

径向伸长可控的微型肠道蠕动机器人^①

林 蔚^② 颜国正^③ 陈宗尧 史玉婷

(上海交通大学医学精密工程及智能系统研究所 上海 200240)

摘 要 针对肠道内特殊的生理结构特征与不同肠段直径的变化,提出了有径向伸长可控的钳位机构的微型肠道蠕动机器人模型。为满足模型需求,设计了阿基米德螺线构成的平面螺旋机构,通过对其自锁能力和伸出杆件的推力的计算验证了此设计模型。机器人控制系统采用分布式设计,本体内电路负责控制机器人单一动作,本体外控制器通过人机接口接收命令后向机器人本体以无线方式发送控制信号。装配完成的机器人实体最大外径约为 13.5mm,蜷缩时长度约为 50mm,径向伸长量为 3.75mm,步距为 10mm,满足模型设计要求。

关键词 肠道,微型机器人,阿基米德螺线

0 引 言

肠道内窥镜系统能够清晰地观察患者肠道壁的病变情况,因而已广泛应用于肠道疾病的诊断与治疗。传统肠道内窥镜通过可从患者的口或肛门插入的内窥镜管前端部图像传感器采集肠道图像信号,医生可调节内窥镜管插入的深度与内窥镜前端的方向观察肠道内壁的组织与病变,如在内窥镜管道中插入活检钳,可对可疑病变进行取样供体外分析。患者在整个检查过程中处于麻醉状态,部分对麻醉剂过敏的患者只能在意识清醒的状态下忍受检查过程中的不适感。于是出现了旨在减轻病患不适的替代方案。2001 年,以色列 Given Imaging 公司生产出了“M2A”胶囊内窥镜^[1,2],它被口服后被动地随肠的蠕动而遍历肠道全程。之后也出现了其他类似胶囊内窥镜^[3-5]。但胶囊内窥镜有严重缺点,比如,它采用电池供电,限制了其工作时间;它随肠的蠕动被动运动的方式可能造成漏检,同时不能对病灶点或者可疑肠段进行反复观测。

微型肠道机器人是一种能够在人体消化道内主动运动的智能系统。2000 年美国加州理工学院设计了多节蠕动的内窥镜机器人^[6],该机器人通过外

部气压控制能够进行钳夹与爬行;2003 年日本东北大学设计了螺旋前进式的机器人^[7],设计思想是通过外加的三维旋转磁场与机器人内部永磁体的耦合使机器人在肠道内主动运动,螺旋前进,同时可带动机器人端部的手术刀进行肠道手术;2006 年 Dario 等人提出了依靠摆动的足在肠道内爬行的多足式肠道爬行机器人^[8],并于 2009 年进行了离体动物实验^[9];2009 年中国大连理工大学也设计了采用外加旋转磁场耦合机器人内部永磁方式驱动的胶囊机器人^[10],该机器人可改变自身直径来适应不同肠道的直径;2010 年 Kim 等人设计了划桨式机器人^[11],该机器人能够伸出 6 支长桨做单方向运动;2011 年 Pan 等人提出了一种采用内部机构与外部磁场混合推进^[12]的机器人运动方式。本文设计的机器人能够主动在肠道内运动,通过改变机器人径向直径而在肠道内钳位后,轴向机构进行伸缩而产生位移。为了应对不同肠段的直径变化,本设计还具备径向伸长可控的机构特征。

1 运动分析与设计

针对活体肠道因腹压对内容物有黏附特征,以及肠道内的湿滑情况,设计的机器人外形如图 1。

① 863 计划(2007AA04Z234),国家自然科学基金(31170968),载人航天领域领先研究项目(010203)和上海市科委(09DZ1907400)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:微型机器人;E-mail: linwayne@sjtu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: gzhyan@sjtu.edu.cn

(收稿日期:2011-02-23)

该机器人由两个舱体构成,分别具备两套独立的径向涨缩机构。该机构能够伸出刚性足,用于撑起肠道降低肠道对机器人壁的黏附,同时可以使伸出刚性足的舱体与肠道保持相对静止,产生舱体对肠道的钳位效果。两个舱体用万向节连接,并在两舱连接处采用波纹管连接保护机器人内部机构与电路。当机器人在前进方向遇到阻力时可产生被动弯转。由于腹压使活体肠道内有一定压力,需要径向钳位机构有一定的推力;为了应对不同肠段的直径大小,钳位机构的刚性足伸出长度需要可控;为使系统能够采用无线供能系统^[13],从降低机器人能耗角度考虑,希望机构在执行器无输入状态能够保持其刚性足的推力。

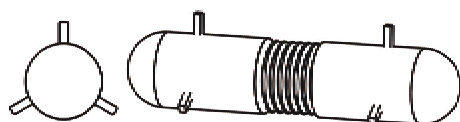


图1 微型机器人

图2示出了微型机器人向前运动一个步距时的步态。在A状态中,机器人尾舱的径向机构打开以在肠道内钳位,通过轴向机构的伸长,机器人向前跨越一个步距成为B状态;C状态中机器人将前舱径向机构打开进行钳位,而后关闭在D状态中尾舱的钳位机构,最后机器人的轴向机构进行收缩成为E状态。从状态A到E,机器人完成一次跨步,而后机器人将尾舱钳位机构打开为下一次跨步做准备。机器人由A状态到F状态顺序循环工作即能向前持续运动。若机器人需要执行后退运动,可沿图2步态反向工作,即由F状态到A状态顺序循环。

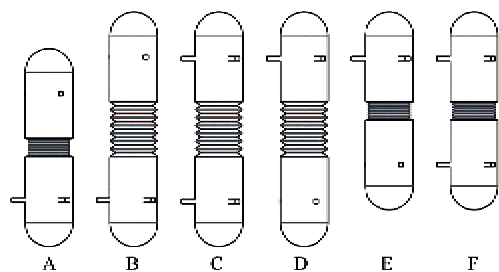


图2 运动步态

1.1 微型驱动器

为实现上述模型的工作状态,本设计采用日本Namiki公司的SBL04-0829PG微型带减速器空心杯电机,该电机额定电压3V,输出轴最大功率为

0.02W,空载转速80rpm,扭转力矩为10.6mNm,机身直径为4mm,机身长度为17.6mm,重量为1030mg。该电机为三相无传感器无刷直流电机,有较长的工作寿命,控制简单,体积小,重量轻,适宜作为本设计的驱动器。

1.2 平面螺旋式径向钳位机构

图3为带自锁的平面螺旋机构的零件与装配示意图。机构由3种零件构成:零件A为矩形杆件,宽度与零件B的导槽相同,能够在导槽中沿径向自由滑动,杆件末端有一圆柱突起,与零件C的螺旋槽配合;零件B导槽盘上的3个导槽中线沿圆周径向方向且均匀分度;零件C为三线的平面螺旋盘,3条螺旋线起点在圆周上均匀分度。该机构能够将平面螺旋盘C的旋转运动转换为杆件A在径向上的伸缩运动。

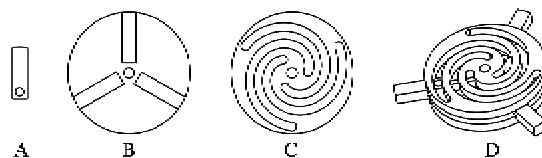


图3 平面螺旋式径向钳位机构

平面螺旋线采用阿基米德螺旋线,该螺旋线上的点与螺旋线原点的距离与该点的矢量角呈线性关系,因此该径向机构的伸出量与平面螺旋盘的转角呈线性关系。设计中采用螺旋的螺距为5mm,螺旋螺旋角度为270°,以120°的夹角均匀分布3条螺旋线。由螺距 P 与可转角度 R ,由公式 $l = PR/(2\pi)$ 可计算得径向位移 l 为3.75mm。

1.2.1 钳位机构自锁计算

为求得该机构的自锁范围,需求得螺旋线的压力角。连接转动圆心 O 与螺旋线上一点 A , A 点上螺旋线的切线方向与径向法线的垂线夹角为 α ,如图4所示。

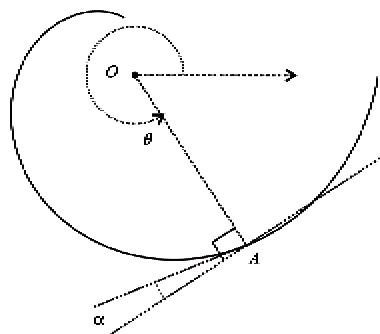


图4 阿基米德螺旋线

平面螺旋盘的导槽中心线的螺线参数方程为

$$\begin{cases} x = \psi(\theta) = \frac{5}{2\pi}\theta\cos\theta + 0.3 \\ y = \varphi(\theta) = \frac{5}{2\pi}\theta\sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中,参数 θ 为螺线上一点的矢量角,本设计取 $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi$ 。由于导槽宽为 0.84mm,根据式(1)得到平面螺旋盘上对杆件外推的螺线参数方程为

$$\begin{cases} x = \psi(\theta) = \frac{5}{2\pi}\theta\cos\theta - 0.12 \\ y = \varphi(\theta) = \frac{5}{2\pi}\theta\sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi$ 。对式(2)求导得

$$\begin{cases} \psi'(\theta) = \frac{5}{2\pi}(\cos\theta - \theta\sin\theta) \\ \varphi'(\theta) = \frac{5}{2\pi}(\sin\theta + \theta\cos\theta) \end{cases} \quad (3)$$

则螺线的切线方程为

$$y' = \frac{\psi'(\theta)}{\varphi'(\theta)} = \frac{\sin\theta + \theta\cos\theta}{\cos\theta - \theta\sin\theta} \quad (4)$$

直线 AO 的斜率为

$$k_1 = \frac{\frac{5}{2\pi}\theta\sin\theta}{\frac{5}{2\pi}\theta\cos\theta - 0.12} \quad (5)$$

由曲线夹角公式计算得压力角为

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctan \left| \frac{y' - k_1}{1 + y'k_1} \right| \quad (6)$$

用数值方法得到 θ 与 α 的关系曲线如图 5。

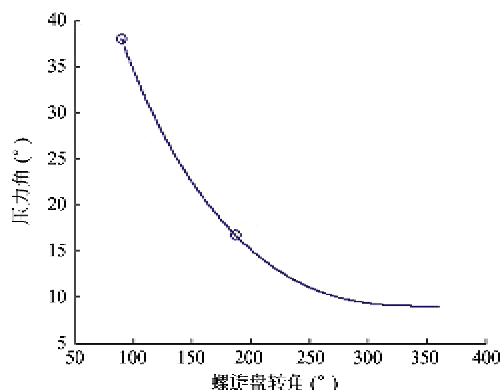


图 5 平面螺旋盘转角与压力角关系

从杆件对螺线径向推力的受力分析(图 6)可知,当满足方程

$$\mu F \cos \alpha \geq F \sin \alpha \quad (7)$$

时机构能够自锁,即杆件对平面螺旋盘的推力无法使盘面转动。式(7)中 μ 为导槽与杆件的摩擦因数, F 为杆件对导槽的正压力,本设计中的两种零件分别是钢与铜,其摩擦因数^[14]为 0.3。对式(7)进行数学变形得到机构自锁条件为

$$\alpha \leq \rho' = \arctan(\mu) \quad (8)$$

其中 ρ' 定义为当量摩擦角,可计算得到对应于摩擦因数 0.3 的当量摩擦角为 16.69°。由于当压力角小于当量摩擦角时能够自锁,由图 5 关系曲线可知,该机构在 θ 从 90°到 183°的范围内无法实现自锁,当 θ 超过 183°可实现自锁。若对应到径向变化的行程上,即杆件的伸出长度在 1.2mm 范围内无法自锁,当伸出长度超过 1.2mm 时能实现自锁。针对肠道直径的大小,该自锁范围能够满足要求。

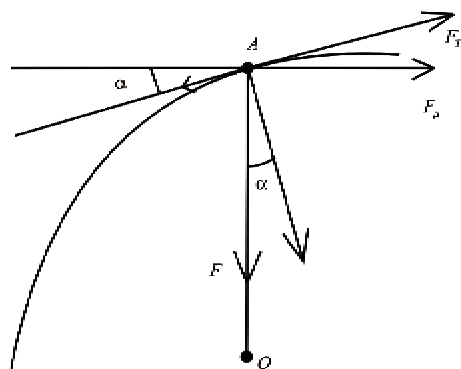


图 6 自锁受力分析

1.2.2 钳位机构推力计算

如图 7 所示, F 为螺线上一点受到的法线压力, F_p 为杆件受到的正压力, F_N 为导槽对杆件的法向支持力, F_μ 为接触点的摩擦力, α 为压力角,即杆件受到的推力方向与杆件运动方向的夹角, φ 为摩擦角,即杆件受到的推力因摩擦力引起偏转角, F_T 为电机转矩产生的等效力。根据受力平衡,从图 7(a)中可列出杆件与导槽的以下受力关系方程:

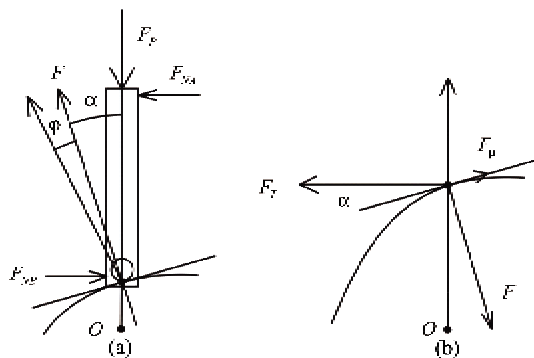


图 7 杆件推力

$$\begin{cases} F\cos\varphi\cos(\alpha+\varphi) = F_p + \mu_2 F_N \\ F\cos\varphi\sin(\alpha+\varphi) = F_N \end{cases} \quad (9)$$

其中 μ_2 为杆件与导槽间的摩擦因数, 消去 F_N , 整理得

$$F_p = F[\cos\varphi\cos(\alpha+\varphi) - \mu_2\cos\varphi\sin(\alpha+\varphi)] \quad (10)$$

由图 7(b) 列出水平方向受力平衡条件

$$F_T = F_\mu\cos\alpha + F\sin\alpha \quad (11)$$

根据转矩与力的关系

$$F_T = \frac{T}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{其中 } T \text{ 为输出转矩}) \quad (12)$$

由式(10)、(11)与(12)推出

$$F_p = \frac{T}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\cos\varphi\cos(\alpha+\varphi) - \mu_2\cos\varphi\sin(\alpha+\varphi)}{\mu_1\cos\alpha + \sin\alpha} \quad (13)$$

根据电机输出转矩 138.9mNm/A , 空载电流 0.07A , 采用 $2:1$ 的齿轮减速比, 计算得 T 为 19.446mNm 。每套钳位机构有 3 支刚性足, 因此对应到每个杆件上的转矩大小为 6.482mNm 。

用数值方法计算出伸出长度与推力的关系如图 8 所示。该推力最大值在杆件伸出长度最短时, 其数值大小为 3.35N , 随着杆件的伸出, 推力单调减小, 当杆件伸出长度为 3.75mm 时达到最小值 2.7N 。

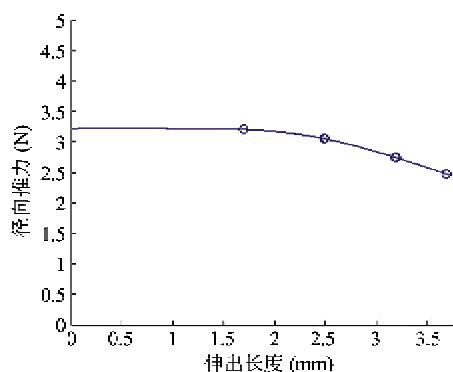


图 8 伸出长度与径向推力关系

1.2.3 钳位机构推力测试

采用如图 9 所示的装置测试径向力。在底座上固定测力传感器用来检测径向伸出杆推力, 在另一端固定支架用于垂直安装机器人本体, 调整机器人本体的高度使伸出杆件与测力传感器的测力臂在同一水平上。机器人支架可沿测力传感器的测力臂轴线方向做位移调节。

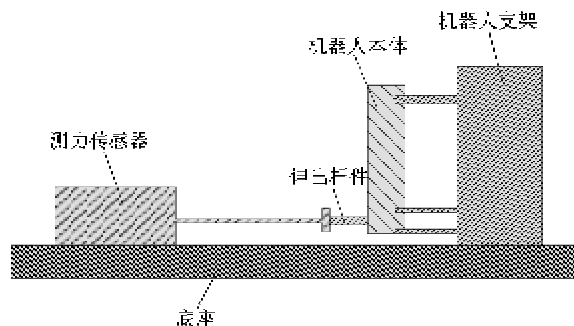


图 9 钳位机构推力测试

图 10 为测力装置实物。选取伸出量为 1.7mm 、 2.5mm 、 3.2mm 与 3.7mm 作为测试点, 测得推力的分别为 3.062N 、 2.695N 、 3.028N 和 2.581N , 实测值与理论值的偏差不大于 12% 。

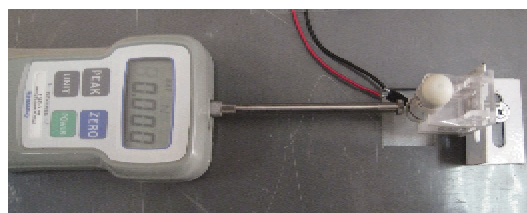


图 10 钳位机构推力测试实物

1.2.4 钳位机构卡紧力测试

为测试钳位机构在肠道内为机构所在舱体所提供的驻留能力, 选用新鲜离体猪肠道进行钳位机构卡紧力测试。将机器人的一舱通过柔性绳索固定重物, 并将其放置于直径约为 20mm 的猪小肠中, 控制该舱体的钳位机构的伸出长度, 当增加重物质量时, 原静止状态的机器人将于目标肠道产生相对滑动, 该重物产生的拖动力为钳位机构的临界卡紧力。目标肠道呈“一”字放置于托盘中, 并将其一端局部固定。测试装置如图 11 所示。



图 11 钳位机构卡紧力测试台

测试中选取钳位机构的伸长量分别为 0mm、1mm、2mm 和 3mm,在机器人整体与目标肠道产生相对滑动时的重物质量对应分别为 47g、60g、89g 和 215g。该实验数据说明当钳位机构的伸长量与肠道直径接近时能够提供较好的驻留效果。

1.3 轴向伸缩机构

根据滑动螺旋原理设计的轴向伸缩机构采用如图 12 的结构。通过电机 A 上的螺纹头 B 转动带动螺纹条 D 平动,电机与螺纹条均安装在法兰 C 上。该机构有体积小,传动链短的特点。设计中采用螺纹的公称直径为 5mm,牙型角为 60°,螺距为 0.8mm,行程为 10mm。若以电机空载转速计算,该机构的运动速度约为 1mm/s。实测该轴向伸缩机构的拉力与速度关系曲线如图 13,当机构空载时,运行速度约为 0.42mm/s,当负载达到 1.3N 时,运行速度约为 0.28mm/s。

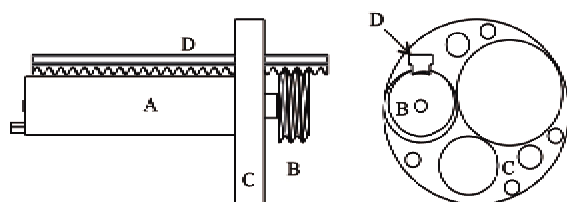


图 12 轴向机构

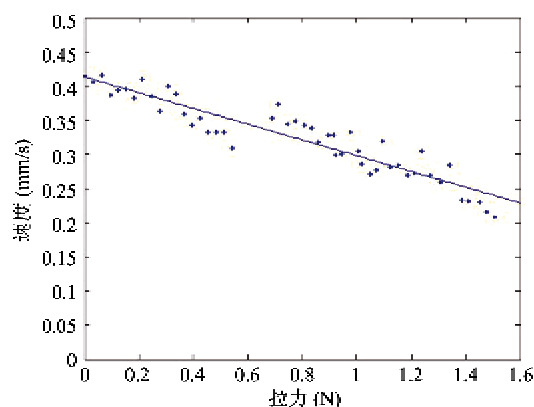


图 13 轴向机构拉力与速度

2 微型机器人控制系统

微型机器人控制系统采用分布式。机器人本体内部安放驱动与控制电路,完成机构的单独运动控制,内含电机转速检测电路,通过控制电机转动周数达到控制轴向机构与钳位机构的位置控制。内部电路其硬件框图如图 14 所示。机器人本体外部电路由人机接口与指令发送控制器组成,外部指令控制器通过人机接口接收命令,将命令编码后发送到

机器人本体译码执行。两部分采用频移键控 (frequency-shift keying, FSK) 进行无线数据通讯。

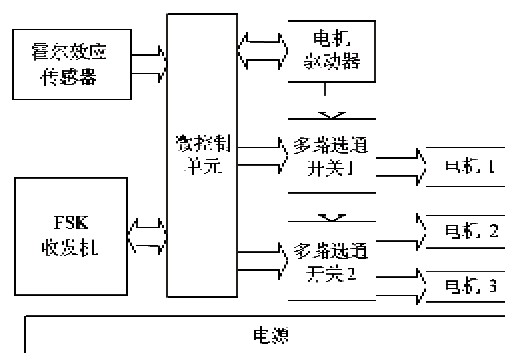


图 14 硬件系统框图

为加强机械机构的安全可靠,在轴向伸缩与钳位机构的极限运动位置分别安装了 6 只霍尔效应传感器,并在运动机构布置磁性材料,用以检测机构是否达到限位位置,布置示意图如图 15。

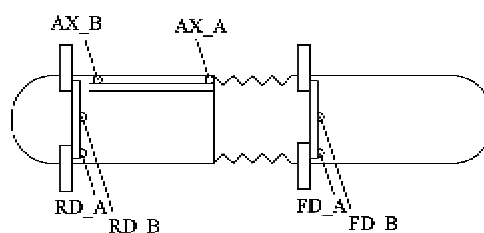


图 15 限位开关安装示意图

组装的实际电路大小如图 16 所示,其中电路板 A 为 FSK 接收模块,电路板 B 为电机驱动芯片,电路板 C 为电源与多路选通开关。

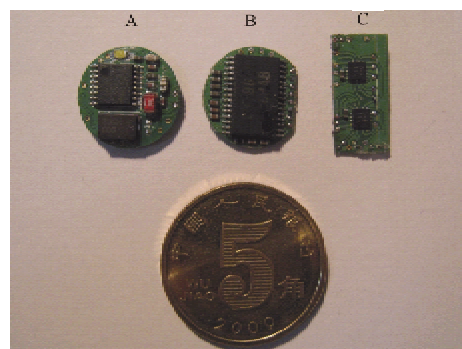


图 16 本体内部电路实物

3 微型机器人

组装完成的微型机器人如图 17 所示。该机器人尾舱长 38mm,直径为 13.5mm,安装了一套钳位机构,一套轴向伸缩机构与一套机器人体内电路板;头舱长 7mm,直径为 13mm,安装了一套钳位机械机

构,该机构的驱动电机安装在尾舱中。头舱大约预留了 4cm^3 的空间,可用于搭载图像传感器,无线功能模块,活检钳与药物释放针头。该机器人的轴向伸缩步距为单步 10mm ,钳位机构的单足最大伸出长度为 3.75mm 。

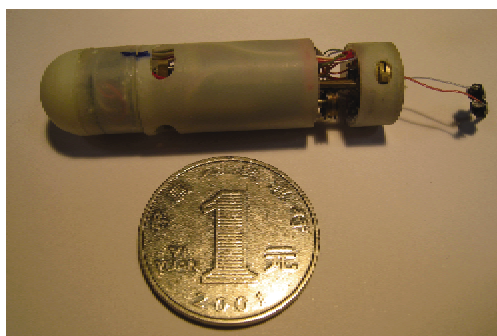


图 17 微型机器人实物

4 结 论

针对全肠道疾病的诊断与治疗,本文设计了一种径向伸出量可控的蠕动式微型机器人,通过分析嵌位机构的自锁能力与推力,实现并测试了整个设计方案。测试结果表明本设计达到设计模型的运动需求,为下一步工作打下了基础。

后期可在机器人头舱中装入微型图像传感器与无线供能模块,并通过无线能量传输系统对实现整个微型智能系统供能使其无缆化。该智能系统可在受试者无需麻醉的条件下进行肠道的无创无痛检测。并可通过机器人离体肠道与活体肠道实验,取得机器人在肠道中的运动数据,进而指导理论建模优化机器人运动方式。

参考文献

- [1] Meron G D. The development of the swallowable video capsule (M2A). *Gastrointestinal Endoscopy*, 2000, 52(6): 817-819
- [2] Mata A, Llach J, Bordas J M. Wireless capsule endoscopy. *World Journal of Gastroenterology*, 2008, 14(13): 1969-1971
- [3] Li C Y, Zhang B L, Chen C Z, et al. OMOM capsule endoscopy in diagnosis of small bowel disease. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 2008, 9(11): 857-862
- [4] Gheorghe C, Iacob R, Baneila I. Olympus capsule endoscopy for small bowel examination. *Journal of Gastrointestinal and Liver Diseases*, 2007, 16(3): 309-313
- [5] 潘国兵,颜国正,邱祥玲. 基于 JPEG 图像的无线胶囊内窥镜的设计. *高技术通讯*, 2010, 20(1): 89-93
- [6] Hoeg H D, Sladkin A B, Burdick J W, et al. Biomechanical modeling of the small intestine as required for the design and operation of a robotic endoscope. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, USA, 2000. 1599-1606
- [7] Yamazaki A, Sendoh M, Ishiyama K, et al. Three-dimensional analysis of swimming properties of a spiral-type magnetic micro-machine. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 105(1): 103-108
- [8] Stefanini C, Menciassi A, Dario P. Modeling and experiments on a locomoting in a tubular, compliant and slippery environment. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(5-6): 551-560
- [9] Quirini M, Menciassi A, Scapellato S, et al. Feasibility proof of a legged locomotion capsule for the GI tract. *Gastrointestinal Endoscopy*, 2008, 67(7): 1153-1158
- [10] 张永顺,岳明,郭东明等. 肠道内变径胶囊微机器人空间磁力矩特性. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(7): 1284-1290
- [11] Kim H, Yang S, Kim J, et al. Active locomotion of a paddling-based capsule endoscope in an in vitro and in vivo experiment (with videos). *Gastrointestinal Endoscopy*, 2010, 72(2): 388-391
- [12] Pan Q, Guo S, Okada, T. A novel hybrid wireless micro-robot. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 2011, 1(1): 60-69
- [13] 辛文辉,颜国正,王文兴等. 胶囊内窥镜能量接收稳定性研究. *仪器仪表学报*, 2009, 30(11): 2433-2437
- [14] 成大先. *机械设计手册*. 北京:化学工业出版社,2010

A radial increment controllable micro intestinal wriggle robot

Lin Wei, Yan Guozheng, Chen Zhongyao, Shi Yuting

(Medical Precision Engineering and Intelligent System Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract

According to the special physiology structure of the intestinal tract and the variety in its dimension, a model of micro wriggle robot with a radial increment controllable clamping mechanism was proposed. To meet the requirements of the model, a flat helix mechanism that obeys Archimedes' spiral was designed. The self-lockable ability and the pushing force of the stretching shaft were calculated to verify the design. The control system of the robot consists of two parts, the onboard circuit and the external controller. The former takes charge of every single motion, while the latter receives command from the user interface, and sends control signal to the onboard circuit through wireless data transmission. The assembled robot prototype fulfills the model requirements in tests, with the diameter of 13.5mm , the minimal longitude of 50mm , the shaft elongation of 3.75mm , and the step of 10mm .

Key words: the intestinal tract, micro robot, Archimedes' spiral