

肠道诊疗微机器人无线双向通信系统的设计与实现^①

陈雯雯^② 颜国正 高 鹏 高 媛

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘 要 研究了肠道诊疗微机器人的无线双向通信方法,设计并实现了一种包括人机界面、通信盒和肠道微机器人中的无线数据收发模块与视频图像发送模块在内的双向半双工的无线通信系统。该通信系统通过硬件结构和软件流程的结合,实现了体内外无线双向通信、图像无线收发以及肠道内部机器人各控制模块之间的协同通信,可控制机器人机构运动,实时读取肠道参数和观察肠道图像并实施热疗或活检手术。通过猪活体实验,验证了该通信系统的有效性和可靠性。实验结果表明,射频双向通讯可在 0.6s 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,视频图像清晰,可对肠道肿瘤实施安全热疗。

关键词 肠道诊疗,微机器人,无线双向通信,活体实验

0 引言

肠道内窥镜机器人可由口或肛门进入人体检查病灶并实施治疗,相比传统的内窥镜,这种内窥镜创伤小、操作更简单。国内外研究学者设计并研制了多种肠道微型机器人样机^[1-4],并力求采用无拖线的方式,以减少病人的痛苦。现在研究的无线通信技术^[5]主要用于肠道视频图像的传输以及温度、pH 值、压力等参数的无线采集。例如, 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^[6]; Rasouli 设计了体积为 $\phi 40\text{mm} \times 93\text{mm}$ 的胶囊机器人可转动摄像头^[7]; Chi 等人设计的片上系统^[8-10]可分别实现对温度、pH 值、压力等参数的测量。对于可主动运动的肠道微机器人,双向无线通信不仅要完成单向的数据采集或图像传输,还需要传递控制参数,以驱动机体各个机构的动作,根据视频检查结果实施活检、热疗等手术。

限于肠道微机器人运动的安全性和有效性,应用于诊断和治疗的主动机器人还未见报道^[11],因而设计和实现能主动运动的诊断和治疗一体化的微机器人,具有重要实际意义。本研究针对肠道诊疗微机器人的需要,提出了双向无线通信系统的设计方法,设计并实现了一个双向无线通信系统,借助此系

统,机器人可在视频观察的基础上,通过射频通讯控制其运动状态,实时采集肠道内参数,从而使活检或热疗手术得以实施。

1 通信系统方案

肠道内窥镜机器人双向通信系统包括三部分:肠道机器人上的无线数据通信模块和视频图像发送模块;无线通信盒;人机界面。肠道机器人系统的工作原理示意图见图 1。

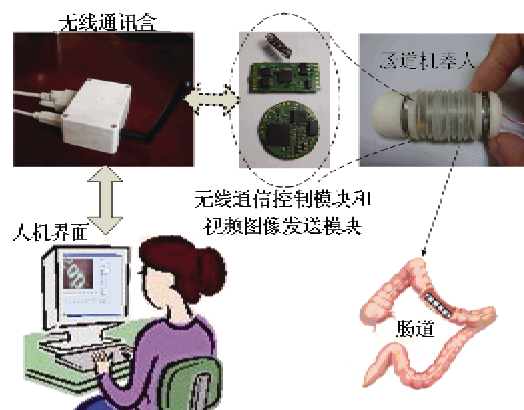


图1 肠道机器人系统工作原理

肠道机器人可以无线接收控制命令并完成以下工作:发送检测到的数据;控制运动机构动作;启停

① 863 计划(2008AA04Z201),国家自然科学基金(60905057)和载人航天领域预先研究(010203)资助项目。

② 女,1985 年生,博士生;研究方向:微型医疗机器人的设计及控制;联系人,E-mail: wenwenchen@sjtu.edu.cn (收稿日期:2011-09-05)

内部摄像头电源,压缩肠道图像数据并射频发送;实时采集温度、压力、pH 等体内参数,经数据处理无线发送。扩展口可驱动电流实施热疗或驱动活检机构的电机。

无线通信盒包括肠道图像接收和无线双向通讯。肠道图像以每秒钟 30 帧的速度实时发送到无线通信盒,然后传输到人机界面显示。无线双向通信在每个控制步序内完成一次数据的收发,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。

医护人员可以通过人机界面观察体内肠道图像,发送控制命令,使运动机构自动完成前进、后退或钳位的运动步态,显示体内肠道信息和机构的运行状态,并保存图像和数据。该机器人系统具有良好的人机交互界面,操作简单直观,并可在实时无线双向通信的基础上将软硬件设计模块化,从而能方便地扩展机器人的应用,并易于查错和替换。

2 通信系统功能结构

系统的功能结构如图 2 所示。各模块之间的数据流用带箭头线表示,虚线为模块间的协同。其中双向通信部分包括:肠道机器人的无线数据通信模块和视频图像模块;通信盒的无线数据通信模块和图像接收模块;人机交互界面 PC 机的数据通讯、图像采集模块。

通讯盒的数据通讯模块接收人机界面发来的控制指令,并由无线通讯模块射频发送;肠道机器人的无线数据通讯模块无线接收到控制指令,控制运动机构、视频开启、活检或热疗的动作,微处理器模块

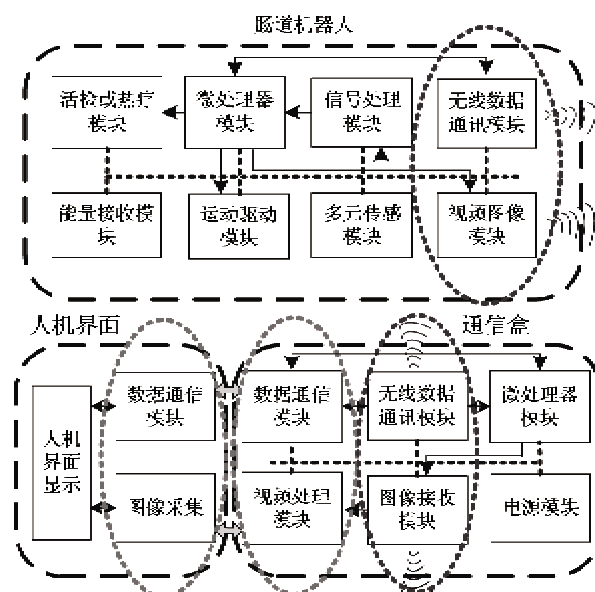


图 2 肠道机器人功能结构图

将多元传感单元获取的肠道信息、微机器人机构的运行状态经无线数据模块发送,视频开启时射频发送图像数据;通讯盒实时接收肠道信息,控制无线通信的收发时序,与肠道微机器人内部数据通信模块相协调,并读取视频图像模块无线接收的视频信息;人机界面可在医务人员的操作下发送控制命令,通过图像采集卡接收肠道图像,显示数据通信模块读取的参数,用于分析病变,实施治疗。

2.1 通信系统硬件构成

通信系统由有线通信和无线通信两部分组成。无线部分包括通讯盒和肠道微机器人之间的射频无线通信和肠道图像的发送和接收,有线部分包括通信盒和人机界面的异步串口通信和视频图像的传输。图 3 所示为通信系统的硬件构成。

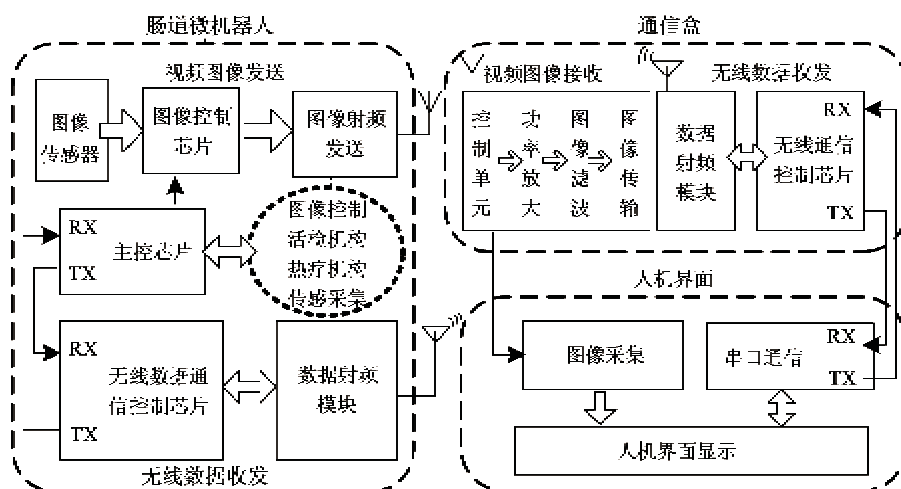


图 3 通信系统的硬件构成

射频无线通信:通讯盒和肠道微机器人之间需要通过射频无线通信实时获取控制命令,并将测量肠道参数、电机状态等信息发回。现在基于射频通讯芯片的应用大都是单向通讯,通过应用层的双向握手来开启一端收一端发的通讯模式^[11,12]。这里结合无线通信控制芯片,设计了一种双向半双工的通讯方式,使用 TX 缓冲寄存器发送和先进先出(FIFO)的中断接收模式,实现了同步数据传输和无线通讯的控制。

肠道图像的发送:使用自带有 JPEG 图像压缩引擎的互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器,当 LED 被点亮一次,图像传感器通过短焦距镜头获得一幅图像,图像数据被压缩成 JPEG 格式后^[13],在图像控制芯片控制下流入发射模块,实现图像的无线发送。在此过程中,主控芯片给出图像控制芯片信号,控制肠道图像发送的启停。

协同通信部分:在通信盒中通过主控芯片的异步串口 TX、RX 可实现与人机交互界面 PC 机的串口通信,在肠道微机器人中也通过主控芯片的异步通信串口实现无线通信、视频发送与机器人控制的相互协同。

通信盒视频图像接收部分:无线接收 JPEG 格式的图像,经功率放大和图像滤波后,由视频传输线传输到图像采集卡,并最终在人机交互界面实时显示肠道图像。

2.2 通信系统软件流程

编写肠道微型机器人、通信盒的控制芯片程序,要求分别实现体内外的射频双向通信,图像无线收发,以及肠道内部机器人各控制模块之间的协同通信、人机界面和通信盒之间数据和图像的传输。软件流程如图 4 所示,通信流程如下:

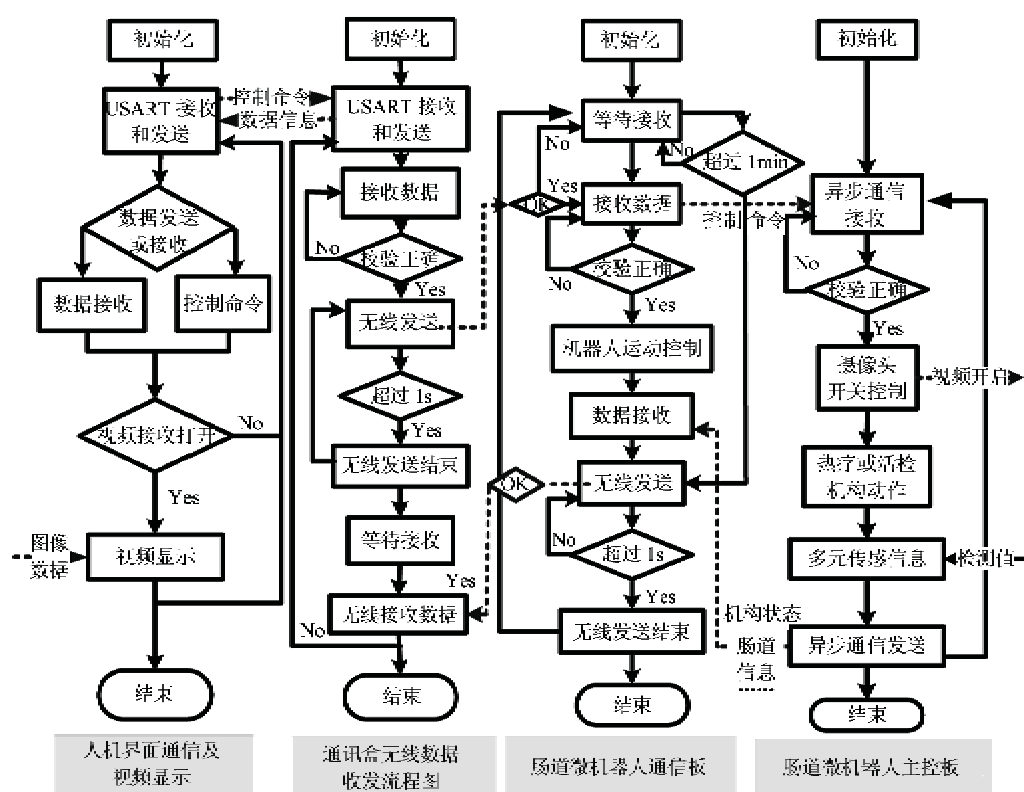


图 4 通信系统软件设计

(1) 人机界面通过串口将控制命令字符串发送到通信盒,通信盒等待至接收到控制数据,验证通过后将控制字符串无线发送。体内微机器人控制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) 肠道微机器人通信板接收到的控制命令,首先控制运动机构的电机转动,使机器人运动一个步距,然后通过主控芯片的异步串行端口将控制命令发送到肠道机器人主控板,并实时接收主控板发送来的机构状态、多元传感信息。

(3) 肠道机器人主控板等待接收到控制字符串

后,经校验如果错误将发送错误码到肠道微机器人通信板,校验无误后控制肠道摄像头的启动;按照命令值,控制热疗温度和活检机构的动作;将传感器获得的检测信息处理,并通过异步串行口发送回通信板。

(4) 肠道微机器人图像发送板接收到摄像头启动命令后,开启 LED 灯,随灯闪烁开始肠道图像的拍摄和压缩,并无线发送。

(5) 通信盒的视频接收板,等待至接收到视频

图像数据,经数据滤波、存储将 JPEG 格式的图像以每秒 30 帧的速度传输到人机界面 PC 机的图像接收卡。

为了保证通讯的实时性,必须合理设计通讯的时序,保证各个任务执行在严格的时间节点前,并定义控制的优先级别,在人体肠道安全的前提下,完成诊疗任务。如图 5 所示,双气囊胶囊机器人软件通讯时序涉及到通信盒的无线数据收发、肠道微机器人通信板、肠道微机器人主控板。

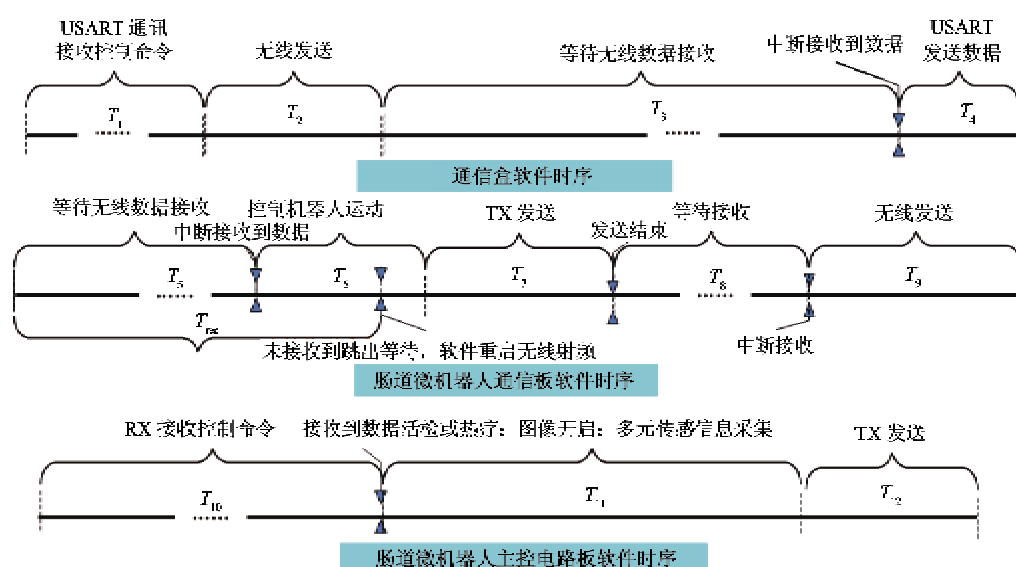


图 5 双气囊胶囊机器人软件通讯时序

设置各个任务的时间节点分别为 $T_1, T_2, \dots, T_{12}$, 通讯正常工作所需要满足的条件包括:

(1) 为保护肠道,热疗温度控制不受通讯影响,为最高优先级;其次是活检机构的伸缩,在活检指令控制下,判断机器人为钳位状态即可执行活检手术;其后,优先级定义依次为双向通信、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。

(2) 为了防止通讯出现死循环或停止,必须在通信板设置最长等待时间 T_{rc} , 且满足 $T_{rc} \geq T_9 + T_4 + T_1$, 如果超过 T_{rc} 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讯中转站,为了保证收发盒在通讯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三次时,开启软件看门狗重启通信盒。

3 实验结果

为了验证通信系统的可行性和有效性,分别进行了微机器人在离体肠道和活体肠道中的实验和测试。机器人实验平台如图 6 所示。

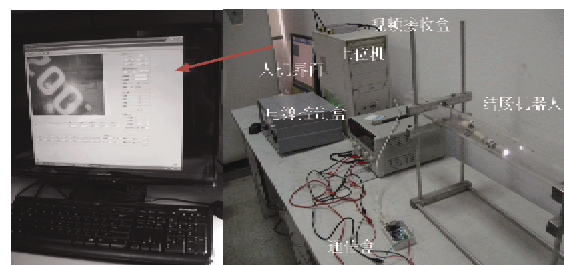


图 6 肠道微机器人实验设备

通过测试机器人的温度检测、热疗、活检以及机器人的运动情况,验证机器人的通信系统平台。在离体的管道或猪肠道中可以实现有效的前进后退等运动步态。机器人收发芯片与通信盒的距离理论上

可到 20m, 这里隔一堵墙可达到 10m 无线通信。

进行活体实验时, 如图 7 所示, 将结肠微机器人塞入经麻醉处理的 60kg 的母猪肠道中。通过人机界面发送控制命令, 在初期实验阶段, 由于手术现场环境干扰, 通信距离太远, 超过 55s 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 2.5m, 无线双向通信正常收发, 可在 0.6s 内完成控制命令的发送和诊查数据的接收。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 8, 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 9 曲线分别记录了机器人塞入肠道



图 7 猪肠道活体实验



图 8 手持式视频观察肠道图像

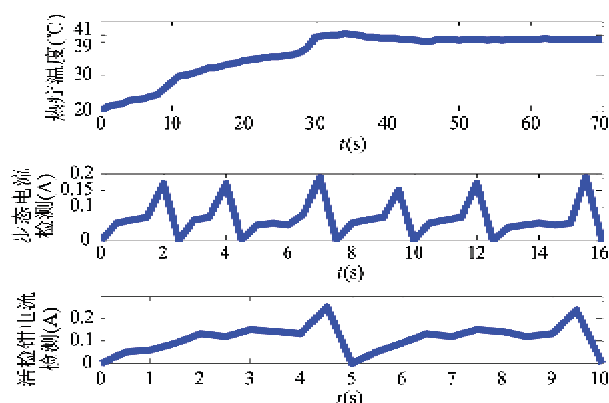


图 9 活体实验传感数据

后, 热疗过程中温度的变化, 机器人前进过程中电机电流的变化, 以及活检钳伸缩过程中电流变化, 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。实验过程中, 通信持续 3 个小时, 误码率为 0.05%, 由于加入校验, 有误码的情况下没有影响到机构的控制。

4 结 论

本研究针对肠道诊疗机器人的任务要求, 设计并实现了一种包括人机界面, 肠道微机器人中的无线数据收发模块、视频图像发送模块和通信盒的双向无线通信系统。该系统的结构实现了模块化, 使之具有很好的可扩展性和可靠性; 其硬件体系的设计, 考虑了肠道诊疗机器人的任务要求; 系统的软件流程和通信时序保证了其双向半双工的通信方式。在视频观察的基础上, 该系统可通过射频双向通信控制机器人的运动状态, 实时采集肠道内参数, 并可实施活检或热疗手术。进行的体外爬行实验和猪活体实验, 验证了此通信系统的可靠性和有效性。

参考文献

- [1] Flynn A M, Udayakumar K R, Barrett D S, et al. Tomorrow's surgery: micromotors and microbots for minimally invasive procedures. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 1998, 7(4): 343-352
- [2] Arbat A, Samitier J, Dieguez A, et al. Architecture of the integrated electronics for a wireless endoscopic capsule with locomotive and sensing and actuating capabilities. In: *Proceedings of the Electronics, Circuits and Systems*, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on, 2008. 510-513
- [3] Simi M, Valdastrì P, Quaglia C, et al. Design, fabrication, and testing of a capsule with hybrid locomotion for gastrointestinal tract exploration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(2): 170-180
- [4] Elisa B, Valdastrì P, Quirini M, et al. Superelastic leg design optimization for an endoscopic capsule with active locomotion. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(1): 015001
- [5] Cumming D R, Hammond P A, Wang L. Wireless endoscopy: technology and design. *Methods in molecular biology* (Clifton, NJ), 2010, 583: 221
- [6] Park H, Nam H, Song B, et al. Design of miniaturized telemetry module for bi-directional wireless endoscopy. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Com-*

- munications and Computer Sciences*, 2003, 6: 1487-1491
- [7] Rasouli M, Kencana A P, Huynh V A, et al. Wireless capsule endoscopes for enhanced diagnostic inspection of gastrointestinal tract[C]. In: Proceedings of 2010 IEEE Conference on the Robotics Automation and Mechatronics (RAM), Singapore, 2010. 68-71
- [8] Chi B Y, Yao J K, Han S G, et al. Low power high data rate wireless endoscopy transceiver. *Microelectronics Journal*, 38(10-11): 1070-1081
- [9] Yuce M R, Dissanayake T, Keong H C. Wireless telemetry for electronic pill technology. In: Proceedings of the Sensors, 2009 IEEE, 2009. 1433-1438
- [10] Wei Wang. A study on RF based wireless capsule endoscope. In: Proceedings of the Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on, 2006. 1663-1667
- [11] Park S, Park J, Park H, et al. Multi-functional capsule endoscope for gastro-intestinal tract. In: Proceedings of the SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference, 2006. 2090-2093
- [12] 潘园园, 颜国正, 黄标. 基于 LA4420 微型双向射频通信系统. 测控技术, 2006, (05): 81-83 + 87
- [13] 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): 5

Design and implementation of a bi-directional wireless communication system for a micro robot' s intestinal diagnosis and treatment

Chen Wenwen, Yan Guozheng, Gao Peng, Gao Yuan

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

Abstract

The bi-directional wireless communication in a micro robot system for intestinal diagnosis and treatment was studied, and a bi-directional wireless communication system for micro robots' intestinal diagnosis and treatment was designed and implemented. The system included a human-machine interface (HMI), a communication box, and the devices for data' wireless communication and video signal transmission in a micro robot. The hardware and the software of thd system were rationally designed to realize the control of a micro robot, get the parameters and pictures of intestinal, even perform a surgery, providing wireless communication between robot and extracorporeal. The vivo experiment was conducted to show that the whole system can work properly in the clinic diagnosis and treatment. The experimental results indicated that the average RF communication time was 0.6s, and the step of the robot movement is continuous and steady, besides the heat treatment can be operated safely.

Key words: intestinal diagnosis and treatment, micro robot, bi-directional wireless communication, vivo experiment