B$ ,则磁场源三轴线圈的激励电流强度可由下式计算:

$$\begin{cases} F_1 = \cos A \cos B \\ F_2 = \sin A \cos B \\ F_3 = \sin B \end{cases}$$

磁场源通过控制合成磁感应强度最大值指向旋转并最终指向三轴磁传感器的搜索过程中,设三轴磁传感器在第一坐标系 1 中的位置用经纬度角  $(\alpha, \beta)$  和距离  $R$  表示;以  $X_1Y_1$  平面作为第一磁场源 1 和第二磁场源 2 的初始搜索平面,此时磁场源合成的磁感应强度最

大值方向的纬度角  $B=0$  ,则三个线圈的激励电流强度计算如下 :

$$\begin{cases} F1 = \cos A \cos B = \cos A \\ F2 = \sin A \cos B = \sin A \\ F3 = \sin B = 0 \end{cases}$$

根据搜索范围,通过改变磁场源线圈激励电流  $F1$ 、 $F2$  使磁场源合成磁感应强度最大值指向的经度角  $A$  在  $0^\circ-180^\circ$  或  $0^\circ-360^\circ$  范围内变化,则三轴磁传感器装置检测到磁感应强度最大值时所对应的经度角对应于磁场源合成磁感应强度最大值指向三轴磁传感器在  $X1Y1$  平面的投影,设  $\alpha_1$  为第一磁场源 1 对应的经度角,  $\alpha_2$  为第二磁场源 2 对应的经度角;

之后,保持经度角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  不变,通过改变磁场源线圈激励电流  $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$  使磁场源合成磁感应强度最大值指向的纬度角  $B$  在  $-90^\circ-90^\circ$  范围内变化;则三轴磁传感器装置检测到磁感应强度最大值所对应的纬度角:设第一磁场源 1 对应的为  $\beta_1$ ,第二磁场源 2 对应的为  $\beta_2$ ,此时,对应于磁场源合成的磁感应强度最大值指向三轴磁传感器;这样得到两组旋转角  $(\alpha_1, \beta_1)$  和  $(\alpha_2, \beta_2)$ ,对应于第一磁场源 1、第二磁场源 2 产生的合成磁感应强度最大值分别指向三轴磁传感器时的经纬度角;

此时,第一磁场源 1 三轴线圈激励电流强度为:

$$\begin{cases} F1 = \cos \alpha_1 \cos \beta_1 \\ F2 = \sin \alpha_1 \cos \beta_1 \\ F3 = \sin \beta_1 \end{cases}$$

第二磁场源 2 三轴线圈激励电流强度为:

$$\begin{cases} F1 = \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \\ F2 = \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \\ F3 = \sin \beta_2 \end{cases} .$$

6. 根据权利要求 5 所述的电磁跟踪方法,其特征在于关于空间位置算法如下:设三轴磁传感器在第一坐标系 1 中的位置坐标为  $(x, y, z)$ ,其在  $X1Y1$  平面内的投影  $(x, y, 0)$  到磁场源 1 和磁场源 2 的距离分别为  $a$ 、 $b$ ,则位置坐标  $(x, y, z)$  计算如下:

$$x = \frac{d \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1}$$

$$y = \frac{d \tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1}$$

$$z = \begin{cases} \frac{d \tan \alpha_2 \tan \beta_1}{\cos \alpha_1 \tan \alpha_2 - \sin \alpha_1}, a < b \\ \frac{d \tan \alpha_1 \tan \beta_2}{\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \tan \alpha_1}, a \geq b \end{cases} .$$

7. 根据权利要求 5 所述的电磁跟踪方法,其特征在于空间姿态算法如下:三轴磁传感

器的空间姿态表示为第一坐标系 1 到第五坐标系 5 的旋转,由矩阵  $R_{15}$  表示:

$$R_{15} = R_{35}R_{13} = R_{53}^{-1}R_{13}$$

$$R_{15} = R_{45}R_{14} = R_{54}^{-1}R_{14}$$

其中,  $R_{35}$  为第三坐标系 3 到第五坐标系 5 之间的旋转矩阵,  $R_{45}$  为第四坐标系 4 到第五坐标系 5 的旋转矩阵,  $R_{13}$  为第一坐标系 1 与第三坐标系 3 之间的旋转矩阵,  $R_{14}$  为第一坐标系 1 与第四坐标系 4 之间的旋转矩阵; 由于  $(\alpha_1, \beta_1)$  和  $(\alpha_2, \beta_2)$  已知,  $R_{13}$ 、 $R_{14}$  直接计算如下:

$$R_{13} = Y(-\beta_1)Z(\alpha_1)$$

$$R_{14} = Y(-\beta_2)Z(\alpha_2)$$

为求解矩阵  $R_{53}$  或  $R_{54}$ , 将旋转矩阵  $R_{53}$  表示成欧拉角的形式, 即:

$$\tan \varphi = B_{1y} / B_{1x}$$

式中,  $\psi$ 、 $\theta$ 、 $\phi$  由下面三式计算:

$$\tan \theta = B_{1z} / (B_{1x} \cos \varphi + B_{1y} \sin \varphi)$$

$$\begin{cases} \psi = \psi' + k\pi \\ \psi' = \arcsin \frac{P}{\sqrt{M^2 + N^2}} - \gamma \\ k = [\text{sgn}(K \cos \psi' + L \sin \psi') - 1] / 2 \end{cases}$$

上式中的参数为:

$$\begin{cases} P = -a_{21}b_1 \\ M = a_{22}b_2 + a_{23}b_3 \\ N = a_{22}b_3 - a_{23}b_2 \\ \gamma = \arctan(M / N) \\ K = a_{12}b_2 + a_{13}b_3 \\ L = a_{12}b_3 - a_{13}b_2 \end{cases}$$

其中,  $a_{ij}$ ,  $b_i$  是 A 和 B 中的元素。

## 基于电控旋转磁场的电磁跟踪系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电磁跟踪技术领域,具体涉及一种通过控制磁场源线圈激励电流实现磁场旋转的电磁跟踪的系统和方法。

### 背景技术

[0002] 电磁跟踪是一种利用磁场源与磁传感器之间的磁场耦合关系,获得跟踪目标空间位置和空间姿态的方法,在微创手术导航中具有广泛的应用前景,成为目标跟踪领域的研究热点。相较于其他跟踪方式,电磁跟踪具有无损伤、无辐射、无遮挡问题、操作简便、定位准确、定位信息完备(可实现三维六自由度定位:三自由度位置和三自由度方向)等优点;但同时存在依赖理论磁场模型、迭代算法复杂、易受干扰等问题。针对传统磁跟踪方法存在的问题,本研究组提出了一种基于旋转磁场的电磁跟踪方法,该方法不依赖于磁场理论模型、采用非迭代的几何算法实现三维六自由度定位。与传统磁跟踪方法相比,本方法的算法简洁、运算速度快;通过简单的标定即可实现更高的定位精度。

[0003] 磁场旋转可以通过机械方式实现,即机械扫描的搜索方式:根据通电螺线管产生的磁感应强度最大值沿轴线方向的原理,通过步进电机控制处于不同位置的两个螺线管旋转,当两个通电螺线管轴线指向传感器时,传感器可以分别检测到最大磁感应强度,然后根据两个螺线管之间的距离(已知)及螺线管由初始位置到指向传感器的旋转角度,通过几何方法可以计算出传感器的空间位置和姿态。

[0004] 这种通过机械扫描实现旋转磁场电磁跟踪的方式能够准确定位,但其定位速度受到步进电机带动螺线管旋转速度的限制,系统的实时性较差;并且机械扫描只能在步进电机有限的旋转平面中进行,搜索灵活性较差。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提出一种可以显著提高跟踪实时性和扫描灵活性的基于电控旋转磁场的电磁跟踪方法和系统。

[0006] 本发明提出的电磁跟踪方法与系统,是通过电控旋转磁场实现电磁跟踪。本发明设计了一种由三个缠绕在软磁铁氧体磁芯上的、中心点重合且相互正交的线圈组成的磁场源模型,根据单线圈磁感应强度最大值方向为其轴线方向以及三轴合成的总磁感应强度最大值由单轴最大值合成的特性,通过控制三轴线圈激励电流实现合成的总磁感应强度指向的旋转,从而对跟踪目标(磁传感器)进行搜索定位。

[0007] 本发明的特点之一在于不依赖于某种假定的磁场模型建立磁场源与磁传感器之间的耦合关系,避免了由于磁场源实际分布与理想磁场源不一致而产生的定位误差;本发明的特点之二在于采用非迭代的几何算法,计算复杂度低,不仅可大幅度提高定位速度,还避免了迭代算法可能收敛到局部最优解或发散等问题造成的系统不稳定。本发明的特点之三,在于通过快速改变磁场源三个正交线圈激励电流强度,实现合成的最大磁感应强度指向的快速自由改变,有效提高跟踪系统的实时性和搜索(扫描)的灵活性。

[0008] 为了便于说明,先定义如表 1 所示的五组坐标系:

表 1 坐标系定义

坐标系名称	描述
坐标系 1	由磁场源 1 的初始位置和姿态定义的坐标系。组成磁场源 1 的三个线圈的轴线分别沿该坐标系的三个坐标轴。该坐标系也是系统坐标系,坐标系原点为(0,0,0)
坐标系 2	由磁场源 2 的初始位置和姿态定义的坐标系。组成磁场源 2 的三个线圈的轴线分别沿该坐标系的三个坐标轴。坐标系 2 的原点在系统坐标系中的坐标为(d,0,0),各坐标轴与系统坐标系中的相应坐标轴平行
坐标系 3	坐标系 1 的 X 轴旋转至磁场源 1 产生的磁感应强度最大值指向时所构成的坐标系
坐标系 4	坐标系 2 的 X 轴旋转至磁场源 2 产生的磁感应强度最大值指向时所构成的坐标系
坐标系 5	原点与三轴磁传感器的中心点重合,坐标轴方向分别与三轴磁传感器相应检测轴方向一致的坐标系

用  $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$  表示坐标系  $n$  的三个坐标轴,  $n=1, 2, \dots, 5$ 。

[0009] 描述三轴磁场传感器装置空间位置和姿态以及磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向的角度定义如下:

经度角:指从坐标系 1 的原点到三轴磁传感器中心点之间的连线在  $X_1Y_1$  平面的投影与  $X_1$  轴之间的夹角;或者磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向在  $X_1Y_1$  平面的投影与  $X_1$  轴之间的夹角。

[0010] 纬度角:指从坐标系 1 的原点到三轴磁传感器中心点之间的连线与该连线在  $X_1Y_1$  平面的投影之间的夹角;或者磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向与该指向在  $X_1Y_1$  平面投影之间的夹角。

[0011] 本发明提出的电磁跟踪系统,由四部分构成:一个三轴磁传感器装置,由两组三轴正交线圈组成的、可以分别实现最大磁感应强度空间任意指向的磁场源装置,一个可控恒流源装置,一个控制处理显示装置。系统结构如图 2 所示。其中:

所述磁传感器装置,附着于跟踪目标,用于测量跟踪目标所在位置处三个正交方向的磁场。磁传感器装置中传感器的选择依据测量范围和精度的要求,可以采用磁阻传感器、霍尔效应传感器或磁通门传感器等。

[0012] 所述磁场源装置,包括两个相对位置和姿态已知的磁场源,两个磁场源分别由缠绕在软磁性铁氧体磁芯上的三个中心点重合且相互正交的线圈组成;线圈需要保证很好的正交性和对称性,其中线圈的截面形状可采用方形或者圆形等。对三个线圈通电后,即可分别在每个线圈的轴线方向产生磁感应强度最大值;当所通电流强度变化时,磁感应强度最大值的大小也随之变化。由于三个正交的磁感应强度最大值可通过矢量合成的方法形成唯一的合成磁感应强度最大值,故通过分别控制三个正交线圈所通电流强度,即可实现对合成磁感应强度最大值指向的控制,即实现磁场旋转。磁场源需依据一定的搜索策略,通过磁场旋转搜索传感器,当传感器检测到最大磁感应强度时,说明合成磁感应强度最大值指向传感器;当一组正交线圈组成的磁场源的合成磁感应强度最大值指向传感器时,可以得到一组由三轴线圈激励电流强度确定的合成磁感应强度最大值指向在系统坐标系中的经纬度角;当两个磁场源产生的合成磁感应强度最大值分别指向传感器时,可以得到两组经纬度角,结合两个磁场源之间的相对位置和初始姿态,即可用几何方法求解传感器的空间位置和姿态。

[0013] 所述恒流源装置,由恒流源及相关电路组成,为构成磁场源的线圈提供激励电流。

[0014] 所述控制处理显示装置,由微处理器和显示器组成,用于采集磁传感器装置的输出并计算当前合成磁感应强度值,根据计算结果,通过控制磁场源线圈激励电流强度控制磁场源合成磁感应强度最大值方向的改变,并使合成磁感应强度最大值最终指向磁传感

器；最后，依据下文所述的位置和姿态算法，计算出传感器六自由度的位置和姿态，输出并显示跟踪结果。

[0015] 本发明中，所述三轴磁传感器装置，包括一个三轴分量磁传感器和一个信号调理 / 模拟 - 数字 (AD) 转换模块。三轴分量传感器分别用来检测所在位置三个正交方向 X5、Y5 和 Z5 的磁感应强度，其输出经后续信号调理 / 模拟 - 数字 (AD) 转换模块送入控制处理显示装置。

[0016] 本发明中，所述磁场源装置，包括磁场源 1 和磁场源 2，其组成和结构完全相同：均由三轴线圈组成。每个磁场源的三轴线圈分别缠绕在软磁铁氧体磁芯上，且中心点重合、相互正交。这样，在与磁场源中心点等距离的球面上，单轴线圈的磁感应强度最大值为该线圈的轴线位置，方向沿轴线方向，三轴线圈合成的总磁感应强度最大值由单轴最大值合成。两个磁场源中心点之间的距离为  $d$ ，且三组对应线圈相互平行。

[0017] 本发明中，所述可控恒流源装置，由恒流源、控制电路组成。恒流源输出的电流强度由控制处理显示装置控制。控制电路将恒流源输出的电流整形为脉冲形式，为磁场源装置的各线圈提供合适的激励电流，并且实现对构成磁场源 1、2 的两组线圈的交替激励。

[0018] 本发明中，所述控制处理显示装置，由控制单元、算法单元和显示输出单元组成。控制单元包括两个部分：采样处理模块和激励电流控制模块。采样处理模块用于采样处理来自三轴磁场传感器装置的信号；激励电流控制模块控制可控恒流源装置对磁场源装置的各线圈提供合适强度的激励电流。算法单元一方面根据采样处理模块的输出数据计算当前三轴磁场传感器装置检测到的磁感应强度值，进而根据搜索策略决定组成磁场源各线圈的激励电流强度；另一方面，当磁场源装置中的两个磁场源形成的合成磁感应强度最大值分别指向磁传感器时，根据下文所述算法计算磁传感器的空间位置坐标和姿态。显示输出单元将磁传感器的定位信息显示 / 输出。

[0019] 本发明提出的基于上述电磁跟踪系统的电磁跟踪方法，其步骤为（以磁场源 1 的搜索过程为例）：三轴磁传感器装置测量其所在位置的三个正交方向上的磁感应强度值，送至控制处理显示装置；控制处理显示装置计算当前的合成磁感应强度值，并根据搜索策略控制可控恒流源装置输出适当强度的电流分别激励磁场源装置中磁场源 1 的三轴线圈，磁场源 1 的三轴线圈产生的磁感应强度最大值均沿各自轴向，并按照矢量合成的原理形成方向与各线圈激励电流强度相关的合成磁感应强度最大值；改变三个线圈的激励电流强度即可改变磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向，对传感器进行搜索；当三轴磁传感器装置检测到最大磁感应强度时，表明由磁场源 1 产生的合成磁感应强度最大值指向磁传感器，根据此时磁场源装置的三轴线圈的激励电流强度，计算出此时磁感应强度最大值指向在坐标系 1 中的经纬度角。磁场源装置中磁场源 2 通过与磁场源 1 相似的步骤搜索并最终指向磁传感器装置，即获得另外一组经纬度角。根据所获得的两组经纬度角信息，结合磁场源装置中磁场源 1 和磁场源 2 中心点之间的距离  $d$ ，即计算求得磁传感器装置的六自由度空间位置和空间姿态。

[0020] 在确定磁场源三轴正交线圈激励电流强度方面，若要求磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向的经纬度角为  $A, B$ ，则构成磁场源的轴线为 X 轴、Y 轴、Z 轴的三个线圈的激励电流强度  $F_1, F_2, F_3$  由式 (1)、(2) 决定：



$$\begin{cases} F1 = \cos A \cos B \\ F2 = \sin A \cos B \\ F3 = \sin B \end{cases} \quad (1)$$

$$|F1|^2 + |F2|^2 + |F3|^2 = 1 \quad (2)$$

所述的搜索策略在电扫描系统中具有高度的灵活性和实时性。为了简化问题,本发明以机扫系统中的常规搜索策略为例进行说明。假设三轴磁传感器在坐标系 1 中的位置用经纬度角  $(\alpha, \beta)$  和距离 R (坐标系 1 原点与三轴磁传感器中心点,即坐标系 5 原点之间的距离) 定义。磁场源 1 三轴正交线圈的轴线方向分别为 X1、Y1、Z1,在 X1Y1Z1 空间中,为了保证磁场源 1 产生的合成磁感应强度最大值指向遍历整个跟踪区域,可控制三个正交线圈的激励电流强度,使其先在一个面上搜索,如 X1Y1 平面(即  $B=0, F1=\cos A, F2=\sin A, F3=0$ );通过改变激励电流 F1、F2,使 A 在  $0^\circ-360^\circ$  范围内变化;当  $A=\alpha$  时,传感器可检测到最大磁感应强度值(此时磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向传感器在 X1Y1 平面的投影);然后保持经度角  $A=\alpha$  不变,取  $F3=\sin B$ ,通过改变激励电流 F3,使 B 在  $-90^\circ-90^\circ$  范围内变化,当  $B=\beta$  时,传感器检测可到最大磁感应强度值(此时磁场源产生的合成磁感应强度最大值指向传感器);这样,就获得了一组磁场源 1 产生的合成磁感应强度最大值指向传感器时的经纬度角  $(\alpha_1, \beta_1)$ 。磁场源 2 按照上述磁场源 1 的搜索方式进行搜索,并最终指向传感器时,可获得另一组经纬度角  $(\alpha_2, \beta_2)$ ,然后根据两个磁场源之间的相对位置,通过几何算法即可获得三轴磁传感器的空间位置和姿态。

[0021] 本发明提出的用于电控旋转磁场获得跟踪目标空间位置和姿态的算法,利用在上述磁场源装置通过搜索并使其产生的合成磁感应强度最大值最终指向三轴磁传感器后所获得的两组经纬度角:  $(\alpha_1, \beta_1)$ 、 $(\alpha_2, \beta_2)$ ,以及两磁场源中心点之间的距离 d,通过式(3)~(5)计算传感器在坐标系 1 中的位置坐标  $(x, y, z)$ ,设磁传感器在 X1Y1 (或 X2Y2)平面内的投影  $(x, y, 0)$  到磁场源 1 和磁场源 2 的距离分别为 a、b,传感器的位置计算如下:

$$x = \frac{d \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (3)$$

$$y = \frac{d \tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (4)$$

$$z = \begin{cases} \frac{d \tan \alpha_2 \tan \beta_1}{\cos \alpha_1 \tan \alpha_2 - \sin \alpha_1}, a < b \\ \frac{d \tan \alpha_1 \tan \beta_2}{\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \tan \alpha_1}, a \geq b \end{cases} \quad (5)$$

本发明提出的用于电扫描实现旋转磁场跟踪的待测物体空间姿态算法,即求解磁场源 1 的坐标系 1 (已知的系统坐标系)到传感器的坐标系 5 (表明磁传感器的姿态)的旋转。由于经纬度角  $(\alpha_1, \beta_1)$  和  $(\alpha_2, \beta_2)$  可表示坐标系 1 到坐标系 3 的旋转和坐标系 2 到坐标系

4 的旋转;若能确定坐标系 3 到坐标系 5 的旋转或坐标系 4 到坐标系 5 的旋转,则可获得三轴磁传感器的空间姿态(即磁传感器的三个坐标轴与已知坐标系坐标轴的指向关系)。

[0022] 当磁场源 1 和磁场源 2 的磁感应强度最大值指向传感器时,若将传感器测得的磁感应强度方向分别旋转到 X3 或 X4 方向,则该矢量在 Y3、Z3 或 Y4、Z4 方向的分量将为 0。即旋转传感器坐标系 5,当测得的磁感应强度矢量在 Y5、Z5 方向的分量为 0 时,其 X5 轴的指向为 X3 或 X4 方向,可分别得到坐标系 5 到坐标系 3 的旋转和坐标系 5 到坐标系 4 的旋转。结合之前得到的坐标系 1 到坐标系 3 的旋转和坐标系 2 到坐标系 4 的旋转,可确定传感器的空间姿态。

[0023] 坐标系 1 已知,用坐标系 1 到坐标系 5 的旋转矩阵  $R_{15}$  就可以表示传感器的空间姿态,即

$$R_{15} = R_{35}R_{13} = R_{53}^{-1}R_{13} \quad (6)$$

$$R_{15} = R_{45}R_{14} = R_{54}^{-1}R_{14} \quad (7)$$

$R_{35}$  为磁场源 1 的磁感应强度最大值指向传感器时,磁感应强度最大值的当前姿态坐标系 3 与传感器坐标系 5 之间的旋转矩阵, $R_{45}$  为磁场源 2 的磁感应强度最大值指向传感器时,磁感应强度最大值的当前姿态坐标系 4 与传感器坐标系 5 之间的旋转矩阵, $R_{13}$  为磁场源 1 的坐标系 1 与传感器坐标系 5 之间的旋转矩阵, $R_{14}$  为磁场源 2 的坐标系 2 与传感器坐标系 5 之间的旋转矩阵。由于  $(\alpha_1, \beta_1)$  和  $(\alpha_2, \beta_2)$  已知,因此,  $R_{13}$ 、 $R_{14}$  可以直接计算:

$$R_{13} = Y(-\beta_1)Z(\alpha_1) \quad (8)$$

$$R_{14} = Y(-\beta_2)Z(\alpha_2) \quad (9)$$

为求解矩阵  $R_{53}$  或  $R_{54}$ 。将旋转矩阵  $R_{53}$  表示成欧拉角的形式,即

$$R_{53} = X(\psi)Y(\theta)Z(\phi) \quad (10)$$

式中,可推导  $\psi$ 、 $\theta$ 、 $\phi$  得:

$$\tan \phi = B_{1y} / B_{1x} \quad (11)$$

$$\tan \theta = B_{1z} / (B_{1x} \cos \phi + B_{1y} \sin \phi) \quad (12)$$

$$\begin{cases} \psi = \psi' + k\pi \\ \psi' = \arcsin \frac{P}{\sqrt{M^2 + N^2}} - \gamma \\ k = [\text{sgn}(K \cos \psi' + L \sin \psi') - 1] / 2 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中的参数为:

$$\begin{cases} P = -a_{21}b_1 \\ M = a_{22}b_2 + a_{23}b_3 \\ N = a_{22}b_3 - a_{23}b_2 \\ \gamma = \arctan(M/N) \\ K = a_{12}b_2 + a_{13}b_3 \\ L = a_{12}b_3 - a_{13}b_2 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\alpha_{ij}$ 、 $b_i$  是 A 和 B 中的元素。

[0024] 将推导出  $\psi$ 、 $\theta$ 、 $\phi$  角的公式代入式(10)中可以计算得到  $R_{53}$ ,再由公式(6)可以计算出传感器的姿态。

[0025] 本发明具有不依赖磁场分布理论模型和非迭代的特点,并且通过电扫描方式实现旋转磁场跟踪能够有效提高系统的实时性和扫描的灵活性。本发明可靠性好、计算复杂度低,可应用于微创手术的导航,亦可运用于虚拟现实、三维超声成像等领域。

#### 附图说明

[0026] 图 1 为按照本发明的实施例的装置部分的视图。

[0027] 图 2 为图 1 中的装置的细节框图。

[0028] 图 3 为本发明的实施例的磁场源装置三视图。

[0029] 图 4 为本发明的实施例的系统工作流程框图。

[0030] 图 5 为本发明的实施例的系统搜索策略框图。

[0031] 图 6 为本发明的实施例的待测物体位置算法示意图。

[0032] 图 7 为本发明的实施例的待测物体姿态算法涉及的坐标系示意图。

[0033] 图 8 为本发明的实施例的待测物体姿态算法流程图。

[0034] 图中标号:1 为电磁跟踪系统,2 为三轴磁传感器装置,3 为磁场源装置,4 为控制处理显示装置,5 为可控恒流源装置。6、7、8 分别为三轴磁传感器装置的三轴分量传感器,9 为信号调理和模数转换模块;10、11 分别为两个磁场源装置磁场源 1 和磁场源 2,12、13、14 分别为磁场源装置 10 的三轴线圈,15、16、17 分别为磁场源装置 11 的三轴线圈;18 为控制单元,19 为算法单元,20 为显示输出单元,21 为采样处理模块,22 为激励电流控制模块;23 为恒流源,24 为控制电路;25 为磁感应强度数据,26 为旋转角数据;27 为初始化过程模块,28 为搜索过程模块,29 为计算过程模块,30 为位置计算过程模块,31 为姿态计算过程模块,32 为显示输出过程模块。

#### 具体实施方式

[0035] 下面结合具体实施例并参照附图,对系统组成及工作过程进行说明。本具体实施例所涉及的坐标系定义同表 1,如图 6 所示;所涉及的经纬度角定义同发明内容。

[0036] 本具体实施例设计了图 1 所示的电磁跟踪系统 1,包括四个部分:三轴磁传感器装置 2、磁场源装置 3、控制处理显示装置 4、可控恒流源装置 5。传感器装置 2 附着于跟踪目

标上。磁场源装置 3 包括两个磁场源 10 和 11(对应发明内容和权利要求书中所述磁场源 1 和磁场源 2), 分别由三个缠绕在由软磁铁氧体材料做成的磁芯上的、中心点重合且相互正交的线圈组成; 两个磁场源中心点之间的距离为  $d$ , 且对应的线圈互相平行。控制处理显示装置 4 控制可控恒流源装置 5 以对磁场源 10、11 交替激励的方式, 分别为磁场源装置 3 的各个线圈提供激励电流, 按照一定的搜索策略改变各个线圈的激励电流强度, 实现磁场源 10、11 产生的合成磁感应强度最大值指向的旋转。另外, 控制处理显示装置还采集磁传感器装置 2 的输出, 计算合成磁感应强度值以及磁传感器的空间位置和姿态, 并输出或显示定位结果。

[0037] 如图 2 所示为系统各部分的分解框图。

[0038] 传感器装置 2 包括三轴分量传感器 6、7、8, 分别用来检测三个正交方向  $X_5$ 、 $Y_5$  和  $Z_5$  的磁感应强度。本实施例中的磁传感器选用三轴磁阻传感器。传感器的输出经后续的信号调理和模拟-数字(AD)转换模块 9 送入控制处理显示装置 4。

[0039] 磁场源装置 3 包括两个磁场源装置 10 和 11, 磁场源装置 10 由三个缠绕在截面为方形磁棒上的中心点重合且相互正交的线圈 12、13 和 14 组成; 磁场源装置 11 由三个缠绕在截面为方形磁棒上的中心点重合且相互正交的线圈 15、16 和 17 组成。系统中, 构成磁场源的磁棒长为 10cm, 正方形截面边长为 1cm, 每个线圈匝数均为 100 匝, 三轴激励电流合成的模为 1A。磁场源装置 10 和 11 的磁芯结构完全一样, 其三视图如图 3 所示。

[0040] 控制处理显示装置 4 由控制单元 18、算法单元 19、显示输出单元 20 组成。控制单元 18 包括采样处理模块 21 和激励电流控制模块 22。控制处理显示装置 4 实现对其他组件的控制、数据的采集和处理、跟踪结果的显示输出等。

[0041] 可控恒流源装置 5 由恒流源 23 和控制电路 24 组成。恒流源 23 由控制处理显示装置 4 的激励电流控制模块 22 控制。控制电路 24 将恒流源 23 输出的激励电流整形成脉冲, 为磁场源装置 3 中的各个线圈提供激励电流, 并且实现对构成两个磁场源装置 10 和 11 的两组线圈 12、13、14 和 15、16、17 的交替激励。

[0042] 图 4 所示为系统的工作流程。开机后系统首先进行初始化。之后的工作过程可分为搜索过程 28 和计算过程 29。其中搜索过程是控制处理显示装置 4 控制可控恒流源装置 5 对磁场源装置 3 提供适当的激励电流, 通过磁场源 10、11 形成的两个合成磁感应强度最大值指向的旋转进行搜索。当磁场源装置中的磁场源 10、11 产生的合成磁感应强度最大值分别指向三轴磁传感器 2 后, 系统即进入计算过程 29。计算过程 29 包括位置计算过程 30 和姿态计算过程 31, 二者依次进行, 分别计算传感器三自由度的位置和三自由度的姿态, 其中姿态计算算法是依赖于位置计算结果的。每次计算完成时, 执行显示输出过程 32, 实时更新跟踪结果。

[0043] 图 5 所示是本实施例中采用的搜索策略的框图。搜索过程中, 需保证磁场源 10、11 中的三轴线圈电流合成后的模不变。磁场源 10 三轴线圈的轴线方向分别为坐标系 1 的  $X_1$  轴、 $Y_1$  轴、 $Z_1$  轴, 各线圈的激励电流强度分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , 各线圈激励电流强度与合成磁感应强度最大值指向之间的关系由公式(1)确定; 为了保证磁场源 10 产生的合成磁感应强度最大值指向遍历整个跟踪区域, 可控制三个正交线圈的激励电流强度, 使其先在一个面上搜索, 如  $X_1Y_1$  平面; 当传感器检测到最大磁感应强度值时, 获得经度角  $\alpha$ ; 保持  $F_1$

和  $F_2$  之比不变(即保持经度角  $\alpha_1$  不变),通过改变  $F_3$  再在  $X_1Y_1$  平面中经度角为  $\alpha_1$  的直线与  $Z_1$  轴构成的平面上搜索,当传感器检测到最大磁感应强度值时,可获得纬度角  $\beta_1$ ,这样就获得了磁场源 10 产生的合成磁感应强度最大值指向在坐标系 1 中的一组经纬度角  $(\alpha_1, \beta_1)$ 。由于三轴正交线圈激励电流强度可以实现快速灵活的改变,针对不同的传感器位置,还可以尝试不同的搜索策略,例如先搜索  $X_1Z_1$ 、 $Y_1Z_1$  或其他任意平面,得到最优的搜索策略。之后,磁场源 11 按照与磁场源 10 相同的搜索过程进行搜索。当磁场源 11 产生的合成磁感应强度最大值指向传感器时,可以得到另一组经纬度角  $(\alpha_2, \beta_2)$ ;最后,结合两个磁场源 10、11 中心点之间的相对位置  $d$ ,通过几何算法求解传感器的空间位置和姿态。搜索时,可通过控制线圈激励电流强度,使其总磁感应强度指向先向一个方向试探,若三轴磁传感器检测到的磁感应强度值增大,则表示试探方向正确,继续沿该方向搜索直至三轴磁传感器检测到的磁感应强度值减小,则前一旋转角所对应的方向即为最大磁感应强度方向。否则,反向搜索。

[0044] 图 7 所示为位置算法的示意图。通过上述搜索可得到两组经纬度角  $(\alpha_1, \beta_1)$  和  $(\alpha_2, \beta_2)$ ,两磁场源之间的距离  $d$  已知,则可通过式(3)~(5)计算传感器在坐标系 1 中的位置坐标  $(x, y, z)$ 。

[0045] 图 8 所示为姿态算法流程图,通过公式(6)~(14)计算出三轴磁传感器坐标系 5 与系统坐标系 1 之间的旋转关系,即获得三轴磁传感器的姿态。

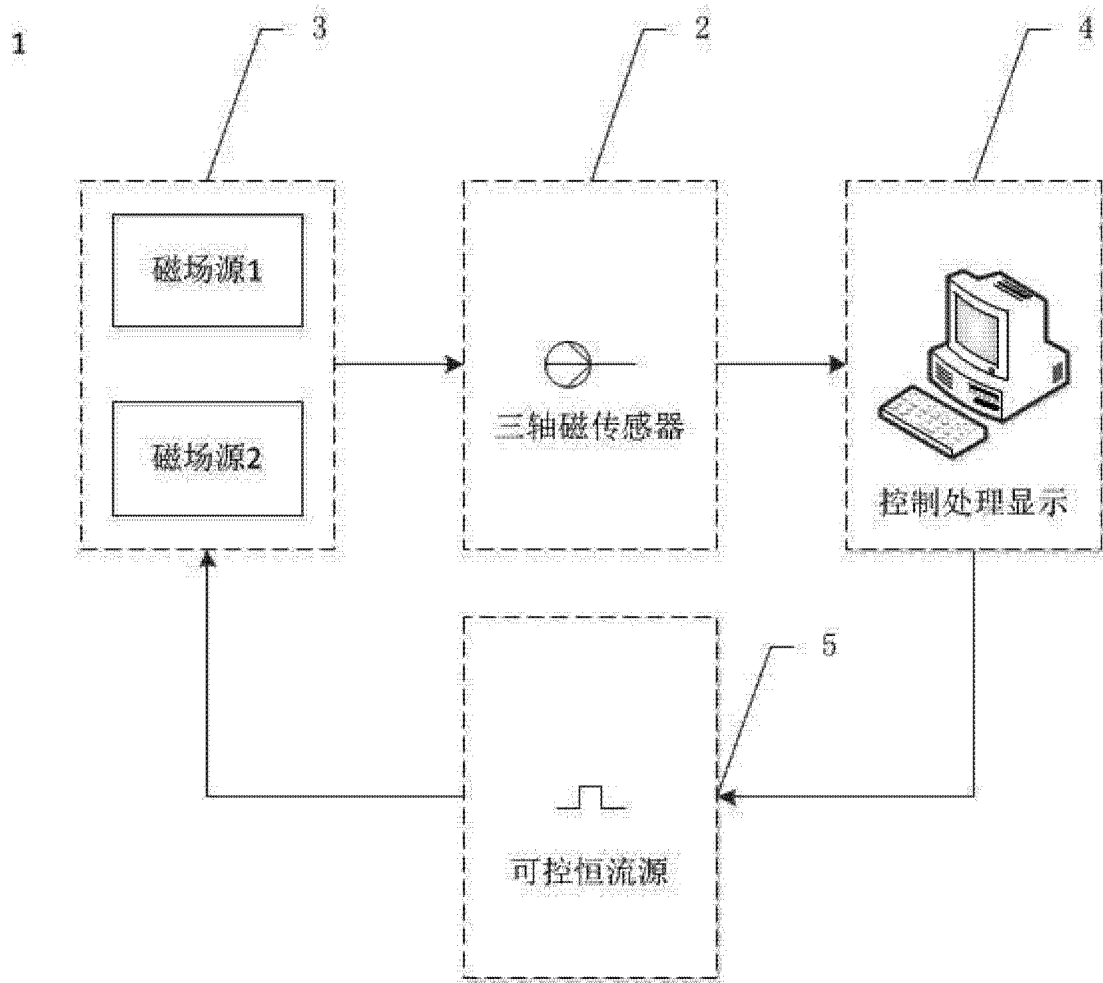


图 1

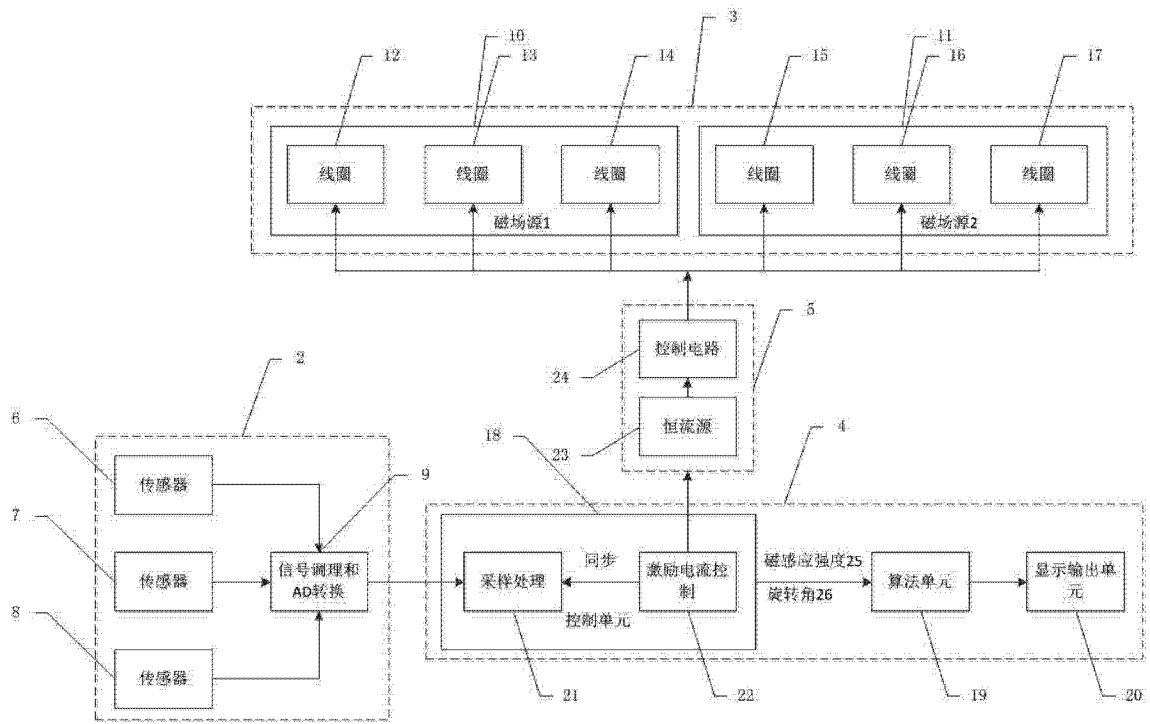


图 2

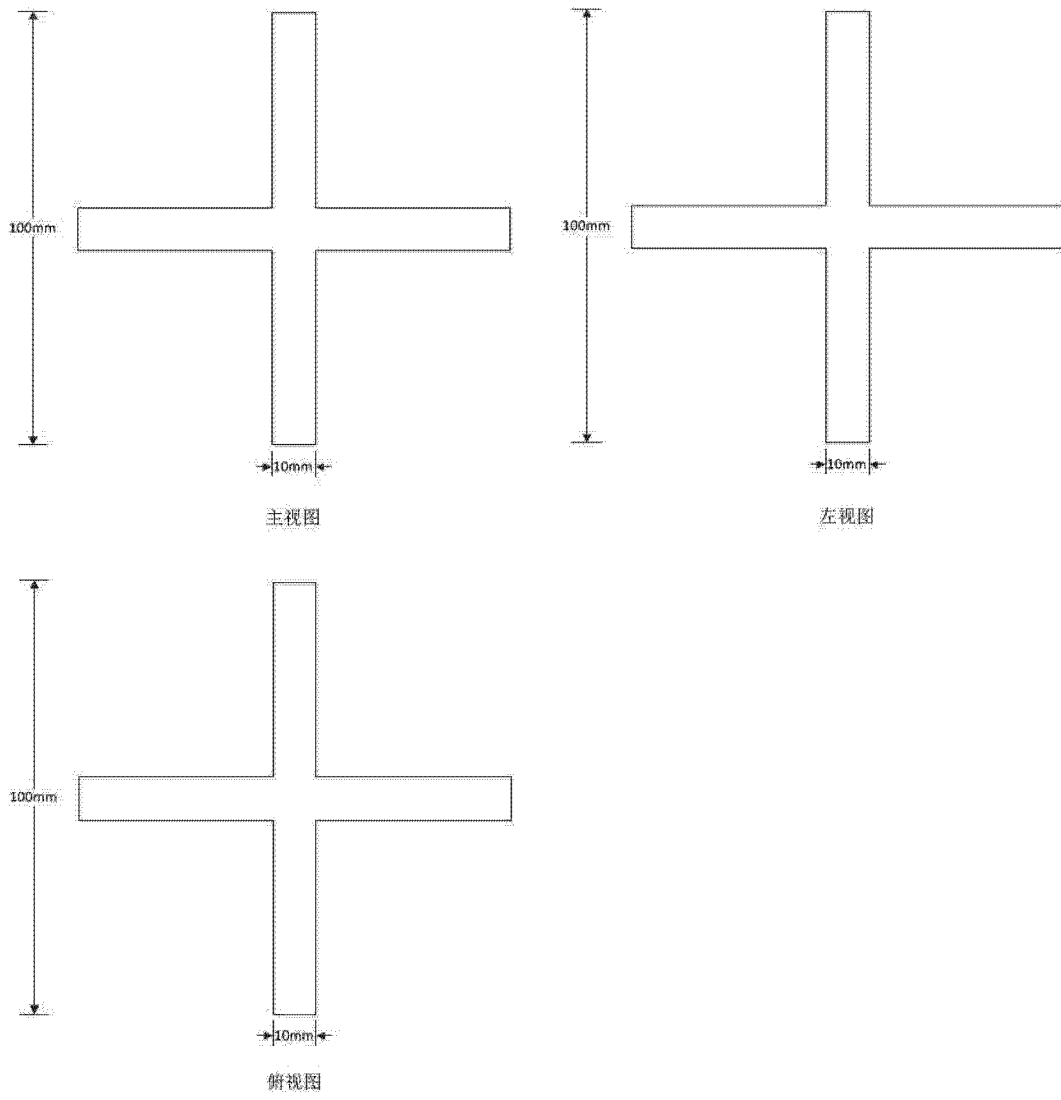


图 3



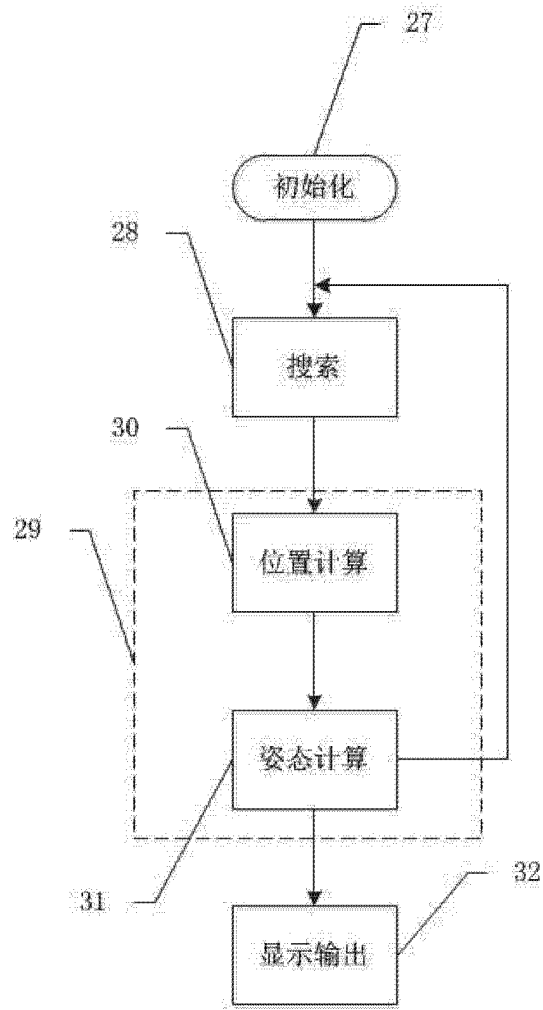


图 4

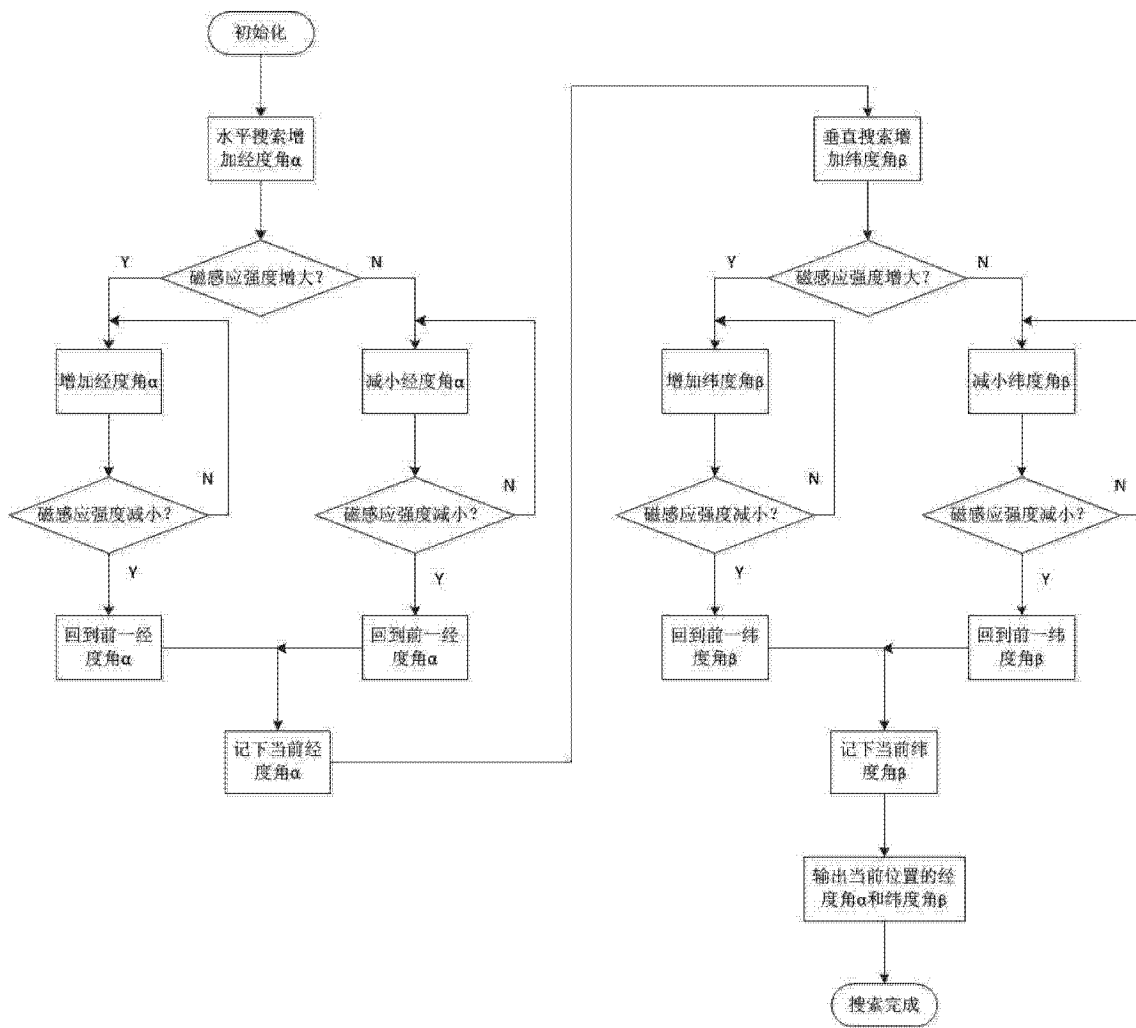


图 5

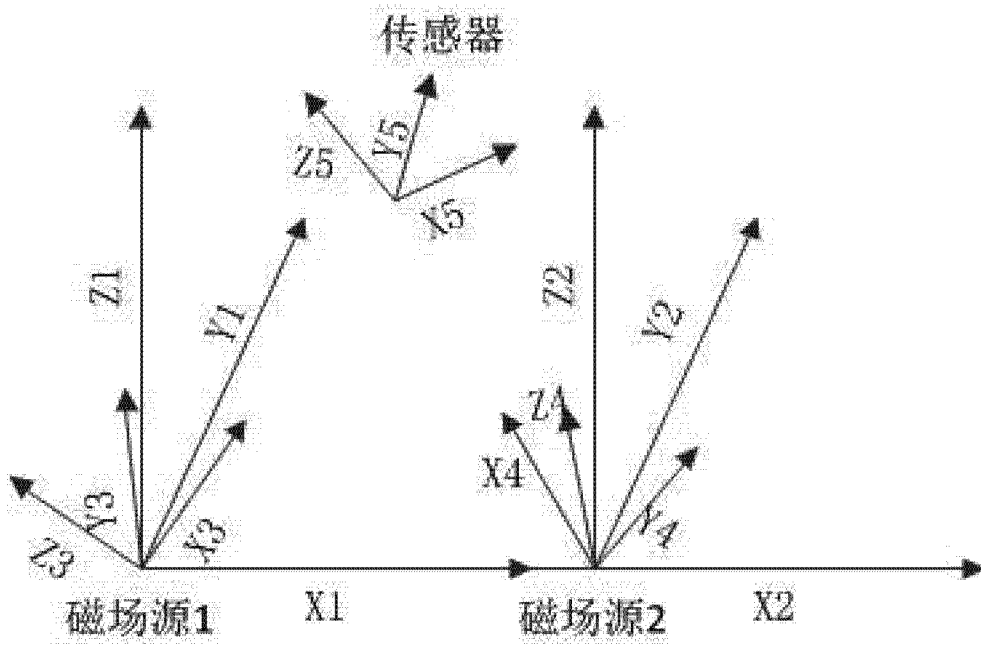


图 6

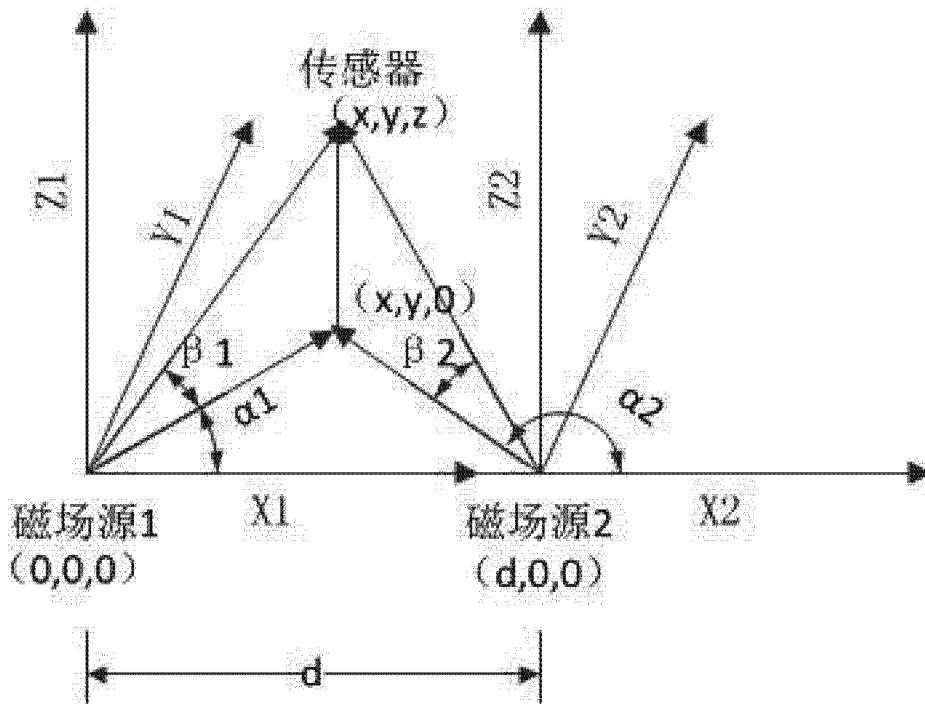


图 7

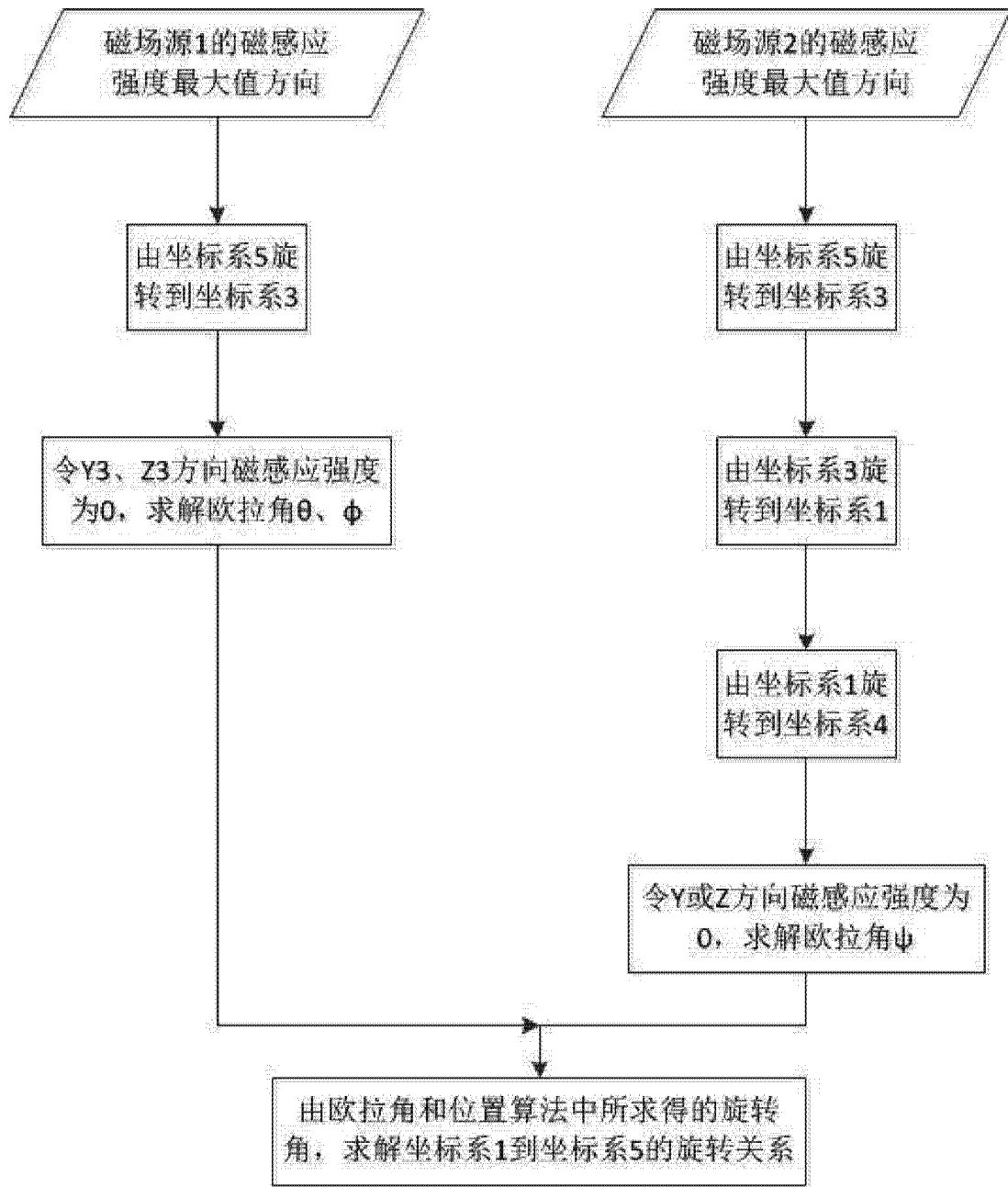


图 8