

文章编号 1004-924X(2012)06-1296-07

结肠诊疗微机器人控制系统的设计和实现

陈雯雯*, 颜国正, 高 鹏, 王志武

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了实现对人体消化道的无损检查及治疗, 基于结肠主动检查和肿瘤热疗的控制要求, 设计并实现了结肠诊疗微机器人控制系统。首先, 设计了结肠诊疗机器人系统的硬件组成模块和硬件电路; 基于射频双向无线通信, 给出了软件通信流程和通信时序的实时性要求。之后, 驱动运动机构完成仿尺蠖的蠕动运动, 并采用 PID 型广义预测算法控制加热线圈对肠道实施热疗, 控制转台角度可旋转观察肠壁图像。最后, 通过管道实验和动物活体实验, 验证了系统的控制性能。实验结果表明: 射频双向通讯可在 0.6 s 内完成控制命令的发送和诊查数据的接收, 机器人运动步态连续稳定, 视频摄像头可查看肠道前方和侧壁 0~360° 的图像, 对肠道肿瘤实施热疗能在 50 s 内稳定到热疗温度设定值。设计的系统基本满足结肠机器人对肠道实时诊查和热疗的要求。

关键词: 诊疗机器人; 结肠; 射频双向通信; 控制系统

中图分类号: TP242.3; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1296

Control system design of micro diagnosis and treating robot for colonoscopy

CHEN Wen-wen*, YAN Guo-zheng, GAO Peng, WANG Zhi-wu

(School of Electrical and Information Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: wenwenchen@sjtu.edu.cn

Abstract: To realize the non-contact inspection and treatment of human gastro-intestines, a control system with bi-directional Radio Frequency(RF) was designed for a micro robot to heat the cancer of colon. First, the modules of control system and its hardware configuration were established. Then, the software program was completed and the movement control was efficiently implemented according to the timing sequence presented in this paper. Moreover, a driving mechanism was used to simulate the inchworm movement and the generalized predictive control algorithm of PID was introduced into the heat therapy. The control of a micro turning table could provide 0~360° positioning of cameras to show the video of colon tube in rotation. Finally, the system performance was tested as well. Experimental results indicate that the average RF communication time is 0.6 s and the step of the robot movement is continuum and stable. The angle of camera view can be changed from 0° to 360°, and the heat treatment can be stabled in 70 s. The experimental results demonstrate the effectiveness and rea-

收稿日期: 2012-02-10; **修订日期:** 2012-02-22.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z234, No. 2008AA04Z201); 国家自然科学基金资助项目(No. 60875061, No. 31170968, No. 30800235); 载人航天领域预先研究项目(No. 010203); 上海市科委资助项目(No. 09DZ1907400)

sonability of this control system and it satisfies the system requirements of real time inspection and thermal therapy for colons.

Key words: medical micro robot; colon; bi-directional RF communication; control system

1 引言

根据国家卫生部《2006 年中国卫生统计年鉴》报道,人体消化道的恶性肿瘤死亡率已经占据粗死亡率的第一位,因此,消化道诊疗器械极受医疗领域的关注。消化道内窥镜是肠道诊疗的重要器械,但在诊疗过程中易对病人造成创伤,并且操作困难。因此,研究能实现微创/无创并且操作简便的肠道检查及肿瘤热疗一体的微机器人具有重要意义^[1]。现阶段的胃肠道机器人大多针对肠道图像接收、数据采集或胃肠道内运动中 3 个任务某一项进行设计^[2]。例如,H. J. Park 等人设计的胶囊机器人能完成图像发送和数据接收任务^[3];Rasouli 设计的体积为 40 mm×91 mm 的胶囊机器人可转动摄像头^[4];Johannessen 等人设计的片上系统可分别实现温度采集以及 pH 值、压力等参数的测量^[5]。为了实现人体肠道诊疗,必须使机器人机构能够主动运动,现在设计的主动运动机器人形态各异,有仿蚯蚓型^[6-7]、尺蠖型^[8]、多腿式^[9]、划桨式^[10]等等。基于永磁激励、形状记忆合金(SMA)、气动吸盘、微电机设计的执行机构^[6-12]也各有优劣,但是现在都还没有临床应用。

由于胶囊微机器人运动的安全性和有效性还未得到验证,应用于诊断和治疗的主动机器人尚未见报道^[13]。因此,设计能实现主动运动的诊断和热疗一体的微机器人具有重要意义。本文基于结肠诊疗微机器人机构和肿瘤热疗的控制要求,在有限的空间内设计硬件电路并完成软件编程,使机器人在肠道内完成类尺蠖爬行运动,可拍摄 0~360°肠道图像并无线发送,通过射频双向通信完成体内检测数据的接收以及控制命令的实时发送,摄像头可转动检测肠壁,并根据检查结果在肿瘤部位实施热疗。

2 机器人系统结构

结肠诊疗微机器人结构包括 3 部分:前方和

后方的支撑机构、中间的轴向伸缩机构以及固定于头部的肠道诊疗单元。支撑机构可将按 120° 圆周分布的 3 个腿式机构撑开,腿上的气囊压紧肠壁获得钳位力,中间的伸缩机构通过伸长和收缩,带动整个机体前后滑动,3 个运动机构有序动作可以实现类似尺蠖的运动方式。诊疗单元由传感器、摄像头和热疗线圈组成,固定于机器人的头部。2 个摄像头分别位于头部顶端和中间的转台上,分别观察机器人前端和热疗附近的肠壁,并在摄像头后方安装了可以实施热疗的特制线圈,如图 1 所示。

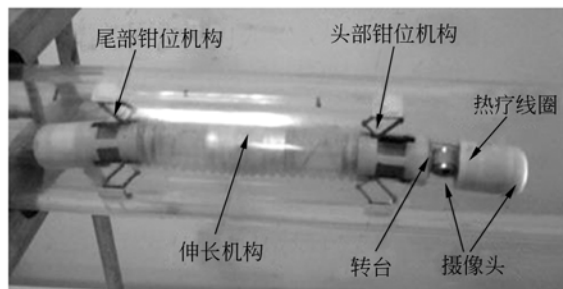


图 1 机器人系统结构图
Fig. 1 Structure of robot system

3 控制系统设计

为了实现肠道诊疗的任务要求,设计了双气囊结肠微机器人的控制系统,其由 3 部分组成:人机交互界面、无线通讯控制系统和微型机器人驱动系统。人机交互界面可以发送控制命令并接收体内信息数据,实时显示体内肠道图像,为操作者提供体内肠道的信息。无线通信系统包括肠道图像接收和无线双向通讯 2 部分:肠道图像以 30 frame/s 的速度实时传输,并压缩和发送到人机界面显示。无线双向通信将控制命令无线发送到机器人体内,并实时接收肠道的测量参数。微机器人驱动系统接收控制命令并发送检测到的数据,以一定时序分别控制伸长机构和支撑机构的动作,控制肠道微机器人内部 2 个摄像头的启停和摄像头转台的转动角度,调节特制加热线圈中的

电流大小实现肠道肿瘤的热疗。结合现有的系统模块^[14-15],重点设计实现体外的无线双向通讯和体内的微型机器人控制系统。

4 控制系统的实现

4.1 硬件系统

根据控制系统功能要求,将控制系统硬件分为 4 部分,包括人机交互上位机、无线通信控制盒、视频接收盒、微型机器人系统。

由于机器人体内空间的限制(体腔内直径 16 mm,体长 81 mm),微机器人系统硬件电路设计为 2 块——微机器人通信板和微机器人控制板,分别位于机器人体内侧面的空腔(体侧空腔空间为 24 mm×14 mm×3.5 mm)和头部截面的空腔(Φ16 mm×3 mm)。图 2 为微机器人硬件组成的模块图,其中虚线为信号流,实线为供能流。

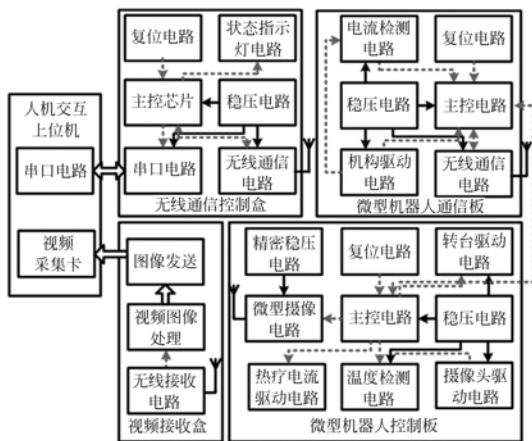


图 2 结肠诊疗机器人组成模块

Fig. 2 Module chart of robot's hardware

微机器人通信板包括控制模块 1(包括主控芯片、稳压电路、复位电路)、无线通信模块(无线通信电路)、步态驱动模块(机构驱动电路、电流检测电路)、电源稳压模块。微机器人控制板带有信号处理与控制模块 2(主控芯片、复位电路)、摄像头转台角度驱动模块(摄像头转台驱动电路)、热疗温度控制模块(温度检测电路、热疗电流驱动电路)和视觉图像模块(精密稳压电路、微型摄像电路)。微机器人通信板和微机器人控制板的信号处理与控制模块之间保持实时串行通信。

无线通信控制盒包括控制模块(主控芯片、状态指示灯电路、复位电路、稳压电路)、数据收发模

块(串口电路)、无线通信模块(无线通信电路)。通过串口接收人机交互上位机发来的控制命令,并将实时接收的机器人状态数据发送到人机界面显示。双向无线数据通信采用与体内无线通信相同的模块,方便程序的移植,缩短开发周期。

另外,视频接收盒(包括无线接收电路和视频图像处理)通过体内微型机器人控制板,控制视频的启停,并可调节接收频段,在上位机或便携式显示器上显示肠道图像。

人机交互上位机带有串口接口电路和视频采集卡,通过串口实时读取无线通信控制盒发送来的机器人参数和肠道信息,视频采集卡采集视频图像信息,并可随时发送控制指令。

主控芯片选用 PIC16f 系列^[16],它具有 QFN20 封装并且功能强,带同步、异步串行口和 SPI 模式,增强了通信的灵活性。无线通信模块选择使用 SI4420^[17],它是全集成的单晶片,能够实现射频半双工通信,仅需要一个晶振和几颗退耦电容,可以工作在无须申请注册的 433、868、915 M 频段。另外,直流电机驱动选择 Aimtron 公司 AT5550 芯片,通过 MAX4173FEUT-T 芯片测试电机电流的大小判断电机的运行状态。使用 AT5556 芯片驱动步进电机带动转台转动,恒流驱动热疗电流及 2 个摄像头。

结肠诊疗微机器人体内硬件电路双面板排布,体外电路单面排布,符合体内外的体积限制,并用于对无线通信信号滤波,电磁屏蔽体内芯片,提高系统的抗干扰能力。设计实现的体内电路板和无线通信控制盒如图 3 所示。

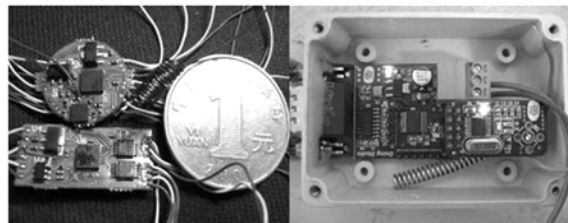


图 3 体内电路板、无线通信控制盒

Fig. 3 Circuit board in robot and wireless communication control box

4.2 软件系统

实现无线双向实时通信、各机构的运动步序控制、热疗温度控制以及摄像头转台旋转和摄像

头启停控制。

4.2.1 无线双向通信

现在设计的无线通信大多是单向通信^[18-19],为了适应控制要求,需要实时发送控制指令并接收机器人测量参数。这里设计了一种半双工双向通信方式,实现了同步数据传输和无线通信控制,分别设计了 TX 缓冲寄存器发送和中断的 FIFO 数据接收模式,通过设计合理的通信时序,实现胶囊机器人的射频双向实时通信。射频通信的两端分别是体外的无线通讯控制盒和微机器人通信板,具体的通信时序如图 4 所示。

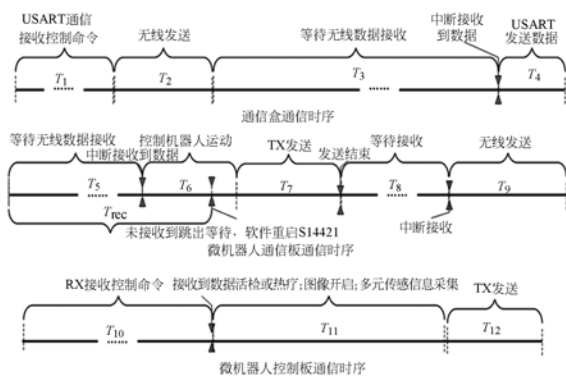


图 4 软件通信时序

Fig4 Schedule of software communication

通信流程如下:

(1)人机界面通过串口将控制命令字符串发送到无线通信控制盒,通信盒接收到控制数据,验证通过后将控制字符串无线发送。体内微机器人通信板中断接收到无线发送来的数据,检验之后用于机器人控制,如果长期接收不到数据,将发送错误码并重新等待接收。

(2)微机器人通信板将接收到的控制命令首先通过主控芯片的异步串行端口将控制命令发送到微机器人控制板,然后控制直流电机转动,使机器人运动一个步态,同时检测电机的电流值,判断机器人当前的运动状态以控制运动步序。

(3)微机器人控制板接收命令控制 2 个视频摄像头,并无线发送图像数据到视频接收盒;按照命令计算摄像头的旋转角度,驱动转台转动角度到给定值,并保存当前转动角。如果要求启动热疗功能,将控制热疗电流,调整肠壁温度到控制的给定值。温度检测值、转台转动角度等信息由 TX 口发送回微机器人通信板。

(4)微机器人通信板把当前的 3 个电机的堵

转电流值、热疗温度、转台角度等参数由无线通信发送到无线通信收发盒,收发盒再通过串口发送回人机界面显示。

设置各个任务的时间节点分别为 t_1, t_2, \dots, t_{12} ,保证通讯实时性的条件包括:

(1)为保护肠道,热疗温度控制不受通信影响,为最高任务优先级;其次,依次定义优先级从高到低为双向通信、机器人运动、摄像头响应、传感信息采集、能量管理。各个任务采用事件响应,减少循环判断,增强实时性,保证通信响应在 1 s 之内。

(2)防止通信出现死循环或停止,必须在通信板设置最长等待时间 t_{rec} ,且满足 $t_{rec} \geq t_9 + t_4 + t_1$,如果超过 t_{rec} 还未收到数据,软件重启无线射频模块;

(3)通信盒是整个体内外通信中转站,保证收发盒在通信中止或误码率过高能及时纠错,当 $t_3 \geq t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9$ 或出现连续校验的误码超过 3 次时,开启软件看门狗重启通信盒。

4.2.2 运动步态控制

接收到控制命令之后,判断所要求的运动状态并执行相应的运动指令。通过 AD 口中中断读入数据,换算为堵转电流,当直流电机堵转时驱动电流升高达到控制命令给定值,电机停转并进入下一个运动状态。经测试,空载时前后支撑机构设定堵转电流为 100~150 mA 较合适(可输出错位力 1.68~5.8 N),伸缩机构设定为 80~120 mA 较合适(可输出伸缩力 2.6~3.9 N),通过发送控制命令调节堵转电流,可控制机构输出力的大小。

表 1 运动步序控制参数

Tab.1 Control parameters of movement step

运动状态	电机状态	堵转电流/mA
自动前进	后支撑机构电机反转	130
	前支撑机构电机正转	140
	伸缩机构电机正转	100
	后支撑机构电机正转	150
	前支撑机构电机反转	100
自动后退	伸缩机构电机反转	80
	与前进电机控制状态顺序相反	
手动控制各机构	各机构电机分别伸缩	80~150

4.2.3 热疗温度控制

电流加热特制线圈,并与肠道内壁相接触实

施热疗。使用热电偶测量温度,从 AD 口读入测量值(0~0x3FFF)对应温度 30~50 °C,并在体温环境的湿度和温度条件下标定热电偶值。限于肠道空间限制,肠道中无附加的冷却设备,设计特制加热线圈的线宽和线距,使加热线圈在机器人人体腔中通过空气散热。采用中断的通信方式,无论是否收到接收命令,温度控制都在进行,保证肠道安全。考虑到人体内温度高,散热环境差,温度控制存在滞后,这里温度控制选用了 PID 型广义预测控制算法。控制参数和温度给定值通过控制命令设定,以适应不同的肠道环境。

4.2.4 转台控制和摄像头启停控制

控制前后摄像头电源启停和步进电机的步序可实现摄像头转动 0~360°观察肠道前方和肠壁的图像,转动角度和转动方向可控。在每个控制周期保存转台的旋转角度到 EEPROM 中,并在上电重启或复位时从 EEPROM 读出当前转台的角度。

5 实验结果

为了验证系统的有效性和可靠性,分别进行管道离体实验和猪活体实验。

将结肠诊疗微机器人放入透明玻璃管道,如图 5 为管道爬行实验现场。通过上位机发送控制命令,机器人的运动步序稳定可控,可自动完成前进后退的运动。测量数据可根据控制命令传回上位机显示。机器人后摄像头转台转动流畅,前后摄像头都可以根据控制命令启停。上位机可选择视频图像分别显示前进方向和热疗线圈周围的肠道壁图像。

为了进一步验证系统的通信效果和热疗功能,进行了活体肠道实验。选用与人体的肠道最相近的猪肠道,将结肠诊疗微机器人塞入经麻醉处理的 60 kg 的母猪肠道中,如图 6。通过人机界面发送控制命令,在实验初期阶段,由于手术现场环境干扰,通信距离太远,超过 15 s 接收不到数据,人机界面显示机器人发送回的错误码,提示发送下一步控制命令。调整通信盒的距离到 2.5 m,无线双向通信正常收发,微机器人的运动步序稳定可控,肠道蠕动视频图像清晰(如图 7,现场手持式视频显示),测量数据在运动完一个步序之后传回人机界面显示。图 8 曲线分别记录了机器

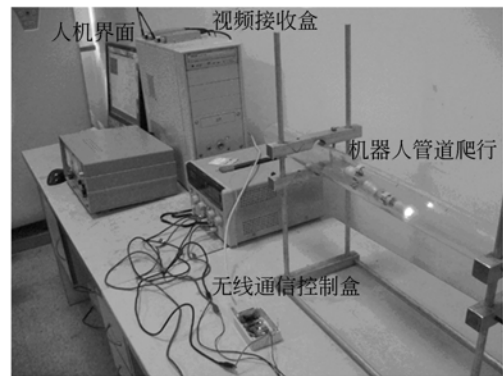


图 5 管道爬行测试现场

Fig. 5 Pipeline crawling experiment

人塞入肠道后,采用 PID 预测控制算法进行热疗的过程中温度的变化(体外肠道温度 21 °C,热疗温度设定值 40 °C)和机器人前进过程中电机电流的变化,热疗温度在 50 s 内稳定到设定值(波动范围 0.1 °C 以内),从以上数据可以分析肠道传感信息和运动过程中各机构的运动状态。



图 6 猪肠道活体实验

Fig. 6 Experiment in vivo



图 7 手持式肠道视频图像观察

Fig. 7 View of intestinal on screen of handset

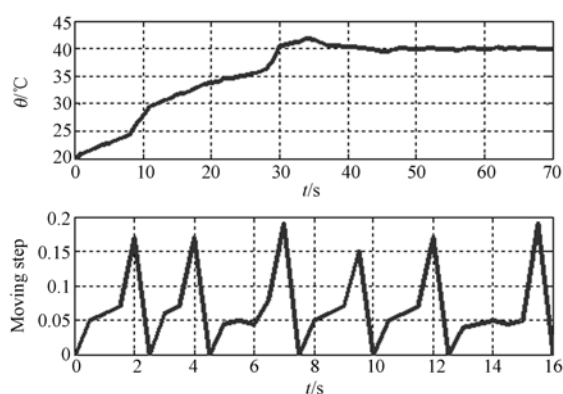


图8 活体实验传感数据

Fig. 8 Sensing data of vivo experiment

机器人收发芯片与通信盒的距离理论上可到20 m,在体外管道实验过程中,隔一堵墙可达到10 m的通信距离,平均通信周期为0.6 s。由于涉及到串口通讯,整个通讯的误码率是2种通信方式的累加。表2统计了管道实验和活体实验

表2 通信误码率比较

Tab. 2 Static result of communication errors in test

实验方式	通信距离/m	平均误码率
体外管道实验	10	1.02%
	7.5	0.81%
	5	0.13%
	2	0.01%
猪活体实验	2.5	5.4%
	2	2.3%
	1	0.65%

参考文献:

- [1] PHAM H, WANG H. Optimal (τ, T) opportunistic maintenance of a Koutn: G system with imperfect PM and partial failure naval research logistics [J]. 2000, 47: 223-239.
- [2] CUMMING D, HAMMOND P, WANG L. Wireless endoscopy: technology and design [J]. *Methods in Molecular Biology*, 2010, 583: 221.
- [3] PARK H J, PARK I Y, LEE J W, et al.. Cho design of miniaturized telemetry module for bidirectional wireless endoscopes [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2003; 1487-1491.
- [4] RASOULI M. Wireless capsule endoscopes for en-

过程中通信距离和误码率。由于实验现场干扰和活体肠道的特殊环境,通信误码率在活体实验时增加,通信加入校验,有误码的情况下没有影响到机构动作的控制,且通信周期满足对机器人操作的实时性要求。

6 结论

本文针对结肠诊疗机器人,设计实现了包括人机界面、肠道诊疗微机器人和无线通信盒的双向无线通信控制系统。结合结肠诊疗机器人的控制任务要求,在有限的空间内实现了结肠诊疗微机器人控制系统,基于半双工双向无线通信,在视频观察的基础上,控制机器人模拟尺蠖的运动步态,并可旋转观察肠道图像,对结肠肠道实施安全的热疗手术。最后,进行了体外管道爬行实验和猪活体实验,通过实验测试了无线双向通信的通信效果和机器人控制情况,实验结果表明无线通信数据传输流畅,通信周期为0.6 s,满足实时诊疗控制的要求;视频图像显示清晰,转台可在 $0 \sim 360^\circ$ 旋转带动摄像头观察肠壁图像;结肠诊疗机器人运动步态连续稳定,可在肠道中完成前进和后退等运动动作;热疗温度控制安全迅速,在50 s内稳定到温度设定值,验证了控制系统的可靠性和有效性。但在手术环境下无线通信距离明显缩短,误码率增加,需要增强系统的抗干扰能力,这将是下一步工作的重点。

hanced diagnostic inspection of gastrointestinal tract [C]. *IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM)*, 2010.

- [5] JOHANNESSEN E A, WANG L, CUI L, et al.. Implementation of multichannel sensors for remote biomedical measurements in a microsystems format [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2004, 51(3): 525-535.
- [6] ZARROUK D. Analysis of earthworm-like robotic locomotion on compliant surfaces [C]. 2010 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010: 1574-1579.
- [7] 迟冬祥, 颜国正. 基于蚯蚓运动原理的微小机器人构件的运动特性 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 160-164.

- CHI D X, YAN G ZH. Motion characteristics of earthworm based miniature robotic components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 160-164. (in Chinese)
- [8] BYUNGKYU K. Inchworm-like microrobot for capsule Endoscope [C]. *IEEE International Conference*, 2004: 458-463.
- [9] VALDASTRI P. A new mechanism for mesoscale legged locomotion in compliant tubular environments [J]. *Robotics, IEEE Transactions*, 2009(25): 1047-1057.
- [10] SUKHO P. Multi-functional capsule endoscope for gastro-intestinal tract [C]. *International Joint Conference*, 2006: 2090-2093.
- [11] YIM S, JEONA D. Capsular microrobot using directional friction spiral [C]. *International Conference*, 2009: 4444-4449.
- [12] KIM Y, KIM D. Novel propelling mechanisms based on frictional interaction for endoscope robot [J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53: 203-211.
- [13] PARK S, PARK J, PARK H, *et al.*. Multi-functional capsule endoscope for gastro-intestinal tract [C]. *BioRob, Korea: SICE-ICASE*, 2006: 2090-2093.
- [14] YAN G. Design of battery-less and real-time telemetry system for gastrointestinal applications [C]. *IEEE International Conference on Control and Automation*, 2007: 245-249.
- [15] 潘国兵, 颜国正. 基于 JPEG 图像的无线胶囊内窥镜的设计 [J]. *高技术通讯*, 2010, 20(1): 89-93.
- PAN G B, YAN G ZH. Design of a JPEG-based wireless capsule endoscope. [J]. *High Technology Letters*, 2010, 20(1): 89-93. (in Chinese)
- [16] http://www.microchip.com/zh_cn/family/8bit/index.html [OL].
- [17] INTEGRATION. IA4420 Universal ISM Band FSK Transceivers [Z]. Rev 1.3, 2006-05.
- [18] INTEGRATION. Wireless Products Software Development Suite (Version 1.3.1) [Z].
- [19] VALDASTRI P, QUAGLIA C. Wireless therapeutic endoscopic capsule: in vivo experiment [J]. *Endoscopy*, 2008, 40(12): 979-982.

作者简介:



陈雯雯(1985—),女,山东淄博人,博士研究生,2007年于中国石油大学获学士学位,2010年于上海交通大学获硕士学位,主要研究方向为微型医疗机器人的设计及控制。E-mail: wenwenchen@sjtu.edu.cn



颜国正(1961—),男,湖南桃江人,教授,1993年于吉林工业大学获得博士学位,1995年于南京航空航天大学博士后出站,主要研究方向为智能机器人、微小机电系统。E-mail: gzyan@sjtu.edu.cn



高鹏(1982—),男,山西太原人,博士研究生,2005年于太原理工大学获得学士学位,2008年于太原理工大学获得硕士学位,主要从事微型机电系统控制理论与方法,精密工程与微型机器人研究等。E-mail: pompon_gp@hotmail.com



王志武(1969—),男,湖北黄冈人,副研究员,2002年于上海交通大学获博士学位,主要从事微机电设计与控制。E-mail: zwwang@sjtu.edu.cn