

胶囊机器人万向旋转磁场的转弯磁矩特性^①

张永顺^② 马 壮 解华英 张建军

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘 要 针对胶囊机器人任意方向的转弯驱动,提出了向三轴正交亥姆霍兹线圈加载一定幅值和相位关系的同频谐波电流叠加空间万向旋转磁场的技术方案,研制了磁场发生装置与三相变频驱动电源,并成功地进行了万向旋转磁场的验证与转弯试验。根据磁耦合机理建立了空间磁力矩模型,并基于欧拉方程,建立了机器人摆动方程,研究了转向角与随动力矩和自转力矩的关系,进而分析了磁驱动力分量对胶囊机器人稳定性和驱动效果的影响,结果表明,旋转磁场的随动效应有利于机器人转弯。

关键词 三轴亥姆霍兹线圈,万向旋转磁场,磁矩特性,转向角,随动效应

0 引言

针对胶囊机器人无缆驱动方式,科学家进行了大量探索性研究,外磁场驱动胶囊机器人适于体内狭小环境,可靠性良好,对这类机器人的研究开发已成为一种趋势。意大利比萨大学 Federico 等人采用圆柱磁体旋转产生均匀外磁场,在磁耦合作用下,机器人在外磁场的导引下实现了机器人姿态与方向的调整^[1],但存在磁场不均匀,旋转磁场轴线不可调整等问题;日本 Yamazaki 等人研制出一种由外磁场驱动的螺旋式微机器人^[2,3],在有机体实验中取得良好效果。中国科学院研制了以两轴亥姆霍兹线圈产生旋转磁场驱动的螺旋机器人^[4,5],实现了机器人的直线驱动行走;大连理工大学研制了由多磁极圆柱磁铁产生旋转磁场的驱动方案,利用径向间隙补偿和多楔形效应,实现了胶囊机器人在动物肠道内的垂直游动^[6]。上述研究均未涉及胶囊机器人在弯曲肠道内的外磁场驱动问题。由于磁场具有方向性,胶囊机器人在复杂环境内的运动控制较为困难。针对这个问题,本文提出了在三轴正交亥姆霍兹线圈中加载一定幅值和相位关系的同频谐波电流产生空间万向旋转磁场驱动胶囊机器人转弯的技术方案,而且根据磁耦合机理建立了磁力矩模型,并基于欧拉方程,建立了机器人摆动方程,对外磁场磁矩特性及姿态控制的稳定性进行了研究。实验表

明,该方案可产生空间万向旋转磁场,它使胶囊机器人产生的随动效应有利于机器人转弯,该结论为机器人在弯曲肠道内的驱动奠定了基础。

1 旋转磁场发生装置

两组亥姆霍兹线圈能产生固定轴的平面旋转磁场,由空间解析几何可知空间磁矢量叠加可产生任意方向磁场,有鉴于此,本文研制了空间万向旋转磁场发生装置(如图1所示),该装置每对线圈之间的

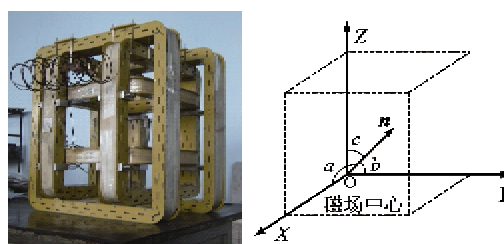


图1 磁场发生装置及坐标建立

距离可调节,构成亥姆霍兹线圈时,可实现强度为 $(14.50 \pm 0.01) \text{ mT}$ 的磁场,均匀磁场有效空间可达 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。向三组亥姆霍兹线圈通入满足

$$\begin{cases} I_x = -I_0 \sin a \sin(\omega t - \varphi_x) \\ I_y = I_0 \sin b \sin \omega t \\ I_z = -I_0 \sin c \sin(\omega t + \varphi_y) \end{cases}$$

① 国家自然科学基金(60875064,61175102)资助项目。

② 男,1965年生,博士,教授;研究方向:机器人机电一体化技术,医疗微型机器人;联系人,E-mail: zysun@dlut.edu.cn (收稿日期:2011-06-07)

$$\tan\varphi_x = \frac{\cos b}{\cos c \cdot \cos a}, \tan\varphi_y = \frac{\cos a}{\cos c \cdot \cos b} \quad (1)$$

的谐波电流,便可产生以向量 $\mathbf{n}$ 为旋转轴的均匀旋转磁场^[7]。式中: a, b, c 分别为胶囊机器人运行轨迹的切向向量 $\mathbf{n}$ 在坐标系 $OXYZ$ 内的坐标角; I_0 为加载的电流幅值; ω 为外磁场旋转角速度。根据机器人的前进方向确定三轴线圈中所要加载的电流关系,驱动机器人按预定轨迹行走。改变电流频率,可调整机器人的速度;同时改变三相电流方向,机器人运动方向改变。

2 磁场方向

在三轴亥姆霍兹线圈中心处建立定坐标系 $OXYZ$, 动坐标系 $oxyz$ 建立在圆形管道中心处,如图 2 所示。从 $OXYZ$ 到 $oxyz$ 的变换矩阵 T 为^[8]

$$T = \text{Trans}(x_0, y_0, z_0, 1) \text{Rot}(Z, \rho) \cdot \text{Rot}(Y, \sigma) \text{Rot}(X, \delta) \quad (2)$$

式中: $\text{Rot}(X, \delta)$ 、 $\text{Rot}(Y, \sigma)$ 、 $\text{Rot}(Z, \rho)$ 为旋转变换矩阵,表示定坐标系分别绕 X, Y, Z 轴转过 δ, σ, ρ 角度; $\text{Trans}(x_0, y_0, z_0, 1)$ 为平移变换矩阵,表示定坐标系的平移向量。图 2 中, v_a 为机器人的转弯线速度。

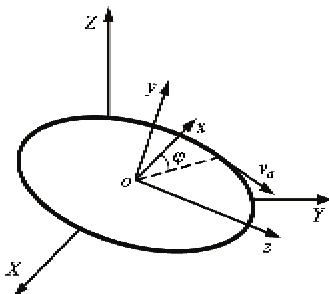


图 2 坐标关系示意图

当胶囊机器人沿规划轨迹行走时,速度方向应沿轨迹切线方向,控制外磁场旋转平面法线始终沿轨迹切线方向一致即可,因此需要求出轨迹在 $OXYZ$ 坐标系内的切线向量。

在坐标系 $oxyz$ 内,通过圆环管道参数方程可求出圆环管道内任一点处切线向量的参数方程为

$$\begin{cases} x = -R \sin\varphi \\ y = 0 \\ z = R \cos\varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中, φ 为在机器人圆环轨迹所在的平面内,机器人所走过的圆心角。

经坐标变换可得机器人运动轨迹切线向量在坐

标系 $OXYZ$ 中的向量为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(x_0, y_0, z_0, 1) \text{Rot}(Z, \rho) \cdot \text{Rot}(Y, \sigma) \text{Rot}(X, \delta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$(X, Y, Z, 1)$ 即为外驱动磁场旋转平面的法向坐标,也可记为 $(\cos a, \cos b, \cos c, 1)$, 并由

$$\begin{aligned} \cos a &= \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \\ \cos b &= \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \\ \cos c &= \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

确定了胶囊机器人在弯曲管道内任意一点的切向坐标,不断沿机器人轨迹施加相应法线方向的空间旋转磁场,便可驱动机器人转弯。

3 磁驱动力矩

在胶囊机器人的中心 o_2 处建立坐标系 $o_2x_0y_0z_0$, 坐标系 $o_2x_0y_0z_0$ 随机器人沿弯曲管道平动,建立赖柴坐标系确定机器人空间姿态,引入 α 和 β 两个姿态角^[9],如图 3 所示。平动坐标系 $o_2x_0y_0z_0$ 到赖柴坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 的齐次变换矩阵 A 为

$$A = \text{Rot}(y, \alpha) \text{Rot}(x, \beta) \quad (6)$$

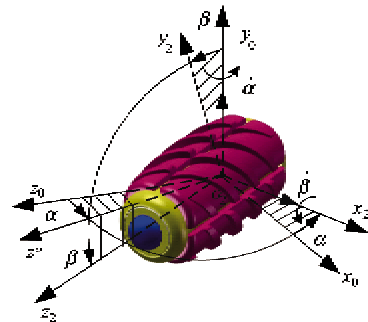


图 3 赖柴坐标系与平动坐标系

空间万向旋转磁场在有效空间内每一点处的磁场强度和磁场方向都一致,只要胶囊机器人的运动轨迹确定后,施加外旋转磁场的方向就可确定,耦合磁力矩的大小与机器人的姿态有关。

采用离散逼近法将弯曲管道分解为多段直线,

间断改变旋转磁场平面法向使机器人内嵌驱动器的磁矩旋转平面与外磁场旋转平面存在夹角 φ , 外磁场对机器人产生方向垂直于机器人旋转轴线的随动转弯力矩, 称为随动效应现象, 如图 4 所示。根据所采用的控制策略, 将外磁场旋转平面法向改变的角度 φ 称为转向角。

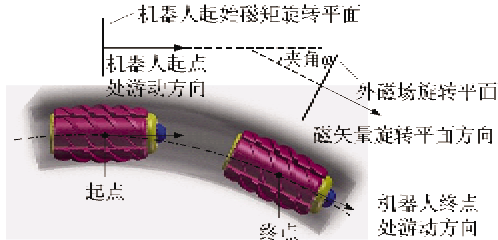


图4 胶囊机器人转弯控制

胶囊机器人转弯瞬时位姿如图 5 所示。磁耦合力矩 T 不仅在机器人轴线上产生分量 T_{z_2} 维持其自转, 还在垂直于机器人轴线的 x_2 轴、 y_2 轴上产生磁力矩 T_{x_2} 、 $T_{y_2}^{[10]}$, 其中 T_{x_2} 仅使机器人摆动; T_{y_2} 不仅使机器人摆动, 还有助于机器人的转弯, 称为随动力矩。根据磁耦合理论^[11], 旋转磁矢量与永磁体的耦合的磁力矩垂直于永磁体磁矩矢量与空间磁矢量形成的平面, 有

$$T = M \times B \quad (7)$$

式中 M 为永磁体的磁矩矢量, B 为空间旋转磁场的磁矢量。

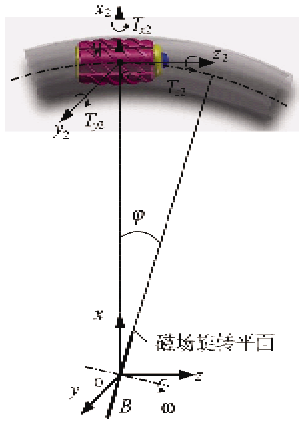


图5 胶囊机器人瞬时位置姿态

旋转磁矢量在赖柴坐标系中表示为 B_2 , 有

$$B_2 = A \cdot Rot(y, \varphi) \begin{bmatrix} B \cos \omega t \\ B \sin \omega t \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 B 为外磁场强度, ω 为外磁场旋转角速度。

磁矩矢量的旋转平面与 $x_2 o_2 y_2$ 平面重合, 在赖柴坐标系中表示为 M_2 , 有

$$M_2 = \begin{bmatrix} M \cos \theta \\ M \sin \theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 M 为永磁体磁矩, θ 为机器人自转角度。

在赖柴坐标系下, 机器人的磁耦合力矩分量为

$$T = (T_{x_2}, T_{y_2}, T_{z_2})^T = M_2 \times B_2 \quad (10)$$

即为

$$\begin{aligned} T_{x_2} &= -MB[(\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi) \cos \omega t \\ &\quad + \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t] \sin \theta \\ T_{y_2} &= MB[(\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi) \cos \omega t \\ &\quad + \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t] \cos \theta \\ T_{z_2} &= MB[\cos \beta \sin \omega t - \sin \beta \cos \varphi \cos \omega t] \cos \theta \\ &\quad - [(\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi) \cos \omega t \\ &\quad - \sin \alpha \sin \beta \sin \omega t] \sin \theta \end{aligned} \quad (11)$$

4 机器人摆动方程

通过雷诺方程可得机器人表面压力分布^[12], 进而可得稳态转弯线速度与机器人所受液体力矩。转向角的出现可产生随动力矩驱动机器人转弯并伴随高频摆动。由于机器人随外磁场同步旋转, 作用在 z_2 轴上的外力矩为零, 不影响机器人摆动, 所以可根据欧拉方程^[9], 根据作用在 x_2 轴、 y_2 轴上的磁力矩与液体力矩建立机器人的摆动方程为

$$\begin{cases} J\ddot{\beta} + H\dot{\alpha} = T_{x_2} + M_{x_2} \\ J\ddot{\alpha} - H\dot{\beta} = T_{y_2} + M_{y_2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: J 为机器人的摆动转动惯量; H 为机器人绕 z_2 轴的角动量, 有 $H = J_z \omega$, J_z 为机器人自转转动惯量; M_{x_2} 、 M_{y_2} 为机器人所受液体力矩^[13], 有

$$\begin{aligned} M_{x_2} &= k_{11}\dot{\beta} - k_{12}\dot{\alpha} \cos \beta - k_2 \frac{\sqrt{1 - \cos \alpha \cos \beta}}{\sqrt{1 + \cos \alpha \cos \beta}} \cos \alpha \cos \beta \\ M_{y_2} &= k_{11}\dot{\alpha} \cos \beta - k_{12}\dot{\beta} - k_2 \frac{\sqrt{1 - \cos \alpha \cos \beta}}{\sqrt{1 + \cos \alpha \cos \beta}} \sin \alpha \end{aligned}$$

式中 k_{11} 、 k_{12} 、 k_2 为拟合系数。

根据式(12)可得弯管内磁场转向角与机器人姿态角的关系。

磁驱动胶囊机器人在弯管内运动, 同时伴随高频摆动, 摆动严重时可能会碰壁, 如图 6 所示。为了防止碰壁, 对机器人碰壁判断条件进行分析^[13], 得到下述关系式:

$$L_c R_c \sin \gamma + 2(r_s + e) R_c \cos \gamma < (R_c + R)^2 - (r_s + e)^2 - \frac{L_c^2}{4} - R_c^2 \quad (13)$$

式中: γ 为机器人最大允许摆动角度; L_c 为机器人瓦片长度; e 为机器人瓦片径向偏移量; r_s 为机器人瓦片外圆面半径; R 为弯管截面半径; R_c 为弯管中径曲率半径。根据式(13), 可得机器人极限摆动角度 γ 。

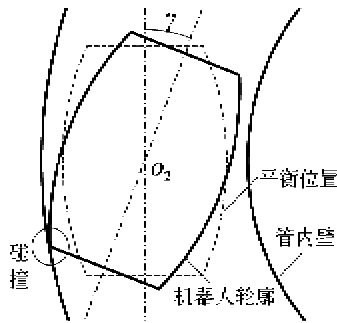


图6 机器人在弯管内偏转的极限位置

5 磁驱动力矩特性分析

弯由试验环境与新型机器人样机如图7所示。仿真参数如表1所示。

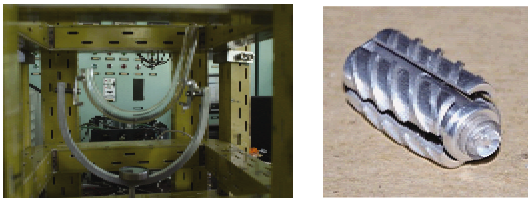


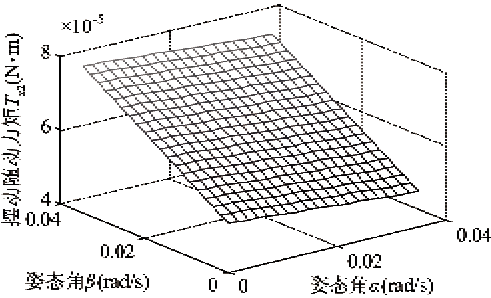
图7 转弯试验环境与新型机器人样机

表1 仿真参数

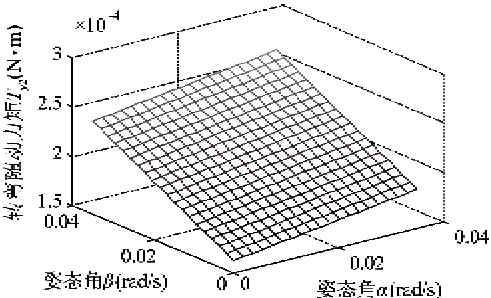
参数	
铜瓦偏移量 e (mm)	2.0
铜瓦外圆面半径 r_s (mm)	4.0
铜瓦长度 L_c (mm)	23
螺旋肋高 h_o (mm)	1.0
机器人自转转动惯量 J_z ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.7×10^{-7}
机器人摆动转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1.6×10^{-7}
永磁体磁矩 m ($\text{A} \cdot \text{m}$)	0.35478
磁场旋转角频率 ω_M (rad/s)	52.36
磁通密度 B (T)	0.007
弯管内径 R (mm)	7.5
弯管中径曲率半径 R_c (mm)	100
液体运动粘度 η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.5

5.1 磁驱动力矩与姿态角

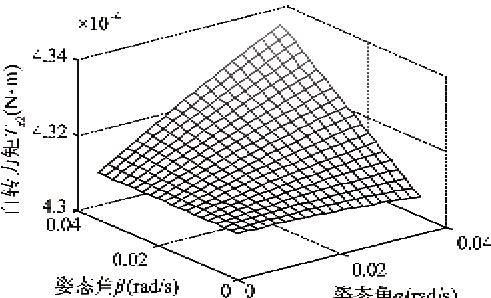
在外磁场旋转角速度与磁场旋转平面法向不变的情况下, 分析满足不碰壁条件下的姿态角 α, β 对磁力矩的影响。由式(11)可得机器人姿态角与磁力矩的关系曲线, 如图8所示。可见, 空间磁力矩的大小随姿态角变化, 是与姿态角相关的时变函数。



(a) 姿态角与磁力矩分量 T_{x2} 的关系



(b) 姿态角与磁力矩分量 T_{y2} 的关系



(c) 姿态角与磁力矩分量 T_{z2} 的关系

图8 姿态角与磁力矩分量在0.25秒时的情形

5.2 磁驱动力矩与磁场转向角

只改变转向角, 由式(11)可得空间磁力矩分量与转向角的关系曲线。

图9是不同转向角时, 外旋转磁场摆动力矩 T_{x2} 随时间的变化曲线, 其幅值随转向角增大, 摆动幅度太大会降低机器人稳定性, 甚至使机器人碰壁。由于各力矩分量是随时间变化的谐波, 为了便于分析, 以下分析采用力矩谐波分量的平均值。

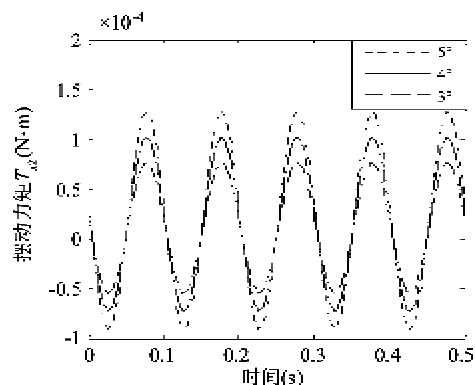


图9 不同转向角时摆动随动力矩与时间的关系

图10是随动力矩 T_{α} 与转向角的关系曲线,平均随动力矩随转向角增大,可提高机器人的转弯驱动能力,有利于胶囊机器人在弯管内的随动行走。

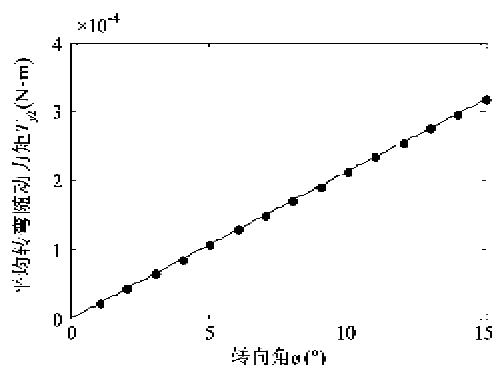


图10 磁场转向角与转弯随动力矩的关系

图11是机器人自转磁力矩 T_{β} 与转向角的关系曲线,平均自转转矩随转向角减小,使胶囊机器人的旋进能力降低,可见,转向角太大使机器人的旋转驱动力矩不足而不能行走。

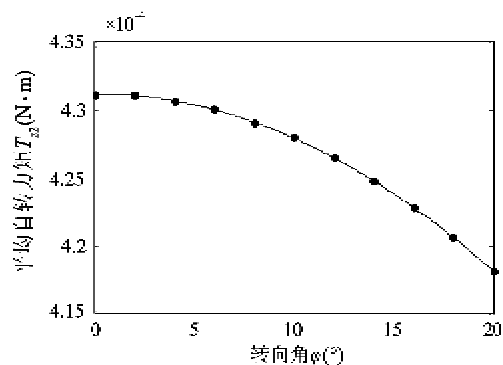


图11 外磁场转向角与自转力矩的关系

5.3 转向角与机器人姿态角

由式(12)可得机器人姿态角与转向角的关系,

如图12所示,机器人在转弯过程中的摆动幅度随转向角增大,因此,在规划控制策略时,较大的转向角不利于机器人的稳定性,甚至机器人会碰壁。

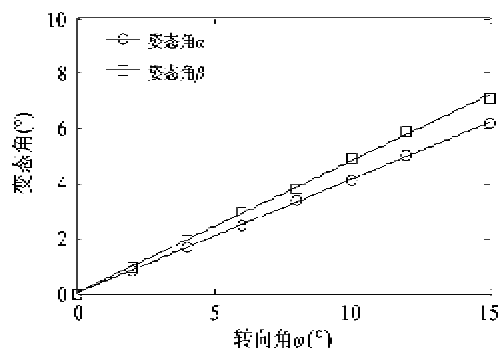


图12 转向角与机器人姿态角的关系

综上所述,外旋转磁场的转向角应该适宜,以提高机器人在弯管内的综合驱动性能。转向角不宜过小,小转向角不能为机器人提供足够的随动转弯力矩,小转向角还会使磁场控制器的快速响应较难实现;转向角不宜过大,大转向角会降低机器人自转力矩,使机器人丢步甚至不能行走,大的转向角还会加剧机器人的摆动,甚至碰壁。根据仿真参数,由式(13)可算得机器人的极限摆动角度 γ 约为 4.8° ,取转向角为 8° 时,机器人的摆角约为 4° ,此时,机器人可获得较大的转弯驱动能力,又不会发生撞壁。

最后,研制了万向磁场叠加装置和三相变频控制电源,以小磁针的转向检测旋转磁场的方向,按式(1)施加方向 (a, b, c) 为 $(45^{\circ}, 60^{\circ}, 60^{\circ})$ 的旋转磁场,试验证明产生了相应方向的旋转磁场,并进行了机器人转弯试验,如图13所示。图中,空间万向旋转磁场的方向改变5次,以实现基于随动力矩的转弯驱动。

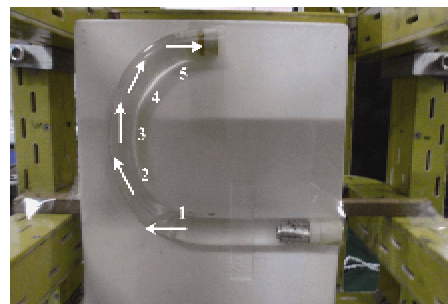


图13 胶囊机器人转弯驱动试验

6 结论

本文提出了以三轴正交亥姆霍兹线圈产生空间

万向旋转磁场实现胶囊机器人转弯的技术方案,对旋转磁场的磁矩特性和随动效应进行了研究,得出如下结论:(1)所提出的以三轴正交亥姆霍兹线圈叠加空间万向旋转磁场的技术方案切实可行,空间磁力矩分量是与姿态角相关的时变函数;(2)随动力矩随转向角度增大,大转向角度有利于实现机器人的转弯驱动,但会影响机器人的稳定性,甚至会发生碰壁现象;(3)自转力矩随转向角度增大而减小,大转向角会削弱实现的驱动力矩,甚至会使机器人发生丢步现象;(4)空间万向旋转磁场完全可以实现胶囊机器人在垂直平面内的转弯驱动。

综上所述,机器人的转向角是一个综合参数,其合理数值的选取既要考虑机器人的稳定性又要考虑足够的力矩而使机器人不发生丢步现象。上述研究对医疗胶囊机器人的转向驱动控制提供了理论依据。未来还要进行胶囊机器人在体内定位以及在弯曲柔弹性管内非接触随动转弯效应的研究。

参考文献

- [1] Federico C, Carlo P. Magnetic maneuvering of endoscopic capsules by means of a robotic navigation system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(5): 1482-1490
- [2] Yamazaki A, Sendoh M, Ishiyama K, et al. Wireless micro-machine with magnetic thin film. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 272-276: 1741-1742
- [3] Ishiyama K, Sendoh M, Yamazaki A, et al. Swimming micro-machine driven by magnetic torque. *Sensors and Actuators*, 2001, 91: 141-144
- [4] Hu C, Chen D M, Max Q, et al. A wireless actuation system for micro-robot moving inside pipeline. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xi'an, China, 2008. 653-658
- [5] Chen D M, Hu C, Wang L, et al. Active actuation system of wireless capsule endoscope based on magnetic field. In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Sanya, China, 2007. 99-103
- [6] Zhang Y S, Jiang S Y, Zhang X W, et al. A variable-diameter capsule robot based on multiple wedge effects. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(2), 241-254
- [7] Zhang Y S, Jiang S Y, Zhang X W, et al. Dynamic characteristics of an intestine capsule robot with variable diameter. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(17): 1813-1821
- [8] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000. 29-42
- [9] 许江宁, 卞鸿巍, 刘强等. 陀螺原理及应用. 北京: 人民教育出版社, 1980. 37-49
- [10] Masahiko S, Kazushi I, Ken I A. Direction and individual control of magnetic micromachine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(5): 3356-3358
- [11] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1985. 549-581
- [12] 池长青. 流体力学润滑. 北京: 国防工业出版社, 1998. 370-390
- [13] 王楠. 胶囊机器人转弯动力学特性: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010. 44-59

Characteristics of magnetic moment of capsule robots driven in pipes with curves by a spatial rotational magnetic field

Zhang Yongshun, Ma Zhuang, Xie Huaying, Zhang Jianjun

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education of China
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract

For the steering drive of a capsule robot in any direction, the paper proposes a technical scheme that uses three axis orthogonal square Helmholtz coils to generate a spatial universal rotating uniform magnetic field by three harmonic currents with the same frequency and relevant amplitude and phase. A magnetic field generator and power source with three phase frequency conversions were developed, and the experiments were conducted successfully for verifying the spatial universal rotating magnetic field and the steering experiment in curve pipes. The magnetic moment modeling was derived according to the magnetic coupling mechanism, and based on the Euler equation, a swinging equation was derived. The relationships between the follow-up moment and the steering angle, as well as between the spin moment and the steering angle, were studied, and finally, the influences of the magnetic moments on the stability of a capsule robot and the robotic drive effect were analyzed, indicating that the follow-up effect generated by the rotating magnetic field is beneficial to its turning movement.

Key words: three axis Helmholtz coils, spatial universal rotating magnetic field, magnetic moment characteristics, steering angle, follow-up effect