

# 基于磁传感器扫描的多点磁目标检测系统设计

李修寒,竺明月,张可,吴小玲\*

南京医科大学生物医学工程系,江苏 南京 211166

**[摘要]** 目的:设计基于磁传感器扫描的多点磁目标检测系统,为实现人体内多个胶囊内镜的定位和纳米磁性药物的检测奠定基础。方法:利用三轴隧道效应磁阻传感器在磁源附近做圆周运动,获取多组磁信号后通过三维坐标变换,利用定位算法逆向求解出永磁体的位置。结果:通过编写LabVIEW上位机程序,实现对两个磁目标的轨迹示踪和运动曲线的存储与回放。结论:检测系统具有实时性好、精度高、成本低等优点,对人体内多个胶囊内镜的定位和纳米磁性药物的检测具有潜在应用价值。

**[关键词]** 磁传感器;磁定位;多点;示踪;实时

**[中图分类号]** Q64

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2018)10-1456-07

**doi:** 10.7655/NYDXBNS20181029

## A localization system for multiple magnetic targets based on magnetic sensor scanning detection

Li Xiuhuan, Zhu Mingyue, Zhang Ke, Wu Xiaoling\*

Department of Biomedical Engineering, NMU, Nanjing 211166, China

**[Abstract]** **Objective:** A localization system for multiple magnetic targets based on magnetic sensor rotation detection was studied, which was aimed at realizing human multiple capsule endoscopy positioning and nano-magnetic drug testing. **Methods:** A three-axis tunneling magnetoresistive sensor was used to make a circular motion near the magnetic source. Three sets of magnetic signals were acquired and transferred by three-dimensional coordinates. The position of the permanent magnet was solved using a positioning algorithm. **Results:** Through the preparation of LabVIEW PC program, the trajectory of two magnetic target tracking and motion curve storage and playback were achieved. **Conclusion:** The detection system has the advantages of good real-time, high precision and low cost, it has the potential application value for the positioning of multiple capsules in the human body and the detection of nano-magnetic drugs.

**[Key words]** magnetic sensor; magnetic localization; multiple magnetic target; tracking; real-time

[Acta Univ Med Nanjing, 2018, 38(10):1456-1462]

随着社会的进步和科技的不断发展,定位技术<sup>[1]</sup>广泛应用于诸多领域。在医学领域中,与其他定位技术或系统相比,磁定位具有精度高,体积小以及设备简单的优点,更重要的是对人体没有危害。磁定位通常使用磁性较强的永磁体作为磁源,人体磁场强度的数量级大约是永磁体的千万分之一,所以磁定位几乎不受人体影响,使用磁定位的方法可以获得对人体内磁信号较高的定位精度。

近年来,国内外学者<sup>[2-5]</sup>从事于永磁体的定位检

测,并致力于将磁定位技术应用于临床,证明磁定位系统是一种解决人体内目标定位的可行性方案。在实际研究探索过程中,很多学者通过使用大量磁传感器或磁传感器阵列的方式来提高定位精度,其方法引入了传感器之间的个体误差<sup>[6]</sup>。本课题组几年以来一直从事永磁体的定位工作,已经通过少量磁传感器实现弱磁信号测量<sup>[7]</sup>、磁靶向药物实时示踪<sup>[8]</sup>、磁标记的三维步态分析<sup>[9]</sup>等工作,发现在磁定位系统定位精度的影响因素方面,除了提高传感器灵敏度、改进信号处理电路和定位算法之外,还可以通过磁传感器旋转检测的方式实现进一步的优化和改进。

**[基金项目]** 江苏省研究生科研创新计划(KYCX17\_1298)

\*通信作者(Corresponding author), E-mail: bmewxl@163.com

本文研究一种新型的基于磁传感器扫描的多点磁目标检测系统,采用处于国际领先水平的三轴隧道效应磁阻传感器在磁源附近做圆周运动,获取多组磁信号后通过三维坐标变换,利用定位算法逆向求解出永磁体的位置。通过编写上位机程序,实现对磁目标的轨迹示踪和运动曲线的存储与回放。实验结果表明,本文提出的基于磁传感器旋转的多点磁目标检测方案切实可行,具有实时性好、精度高、成本低等优点。随着磁传感器精度的提高和定位算法的优化,本系统的设计方案对人体内多个胶囊内镜的定位和纳米磁性药物的检测具有潜在应用价值。

## 1 磁定位理论基础

### 1.1 磁定位物理模型建立

磁偶极子模型和等效磁荷模型是描述空间磁场分布的两种经典理论模型<sup>[10]</sup>。在这两种模型的基础上,使用磁传感器获取的磁场信号反向求解磁目标的方法叫做磁定位。

研究发现,当观测点到目标位置的距离远大于永磁体尺寸时,两种模型的计算结果相近。由于等效磁荷模型涉及大量的积分运算,所以该模型的运算效率不高;磁偶极子模型通过求解非线性方程组来反向解出磁目标的位置信息,因此本系统选择磁偶极子模型作为磁检测的目标模型。

如图1所示,设坐标系中有一长度为 $h$ ,半径为 $R$ 的圆柱永磁体,磁体位置坐标为 $(a,b,c)$ ,观测点坐标为 $P(x,y,z)$ ,永磁体到观测点 $P$ 的矢径为 $\vec{r}=(x-a)\vec{i}+(y-b)\vec{j}+(z-c)\vec{k}$ , $|\vec{r}|=\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2}$ 。 $\vec{m}(n,p,q)$ 为磁矩矢量,且满足条件 $n^2+p^2+q^2=1$ 。 $M_T$ 为永磁体的总磁矩,是表征磁场强度的常数,且对于一个具体的磁性材料,其值可以作为已知量。 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{T}\cdot\text{M}/\text{A}$ 为真空磁导率。根据磁偶极子模型,观测点处的 $\vec{B}$ 的3个分量为:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[M_n(x-a) + M_p(y-b) + M_q(z-c)](x-a)}{R^5} - \frac{M_n}{R^3} \right\} \quad (1-1)$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[M_n(x-a) + M_p(y-b) + M_q(z-c)](y-b)}{R^5} - \frac{M_p}{R^3} \right\} \quad (1-2)$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[M_n(x-a) + M_p(y-b) + M_q(z-c)](z-c)}{R^5} - \frac{M_q}{R^3} \right\} \quad (1-3)$$

因为 $n^2+p^2+q^2=1$ ,所以式中有5个未知参数( $a,b,c,n,p$ )。使用三轴磁传感器旋转,连续在 $N$ 个确定点处进行检测,可以列出 $3N$ 个方程。空间中存在多个磁目标时,观测点处的磁信号为各个单独磁目标产生信号的矢量叠加,当满足 $N\geq$ 磁目标个数的2倍时,就能由方程组解出所有未知数。

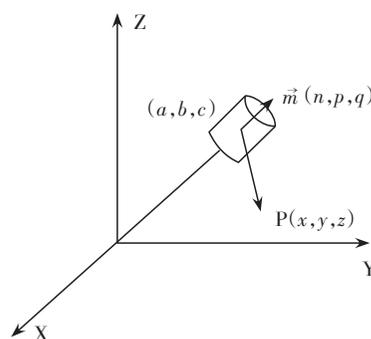


图1 磁偶极子模型示意图

Figure 1 Magnetic dipole model schematic diagram

当磁目标数量增多时,待求解的未知数也随之增加,为了达到获取多组定位方程的目的,使用磁传感器围绕目标区域在 $XOY$ 平面进行圆周旋转。使用磁传感器旋转检测磁目标信号的示意图如图2所示。

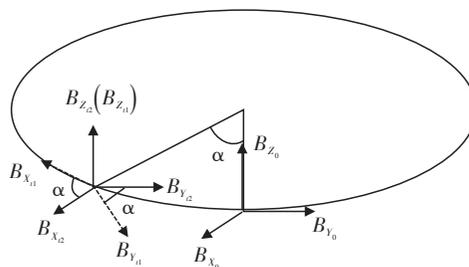


图2 磁传感器旋转方式检测磁目标示意图

Figure 2 Magnetic sensor rotation detection magnetic target diagram

由于磁传感器在旋转过程中3个磁轴的方向发生了变化,为了避免由此造成的定位方程未知数个数增加的情况,需要解决参考坐标系变化的问题,所以需要按照如下公式进行数据变化,使得检测到的磁信号依然以同一个三维坐标系为参考。

$$B_{x_2} = B_{x_1} \cos \alpha + B_{y_1} \sin \alpha \quad (1-4)$$

$$B_{y_2} = B_{y_1} \sin \alpha + B_{x_1} \cos \alpha \quad (1-5)$$

$$B_{z_2} = B_{z_1} \quad (1-6)$$

其中  $B_{x_0}$ 、 $B_{y_0}$ 、 $B_{z_0}$  为旋转起始点的检测值,  $\alpha$  为旋转角度,  $B_{x_{i1}}$ 、 $B_{y_{i1}}$ 、 $B_{z_{i1}}$  分别是变换前的磁感应强度检测值,  $B_{x_{i2}}$ 、 $B_{y_{i2}}$ 、 $B_{z_{i2}}$  分别是变换后的磁感应强度值。

### 1.2 磁定位算法研究

磁偶极子模型的数学表达形式为高阶非线性方程组,需要使用优化算法对其求解。如何选择合适的优化算法求解高阶非线性方程组,需考虑以下因素:①良好的求解精度;②运算时间短。

Levenberg-Marquardt (LM) 算法是应用非常广泛的非线性最小二乘算法,该算法是一种介于牛顿法和梯度下降法之间的优化方法,能够有效地处理冗余参数问题<sup>[11]</sup>,并且减小算法陷入局部极小值的可能性,所以LM算法适用于三维重建和运动与结构计算等领域。

虽然LM算法求解最优解时速度快,但是在实际运用过程中,该算法在真正执行开始前需要一组初值作为第一次的最优解,然后进入优化迭代过程中。为了获取较优的初值,将模拟退火算法<sup>[12]</sup>的部分思想融合进LM算法中,提出了改进后的LM算法。即用待求解的未知数的取值范围乘以0~1之间的随机数作为LM算法的初值,实验证明,优化后的LM算法能够更好地求解到全局最优解。

## 2 多点磁目标检测系统的设计

本系统在硬件部分使用基于隧道磁阻效应<sup>[13]</sup>的三轴磁传感器TM2303作为检测磁场信号的元器件,将旋转测量中的磁场信号转化为电信号,原始输出的电信号通过放大滤波处理,再经过模数转换成为数字信号,然后发送至上位机软件端进行数据处理。系统主要包括以下部分:磁传感器及其周围电路、模拟信号调理电路、MCU控制电路以及上位机软件。系统的框图如图3所示。

### 2.1 多点磁目标检测系统的硬件设计

#### 2.1.1 放大滤波电路设计

由于磁传感器的输出电压在毫伏级别,而且对于三轴磁传感器来说,每一个磁轴都有正负两路输出,所以需要选择一款信号差分输入的放大器,同时要求该放大器具有共模抑制比高、增益可调节、输入阻抗高等性能。本系统选择美国ANALOG DEVICES公司生产的AD8221芯片作为放大器,这是一款增益可编程、高性能仪表放大器,在业界同类产品中的共模抑制比(CMRR)最高,适用于传感器接口和精密数据采集。其引脚如图4所示。

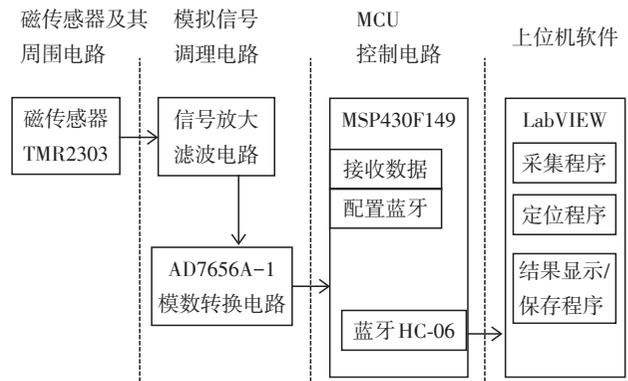


图3 系统框图

Figure 3 System block diagram

AD8221 运放增益  $G$  可以通过设置电阻  $R_c$  进行调节,增益和  $R_c$  之间的关系为  $G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_c}$ 。为了避免增益过大造成原始信号失真,调节  $R_c$  为  $4.94 \text{ k}\Omega$ ,即设置增益  $G$  为 11。本系统中由于 AD8221 采取  $\pm 9.0 \text{ V}$  供电电源,所以无论传感器输出信号是否为正,信号均可以进行正常放大,有助于后续信号的处理。设计的放大滤波电路图如图5所示。

在输入端增加了RC低通网络,低通滤波截止

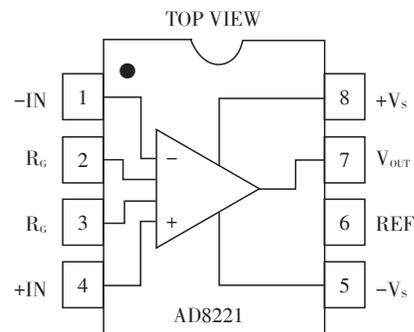


图4 AD8221引脚图

Figure 4 The pins of AD8221

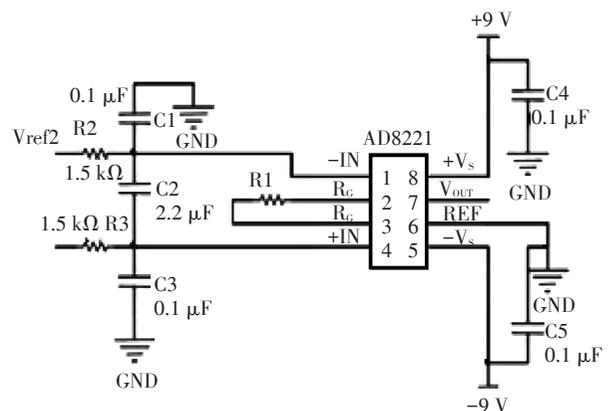


图5 放大滤波电路图

Figure 5 Enlarge the filter circuit diagram

频率为 24 Hz,将显著地滤除噪声干扰,其放大后的信号足以满足采样要求.

### 2.1.2 模数转换电路设计

本设计采用ANALOG DEVICES公司的AD7656A-1芯片来构成模数转换电路的核心.该芯片内部

集成6个独立的16位逐次逼近(SAR)型ADC,可以同时采集转换6路模拟输入信号;该芯片支持并行、串行和菊花链接口模式,本文设置其为并行模式,并行采集原理图如图6所示.

AD7656A-1内置了一个片内基准电压源,但是

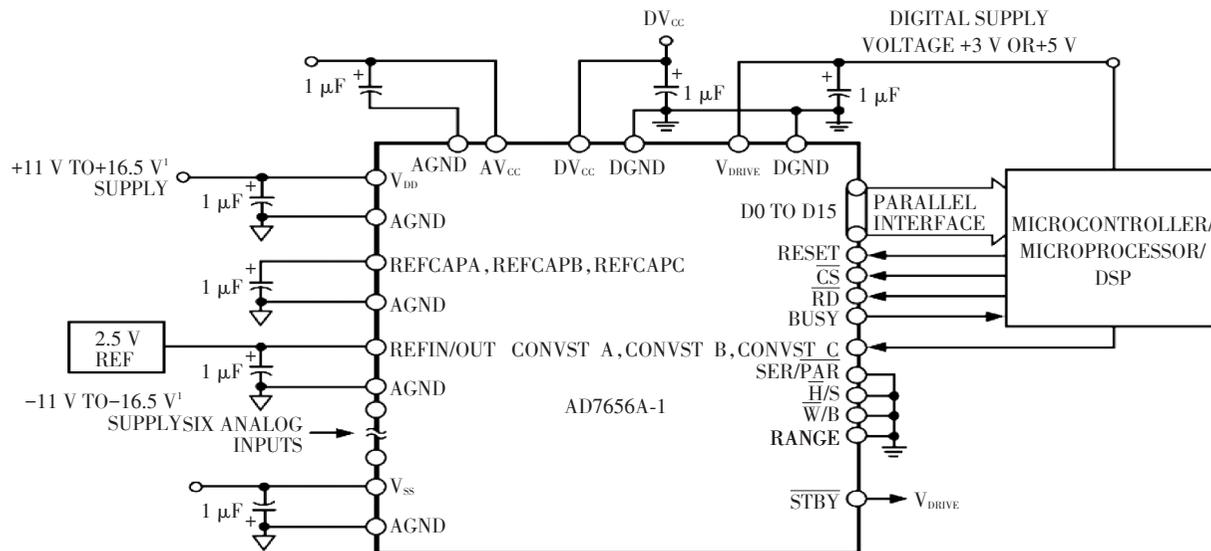


图6 并行采集原理图

Figure 6 Parallel acquisition schematic diagram

在A/D转换中,位数超过14位的高精度情况下,使用内置电压基准不够稳定,所以本设计采用了外置电压基准.2.5 V参考电压由TI公司生产的串联基准电压源REF2925提供,如图7所示.

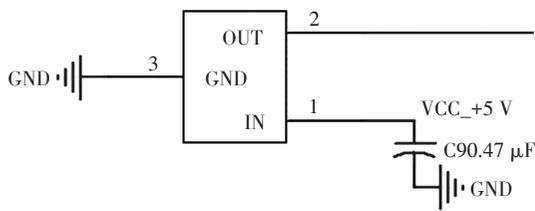


图7 参考电压芯片REF2925电路图

Figure 7 Reference voltage chip REF2925 circuit diagram

### 2.1.3 最小系统设计

本系统选用美国德州仪器(TI)的MSP430F149单片机,这是一款16位的超低功耗混合信号处理器.其中电源电压为3.3 V,本系统采用SMCLK作为时钟信号,8 MHz为时钟源.

### 2.1.4 蓝牙模块

为了避免磁定位系统硬件部分和PC机空间距离过近产生的干扰,以及在旋转测量的过程中,容易产生数据线的缠绕.本系统使用蓝牙模块从下位机发送数据至上位机,在10 m范围内实现无线串

口通信,使用该模块进行一些基本设置即可进行无线串口通信.所使用的蓝牙模块型号为HC-06.

### 2.2 多点磁目标检测系统的软件设计

在本文设计的多个磁目标检测系统中,分为下位机软件设计和上位机软件设计.下位机执行的功能有:①步进电机及细分器的控制:在测量数据的过程中控制步进电机5°的旋转;②模数转换电路的采样控制以及数据处理:采样芯片选择使用AD7656A-1;③蓝牙数据发送:通过UART1实现蓝牙与上位机的通信.

在上位机中使用LabVIEW和MATLAB两种软件联合对定位数据进行处理,使用LabVIEW从下位机接收数据并进行预处理,该软件可以实现强大的图形界面,方便显示定位结果;使用MATLAB的目的是实现复杂算法,本文LM算法中的雅克比矩阵运算使用的就是MATLAB脚本.使用LabVIEW和MATLAB联合编程,可以在运用强大的虚拟仪器的同时,保证算法实现精确和高效.

## 3 实验及结果

### 3.1 圆柱形永磁体的选择

为实现对多个磁目标的永磁体定位,实验所需

的永磁体应满足如下条件:体积小、磁性强度适中、能够适应磁传感器定位精度的要求。经过对比筛选,选取了3种圆柱形永磁体讨论研究。1号为直径5 mm 高度10 mm 的大号永磁体,2号为直径5 mm 高度3 mm 的中号永磁体,3号为直径3 mm 高度1 mm 的小号永磁体。磁感应强度同磁体磁矩的关系为:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(M \cdot r)}{r^5} r - \frac{M}{r^3} \right] \quad (3-1)$$

测量永磁体磁矩的方法<sup>[14]</sup>示意图如图8所示。利用高斯计探头沿着圆柱形永磁体的轴线方向测量,将轴线正方向的磁场强度记为 $B_+$ ,负方向的磁场强度记为 $B_-$ ,可以得到永磁体磁矩 $M$ 为:

$$M = \frac{\pi r^3 (B_+ - B_-)}{\mu_0} \quad (3-2)$$

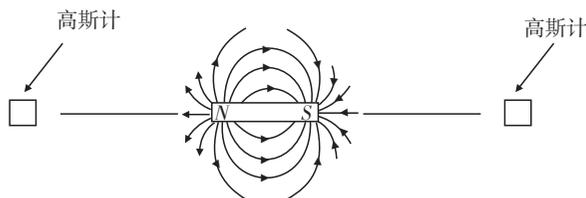


图8 永磁体磁矩测量方法示意图

Figure 8 Permanent magnet magnetic moment measurement method diagram

通过多次测量取平均值,最终计算得到1号、2号圆柱形永磁体的磁矩分别为0.436、0.084A·m<sup>2</sup>。由于本实验室的高斯计量程与精度问题,3号永磁体的磁矩通过南京大学物理系专业的磁学设备高精度震动样品磁强计(vibrating sSample magnetometer, VSM),测量计算得到其磁矩为0.004 72 A·m<sup>2</sup>。综合考虑磁体磁矩、磁偶极子模型特点以及TMR2303磁传感器的特性,本系统最终使用1号圆柱形永磁体。

### 3.2 地磁场干扰补偿

本文中永磁体产生的磁场强度大约在100高斯数量级,为了准确得到磁目标的信号,必须对其他磁场干扰进行补偿,其中地磁场是一个主要的干扰成分。由于地表磁场强度大约是0.4~0.6高斯,且随着测量地点和传感器的朝向不同而产生变化<sup>[15]</sup>,地表磁场对磁定位的准确度会造成一定影响。为了有效补偿磁传感器旋转检测过程中的干扰,考虑到地表磁场在短时间内的变化可以忽略,本文采用如下方法进行补偿:在未放置磁源时,驱动步进电机带动磁传感器进行旋转检测,预先记录旋转角度以及检测到的磁感应强度值,得到地磁场对传感器测量

影响的数据后,将旋转一周的磁传感器电压与旋转角度的关系作图,如图9所示。

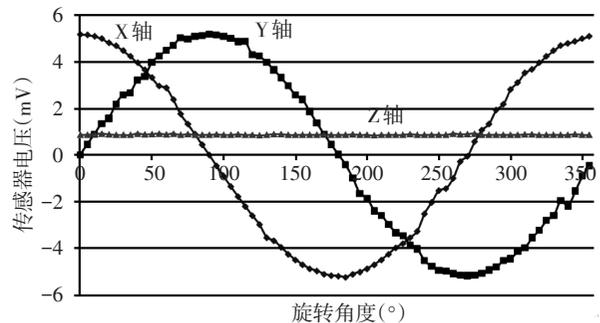


图9 传感器旋转1周测得地磁场数据

Figure 9 Earth's magnetic field data measured by one revolution of the sensor

在使用磁传感器旋转方式检测磁目标之前,需要对获取的地磁场数据进行分析并存表,使数据更加贴近真实情况,有利于磁目标的精确定位。

### 3.3 实验及结果分析

#### 3.3.1 单个圆柱形永磁体检测结果分析

将圆柱形永磁体放置于 $Z=7$  cm所在的平面,然后让永磁体在该平面内的测试点,通过磁传感器旋转扫描的方式获取磁场信号。实验中,永磁体的横坐标分别取-10.0、-5.0、0.0、5.0、10.0 cm,纵坐标分别取-10.0、-5.0、0.0、5.0、10.0 cm 共计25个点。利用系统测量所得的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 测量值,与实际坐标值做差然后取绝对值,得出误差即 $\varepsilon = |P_{测} - P_{真}|$ 。整个系统完成一次数据运算耗时17.9 ms,能够满足定位的实时性要求。单个圆柱形永磁体定位数据在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的误差分布图如图10所示。

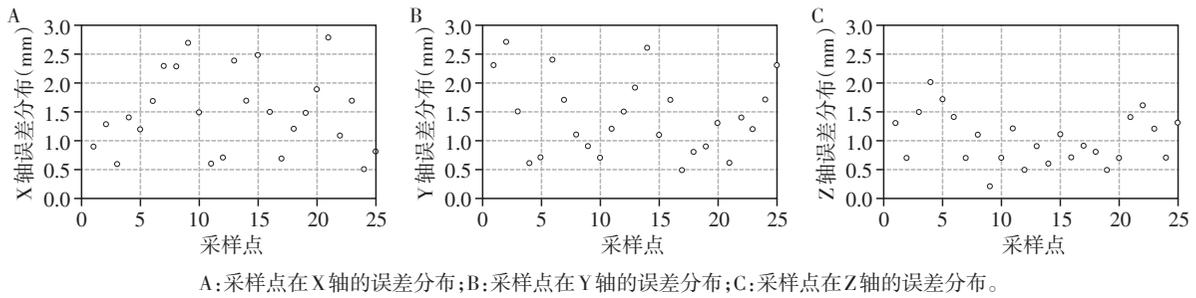
从图10A、B可以看出X轴、Y轴的误差分布在0~3 mm范围内,分布较为均匀。其中有个别误差较大,原因可能是该磁目标所处点的位置距离传感器较近而偏离磁偶极子模型。从图10C可以看出,Z轴的误差分布在0~2 mm的范围内,相对变化较小,与实际情况相符。

对上述结果进行分析,系统产生误差的原因有:①与永磁体的位置有关,距离磁传感器较近时,偏离磁偶极子简化模型;②使用的公式存在近似计算,存在误差。

单个永磁体作连续运动时,三维控件显示的运动轨迹如图11所示,与实际情况相符,且轨迹的走向趋势较好。

#### 3.3.2 两个圆柱形永磁体检测结果分析

将圆柱形永磁体放置于 $Z=7$  cm所在的平面,然



A: 采样点在 X 轴的误差分布; B: 采样点在 Y 轴的误差分布; C: 采样点在 Z 轴的误差分布。

图 10 单个磁目标采样点的误差分布图

Figure 10 Error distribution of single magnetic target sampling points

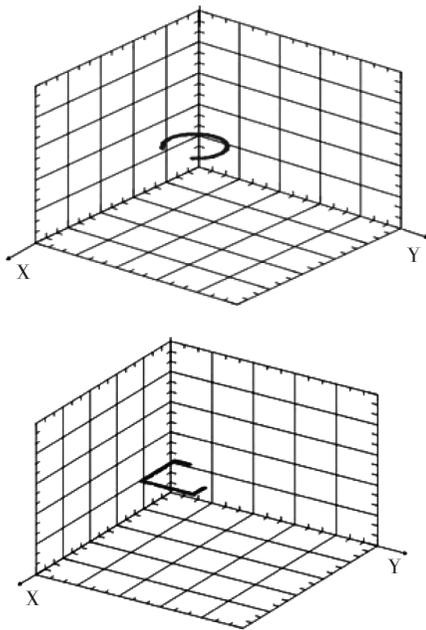


图 11 单个永磁体的运动轨迹图

Figure 11 Single permanent magnet trajectory map

后让两个永磁体分别在该平面内的 8 个点进行采样。考虑到两个永磁体相互产生吸引力的缘故,使永磁体 A 的坐标依次分别取(2,6)、(4,2)、(4,8)、(6,6)、(-2,6)、(-4,2)、(-4,8)、(-6,6),永磁体 B 的坐标依次分别取(2,-6)、(4,-2)、(4,-8)、(6,-6)、

(2,-6)、(-4,-2)、(-4,-8)、(-6,-6)。

同理,利用系统测量所得的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  测量值,与实际坐标值做差然后取绝对值得到误差。整个系统完成一次数据运算耗时 63.1 ms。两个圆柱形永磁体定位数据在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的误差分布图如图 12 所示。

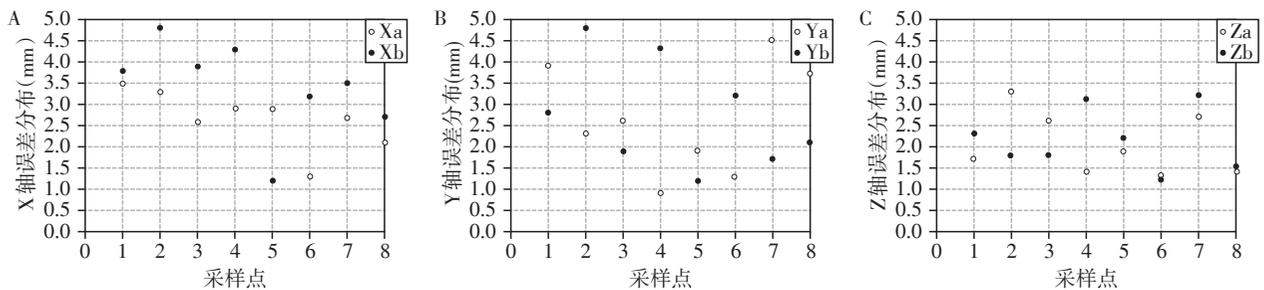
由图 12A、B 可以看出, X 轴、Y 轴的误差分布在 0~5 mm 范围内,分布较为均匀,与单个永磁体检测相比误差较大。从图 12C 可以看出, Z 轴的误差分布在 0~3.5 mm 的范围内,且分布均匀。

两个永磁体做平面内作连续运动时,三维控件显示的运动轨迹如图 13 所示,与实际情况相符,略有变形。当获取的信号足够用于求解定位数据时,继续利用磁传感器旋转的方式对磁目标进行检测求解。实验表明,随着旋转检测获取数据的增多,磁场的定位越来越精确(图 14)。

综合分析可以看出,相比较于单个圆柱形永磁体的检测,两个圆柱形永磁体的定位误差较大,但精度仍可以满足实际需要;数据运算耗时也较长,这是由于目标函数更加复杂,程序寻找最优解的速度变慢。

#### 4 讨论

本系统使用一个隧道磁阻效应传感器,通过旋



A: 采样点在 X 轴的误差分布; B: 采样点在 Y 轴的误差分布; C: 采样点在 Z 轴的误差分布。

图 12 两个磁目标采样点的误差分布图

Figure 12 Error distribution of two magnetic target sampling points

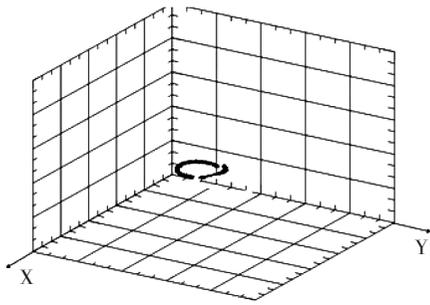


图13 两个永磁体的运动轨迹图

Figure 13 Two permanent magnet trajectories

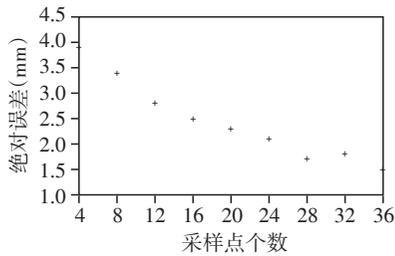


图14 旋转检测采样点个数-误差分布

Figure 14 Rotation test sample number - error distribution

转的方式获取多组检测数据,达到同时使用大量磁传感器组成检测阵列的效果。与此同时,区别于阵列式磁传感器检测系统,旋转检测磁定位系统不存在传感器之间的个体误差;另外,本系统使用的信号处理电路只用于处理单个磁传感器的输出信号,在硬件方面也做到了精简高效。因此旋转检测方式使得系统的定位精度也有所提高。

本研究现已基本实现两个磁源的定位,后续可以将两个磁源的矢量叠加视作为一个磁源,将第3个磁源与等效后的磁源定位化简为两个磁目标的定位,从而实现3个磁源的定位。未来,本系统将能够通过增加定位磁目标个数实际应用于人体内两个及多个磁标记的胶囊内镜的示踪;通过研究磁性较弱的纳米颗粒的信号特点,可以将本系统运用于人体内磁性药物的分布检测。

[参考文献]

[1] 朱庄生,袁春柱,周朋. 无源导航定位技术研究现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展,2011,26(4):1473-

1477

[2] Hongama S, Nagao K, Toko S, et al. MI sensor - aided screening system for assessing swallowing dysfunction: application to the repetitive saliva - swallowing test [J]. J Prosthodont Res,2012,56(1):53-57

[3] 郭廷麟,辛磊,邹文斌,等. ANKON 胶囊内镜磁扫描定位技术的初步研究[J]. 中华消化内镜杂志,2013,30(12):701-702

[4] Chen T, Vamos AC, Dailey SH, et al. A study of phonemic-surgical arm support postures using a magnetic motion tracking system [J]. Laryngoscope, 2015, 126(4):918-922

[5] 周国华,张树,赵文春,等. 低速运动条件下的磁传感器定位方法[J]. 船电技术,2016,36(9):1-5

[6] Hu C, Li M, Meng MQH, et al. A new tracking system for three magnetic objectives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(12):4023-4029

[7] 王旋,敦煌俊秋,汤福南,等. 基于磁定位技术的放疗呼吸曲线检测系统的设计与应用[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(6):42-45, 32

[8] 王延花,王旋,敦煌俊秋,等. 基于磁阻传感器的磁靶向药物实时示踪系统设计[J]. 南京医科大学学报(自然科学版),2014,34(9):1206-1212

[9] 张可,汤福南,李修寒,等. 基于永磁定位技术的三维腿部运动检测系统设计[J]. 中国医疗设备,2017,32(9):33-39

[10] 李鑫. 永磁体空间磁场分布规律及其在传感器中的应用[D]. 南京师范大学,2015

[11] 刘晓龙. 基于图像序列的欧式三维重建理论与方法研究[D]. 东北大学,2010

[12] Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(13):671-680

[13] Jin H, Miyazaki T. Tunnel magnetoresistance effect. The physics of ferromagnetism [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012:403-432

[14] 李子芳. 永磁体等效磁矩的测量[J]. 大学物理实验, 1994,7(2):5-8

[15] 张勇,李艳,李盛慧,等. 利用光磁共振实验测量地磁场强度[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2011, 36(4):55-58

[收稿日期] 2017-11-15