

Design of Magnetic Fluological Medical Software Capsule Robot

Ruiming Zhao Zihao Li Hongyang Xu Zilu Peng Zhen Zhang

School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221000, China

Abstract

The input terminal transforms the position data of the three-axis Helmholtz coil, the PC terminal transforms the position information into the electrical signal, and the three-phase AC power supply coil receives the magnetic field mode required for expert diagnosis, so as to perform the conversion of different working states of the magnetorhec software capsule robot.

Keywords

capsule robot; triple-axis Helmholtz coil; rotating magnetic field; accurate sampling

磁流变医疗软体胶囊机器人的控制系统设计

赵瑞铭 李子昊 徐鸿阳 彭梓璐 张震

中国矿业大学机电工程学院, 中国·江苏 徐州 221000

摘要

输入端将操作信息转化三轴亥姆霍兹线圈的位置数据, PC端将位置信息转变成电信号, 三轴亥姆霍兹线圈接收到三相交流电源输送的电信号产生专家诊断所需要的磁场模式, 从而进行磁流变软体胶囊机器人实不同工作状态的转换。

关键词

胶囊机器人; 三轴亥姆霍兹线圈; 旋转磁场; 精准取样

1 引言

近几年来人工智能在医疗领域的应用越来越广泛, 使得传统内窥镜克服传统局限性, 提高诊断准确性, 减少病人不适感成为可能。胶囊机器人逐渐成为诊断肠胃疾病的有效工具。许多研究者利用电磁控制系统驱动胶囊机器人的灵活运动, 电磁场的应用已经证明了其在临床的功能性优势, 随着微电子机械系统的发展, 具有治疗功能的无线胶囊内窥镜逐渐成为中国和其他国家研究者关注的热点。

结合国际和课题组内无线胶囊内窥镜的研究现状分析, 本研究基于磁流变胶囊软体机器人对其控制方法进行论证。论文先介绍胶囊机器人的驱动原理, 再基于亥姆霍兹线圈的磁场分析控制系统的可行性^[1], 最后对整个控制系统分析的工作进行总结。

2 系统框架结构

磁流变软体胶囊系统概念如图1所示, 胶囊机器人内置的视觉采集传输模块将消化道内的环境信息无线传输至PC端, 专家通过PC段反馈的信息进行分析, 根据消化环

境的具体问题制定方案, 根据方案操作输入段(鼠标、手柄), 输入端将操作信息转化三轴亥姆霍兹线圈的位置数据, PC端将位置信息转变成电信号, 三轴亥姆霍兹线圈接收到三相交流电源输送的电信号产生专家诊断所需要的磁场模式, 从而进行磁流变软体胶囊机器人实不同工作状态的转换。

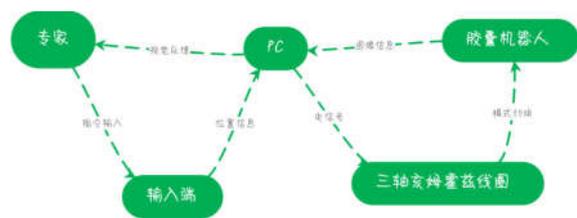


图1 磁流变软体胶囊机器人系统概念图

整个诊治过程中胶囊机器人的运动均处于亥姆霍兹线圈产生的均匀磁场内。在检测时, 病人需先吞服胶囊机器人获取消化环境的相关信息, 专家通过预定方案控制胶囊机器人的运动, 当胶囊机器人发现病变位置后通过改变操作模块进行病变组织取样。最后, 控制系统控制胶囊机器人移动完成回收。

3 控制系统

传统胶囊机器人利于人体消化系统的蠕动进行被运动,

【作者简介】赵瑞铭(2001-), 男, 中国陕西西安人, 在读本科生, 从事机械工程研究。

这种运动方式是被动的、不可控的；为了解决这种方式的缺陷，项目提出一个解决方案——通过外磁场与永磁铁的耦合作用去控制胶囊机器人运动。

磁流变胶囊软体机器人进行完成检查取样任务的关键是控制系统，本项目设计的控制系统考虑了以下因素：

①控制系统调节的外磁场强度不能过大且分布均匀，在诊治过程中不能对产生伤害。世界卫生组织的研究表明，人体最高可承受的磁场强度临界值为 2T。

②控制系统产生的磁场环境可以实现胶囊机器人功能模块和运动模块的切换。

③控制系统调节的外磁场与胶囊机器人中的永磁铁产生的耦合作用，需要为胶囊机器人进行模式转换和组织取样提供足够的驱动力^[2-3]。

3.1 三轴亥姆霍兹线圈

由于诊治任务对胶囊机器人在作业过程所需要磁场的均匀性以及可控性更高，所以在胶囊机器人进行取样功能作业时，磁场均匀区是必需的。亥姆霍兹线圈可以产生均匀磁场且其轴向分布均匀、可控性较好，产生的均匀磁场位于线圈中心区域，便于操作控制。

三轴亥姆霍兹线圈的概念如图 2 (a) 所示，项目选用亥姆霍兹线圈实物图如图 2 (b) 所示，线圈参数如表 1 所示。

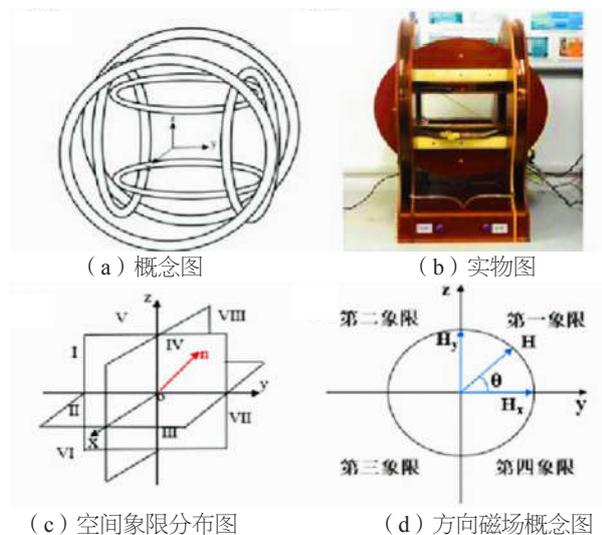


图 2 三轴亥姆霍兹线圈

表 1 线圈参数

	线径 (mm) 铜线 (1.81)	内直 径 (mm)	外直 径 (mm)	匝数 (匝)	电阻 (Ω)	有效 半径	截面尺寸 (宽×高)	线圈 常数
x 线圈	2.0	246	345	224	3.05	152	32×28	0.19
y 线圈	2.0	198	246	168	1.65	111	28×24	0.16
z 线圈	2.0	130	170	110	0.78	75	22×20	0.17

z 铜线实际宽度 22mm，实际厚度 20mm；铜线实际宽度 28mm，实际厚度 24mm；x 铜线实际宽度 32mm，实际厚度 28mm。

3.2 磁场模式分析

大多数疾病病例都可以通过取样来进行病理学诊断。整个取样过程需要避免对病人造成伤害，也需要保证取样部位的精准，对取样钳具开口方向的控制精度要求更高。本项目的选用的三轴亥姆霍兹线圈的磁场控制分析的方法，来自于大连理工大学提出了一种基于正交变换的旋转磁场控制方法；将空间旋转磁场的三个控制变量解耦为两个控制变量，在更加精准的控制空间旋转磁场的同时，也简化了计算。项目定义空间亥姆霍兹线圈中心点为 0 (0, 0, 0)，建立空间直角坐标系，如图 3 所示。

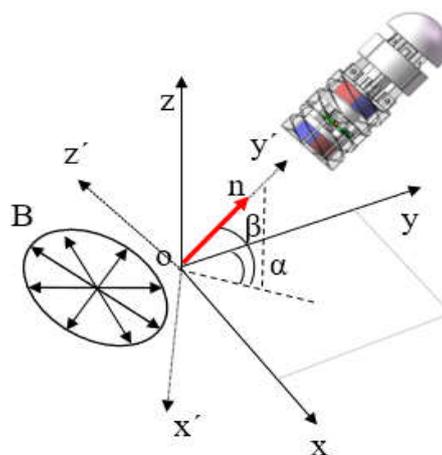


图 3 胶囊机器人的旋转运动

旋转磁场的法向量定义为 \vec{n} ， \vec{n} 的旋转可以分解为绕空间中两个坐标轴的旋转。定义 α ， β 分别为向量 \vec{n} 与面 yoz 与面 xoy 的夹角，在初始位置时 \vec{n} 与 y 轴的正半轴重合，且 α ， β 为 0° 。Ox' y' z' 是 \vec{n} 向量围绕 O 点旋转后的坐标系。

α ， β 在三维空间内的旋转矩阵 $R(\alpha)$ 、 $R(\beta)$ 表示为：

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

正交矩阵 O 表示为：

$$O = Rot(x', \beta) Rot(z, -\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha \cos\beta & \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\alpha \sin\beta & -\cos\alpha \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (3)$$

\vec{n} 旋转后，磁感应强度 B 变化为 B' ($B_0 \sin\omega t$ 0 $B_0 \cos\omega t$)， B_0 ， ω 分别表示磁感应强度的大小，旋转磁场角速度。对磁感应强度 B 正交变换的计算表示为：

$$B = O^{-1} B' = O^T B' = \begin{bmatrix} B_0 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \beta} \sin(\omega t - \varphi_x) \\ B_0 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \beta} \sin(\omega t + \varphi_y \pm 180^\circ) \\ B_0 \cos\beta \sin(\omega t + 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由电磁学可知，磁感应强度 B 正比于线圈中通入的电流，其系数 K 为线圈常数，表 1 已给出相关参数。

$$B = KI \quad (5)$$

当磁感应强度 B 旋转后，线圈中通入电流可以表示为：

$$I_x = \frac{0.17}{0.19} \times I_0 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \beta} \sin(\omega t - \varphi_x) \quad (6)$$

$$I_y = \frac{0.17}{0.16} \times I_0 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \sin(\omega t + \varphi_y \pm 180^\circ) \quad (7)$$

$$I_z = I_0 \cos \beta \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (8)$$

公式中, $\tan \varphi_x = \tan \alpha \sin \beta$, $\tan \varphi_y = \cot \alpha \sin \beta$, I_0 表示通入霍兹线圈电流的幅值。磁场的空间象限分布如图 2(c) 所示, 由反相位叠加定律可知, 旋转法向量为相同方向旋转可以实现顺逆时针的双向控制, 也就可以得到逆时针磁场方向的在不同象限的电流驱动公式。如果想要驱动机器人的反向运动, 根据反相位叠加定律, 只需要把对应电流的相位角变为原相位角的补角, 依照这样就可以根据需求选择相对应象限的电流驱动公式, 实现机器人的双旋向控制。根据叠加定律和电磁学, 如果给空间内相互正交的两组三轴亥姆霍兹线圈通入直流电, 那么将会在一个平面中叠加上方向磁场, 并且通过调整输入电流的比值改变方向磁场的方向。

如果取样位置位于三轴亥姆霍兹线圈 yox 面上, 方向磁场概念图如图 2(d) 所示。病变角度定义为 θ , 假设取样位置在第一象限, 那么可以得出取样角度与磁场中通入的直流电流关系如下:

$$H_y = H \cos \theta \quad (9)$$

$$H_z = H \sin \theta \quad (10)$$

$$\tau = \mu_0 VMH \sin \alpha \quad (11)$$

公式中, H 为磁场产生的磁场强度; 下标 y, z 分别为 y

轴线圈和 z 轴线圈; τ 为活检需要的切应力; V 为磁铁的体积; M 为磁铁产生的磁化强度; α 为 H 和 M 的夹角。结合三轴亥姆霍兹线圈检验报告磁场对应电流公式, 可以将磁场强度转变为磁场所需要的电流值, 其他象限同理可得。

$$H_x = 6.6 \times I \quad (12)$$

$$H_y = 7.4 \times I \quad (13)$$

$$H_z = 7.2 \times I \quad (14)$$

综上所述, 根据磁场电流控制公式, 在旋转磁场模式下控制机器人到达取样位置, 然后在方向磁场模式下控制取样机构与病变位置对齐并激活, 从而实现精准取样。

4 结语

论文针对胶囊机器人控制系统的重要问题开展了理论建模和理论解析计算。现主要结论如下: 论文采用的磁力计算理论模型可以用于快速改变磁场模式, 具有高效率、高精度等优点。研究结果将为胶囊机器人磁驱系统的研发提供参考, 为磁驱胶囊机器人在胃肠道内的精准控制提供理论基础。

参考文献

- [1] 黄芳. 磁驱动活检胶囊机器人结构的设计与研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [2] 李辉, 张永顺. 三轴正交亥姆霍兹线圈的磁场均匀性分析[J]. 现代机械, 2019(4): 1-5.
- [3] 张永顺, 徐长亮, 迟明路, 等. 三维梯度旋转磁场内胶囊机器人磁力[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 1-7.