

基于AVR单片机的医用X线机限束器控制系统研制

黄清明^{1,2,3,4}, 李文奎², 张建青², 潘金鹏², 于学强², 吴泽峻²

1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院医学影像学院, 上海 201318; 3. 上海理工大学医学影像工程研究所, 上海 200093; 4. 华东师范大学无线电物理系, 上海 200062

【摘要】目的:研制基于AVR单片机的医用X线机限束器控制系统,满足针对医用X线机限束器控制精度、远距离调节和人性化操作等方面的要求。**方法:**系统采用微机控制方式,组成包括控制软件、通讯电路、机械传动3部分。以Visual Basic语言编写系统控制软件;采用AVR单片机实现系统上、下位机串口通讯;Solid Works设计传动结构并制作实物。建立实验平台后,测试控制系统各项功能和参数。**结果:**在视频摄像系统监视模拟光投射在患者检查部位的视野范围,各项指标均满足临床检查要求。**结论:**本控制系统可供临床实际应用或作为教学仪器。

【关键词】AVR单片机;医用X线机限束器;照射野;Visual Basic;Solid Works

【中图分类号】R318.6;TH774

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)08-0932-07

Development of AVR single chip microcontroller-based control system for medical X-ray collimator

HUANG Qingming^{1,2,3,4}, LI Wenkui², ZHANG Jianqing², PAN Jinpeng², YU Xueqiang², WU Zejun²

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Medical Imaging, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China; 3. Medical Imaging Engineering Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093 China; 4. Department of Radio Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: Objective To develop a medical X-ray collimator control system based on AVR single chip microcontroller which meets the requirements for medical X-ray collimator control precision, long distance control and humanized operation. **Methods** The developed system adopting microcomputer control mode consisted of control software, communication circuit and mechanical driving. Visual Basic language was used to compile the system control software; AVR single chip microcontroller was used for carrying on the serial communication between upper computer and lower computer; and Solid Works software was applied to design the mechanical transmission structure and make objects. After the experimental platform was established, the functions and parameters of the proposed control system were tested. **Results** The examination parts where the analog light was projected on were monitored using camera system. All indexes of the proposed system met the requirements of clinical examination. **Conclusion** The control system can be used for clinical practical application or as a teaching instrument.

Keywords: AVR single chip microcontroller; medical X-ray collimator; field of view; Visual Basic; Solid Works

前言

限束器是医用X射线诊断类机器必不可少的部

分,安装在球管X射线的出射口(即球管管套窗口)处,用于把X射线照射视野限制在所需范围内,遮挡散射线以减少X射线对患者伤害的装置,又称束光器。常用于以下情况:(1)在X射线治疗机中,对病变细胞照射治疗时,用于遮挡X射线,保护正常细胞不受射线的伤害;(2)在透视和摄影检查时,对非检查部位进行保护。以上两种情况下,都是通过限束器控制来调节X射线照射野(Field Of View, FOV)的大小、形状和质量^[1-2]。限束器控制FOV模型如图1所示,焦点与铅板间的距离为 A ,焦点与成像面间的距离,即源像距为 B ,遮线铅板的可调范围(横向或纵向

【收稿日期】2018-03-14

【基金项目】国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2013YQ170463);上海市教育委员会2017年上海职业院校骨干教师中德合作培训项目;上海高校教师专业发展工程青年骨干教师国内访问学者项目;上海健康医学院种子基金项目;上海健康医学院创新性实验项目

【作者简介】黄清明,博士研究生,讲师,研究方向:生物医学工程(医学影像工程),E-mail: qmhuang-paper@163.com

长度)为 a , 射线经过遮线铅板的控制后, 在成像面上投照范围(FOV)为 b 。这样就形成了两个相似三角形, 根据相似三角形的比例关系, 满足: $\frac{A}{B} = \frac{a}{b}$, 当 A 和 B 固定不变时, 调整 a 的数值即可以成比例地改变 b 。限束器的工作原理就是通过控制遮线铅板开合来改变 a 的数值, 从而改变 FOV b 的大小。由于 X 射线是不可见光, 不能直观地反应患者受照射部位 X 射线投照范围的大小, 必须使用可见光模拟体现 X 射线的 FOV。光源(可见光)模拟 X 射线(不可见光)FOV 原理是根据镜面反射的原理, 将反光镜放置在模拟光源与焦点的角平分线上(图 2)。这样模拟光源照射出的可见光, 经过反光镜反射后形成的照射视野, 就是焦点发射 X 射线的 FOV^[3-5]。

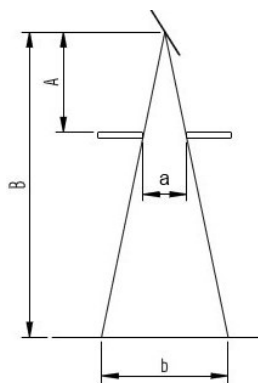


图1 焦点、铅板与照射野的关系

Fig.1 Relationship among focus, lead and radiation field

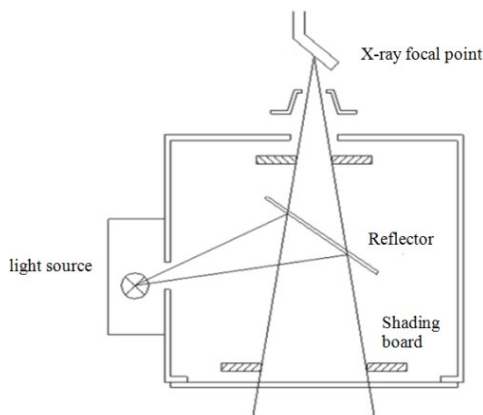


图2 可见光模拟 X 线光照射野原理

Fig.2 Principle of simulating X-ray irradiation field with visible light

1 X 线机限束器控制系统总体方案

传统医用 X 线机限束器的不足之处有:(1)不能实时监控受检部位的情况。患者在检查过程中, 某些检查体位不易长时间保持, 而医生摆位后回控制

室进行曝光操作, 并未直观地察觉检查体位位置的变化, 导致拍摄的影像有伪影或非最佳体位摄影, 造成临床医生对病灶的判断困难^[6]。(2)手动调整束光器来改变 FOV 大小的精度不高。医生在诊视床旁手动旋转调整束光器旋钮改变 FOV 时, 力的大小不均匀, 会造成旋转时机械误差增加, 导致 FOV 精确度不高。(3)远程控制调整 FOV 的误差较大。通过操控手柄远程调整 FOV, 不能实时观察 FOV 的大小, X 射线的投照误差较大, 对患者正常组织造成不必要的辐射, 同时降低医生工作效率和延长机器成本回收期^[7-9]。

基于以上原因, 为了实现医用 X 线机限束器精确控制, 满足医生远距离隔室操作, 提高工作效率, 本设计将采用基于 AVR 单片机的计算机多功能远程控制方式, 系统由控制软件、通讯电路、机械传动这三部分组成。图 3 为 X 线机限束器控制系统总体方案。使用 Visual Basic 语言编写控制软件; 通过 Mscomm 控件控制指令发送的短暂或连续; timer 控件控制发送指令频率, 使用 API 函数: cap Create Capture Window 创建和显示视频窗口。点击界面按钮, 按钮对应的相应指令通过 RS232 串口传送给单片机, 单片机收到指令后进行相应处理, 控制限束器的纵向及横向直流电动机正、反转。通过直流电动机与遮线铅板上的扇型齿轮啮合来控制两组遮线铅板的运动方向, 改变 FOV 的大小, 即控制 X 射线出口的大小。在限束器射线出口处的外壳上安装视频摄像头, 视频摄像头的摄影位置对准 FOV, 通过摄像头对模拟光形成的模拟 FOV 进行监视, 监视画面在控制软件的视频窗口实时显示。放射技师摆好患者体位后, 回控制室操作时可以从控制软件界面根据监视画面实时监控并调整 FOV^[10-12]。

2 X 线机限束器控制系统电路设计

图 4 为 X 线机限束器控制系统结构框架。系统电路基于 RS-232 接口标准, 使用 DB-9 连接器, 采用 AVR 单片机的通用同步/异步串行接收/发射器 USART(Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter)进行串口通信电路系统的设计。基于 PC 机与单片机的串口通信系统主要包括: 单片机、串口通信电路、PC 机串口通信软件和单片机外围电路等。其中, 单片机是电路的核心, 负责接收上位机指令, 并控制电路的工作状态; 串口通信电路是连接下位机与 PC 机的桥梁; PC 机串口通信软件用于向下位机发送控制命令, 并接收下位机数据, 进而测试系统的性能; 外围电路包括光电开关、电源电路、模拟灯开关、电

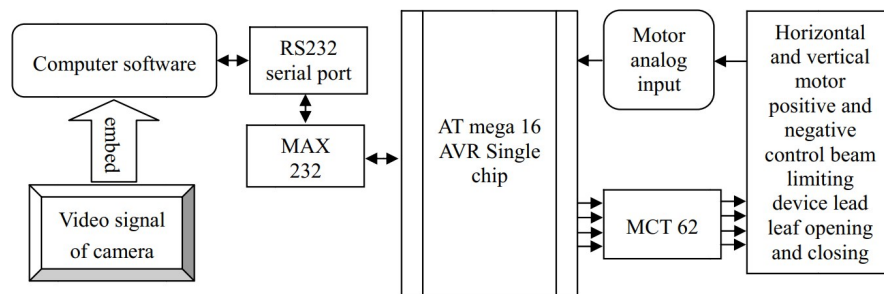


图3 X线机限束器控制系统总体方案

Fig.3 Overall scheme of X-ray collimator control system

子开关等组成的电路。绘制电路原理图和PCB板图,完成电路芯片形状、引脚、封装等设计,加工制

作电路PCB板,实现电路的各项功能,以达到远程控制的目的^[13]。

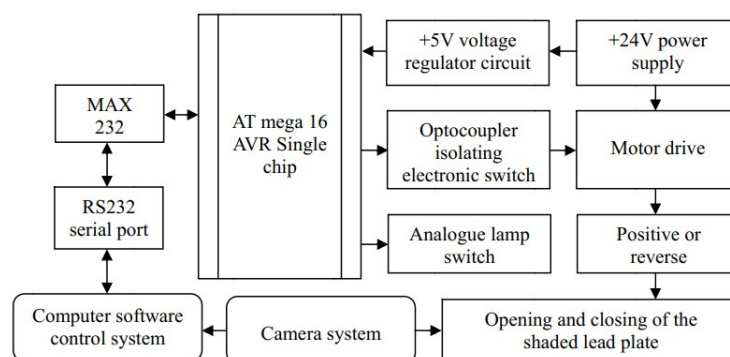


图4 X线机限束器控制系统结构框架

Fig.4 Frame structure of X-ray collimator control system

由于电机的工作电压为 $\pm 24\text{ V}$,为避免单片机直接驱动电机,产生较大的灌电流,损坏单片机,采用单片机控制MCT62的通断来控制电机的工作,以确保单片机安全工作。MCT62是光电耦合开关。当内部二极管导通时,二极管有电压降产生光耦,对应的三极管导通(三极管集电极须接保护电阻 R_L);内部二极管截止时,对应的三极管也截止。使用光耦控制三极管的导通截止,避免开关直接接触,起到隔离保护和开关作用。图5为单片机与MCT62连接电路^[14]。

根据X线机限束器控制系统电路设计的功能要求和电路结构,编写单片机程序代码,实现X线机限束器的控制功能。单片机部分程序代码如下:

```
void Exncircuit(void)
{
    if(RDATA==0x00) //如接收到0x00
    {
        PORTB|=BIT(0); //横向电机正转
    }
    if(RDATA==0x01) //如接收到0x01
```

```
{
    PORTB|=BIT(1); //横向电机反转
}
if(RDATA==0x10) //如接收到0x10
{
    PORTB|=BIT(2); //纵向电机正转
}
if(RDATA==0x11) //如接收到0x11
{
    PORTB|=BIT(3); //纵向电机反转
}
PORTD|=BIT(6); //打开灯开关
if(RDATA==0xFF) //如接收到0xFF
{
    PORTD&=~BIT(6); //关闭灯开关
}
Delayms(100);
PORTB&=0x00; //PB口置低位
RFLAG=0; //标志位清零
}
```

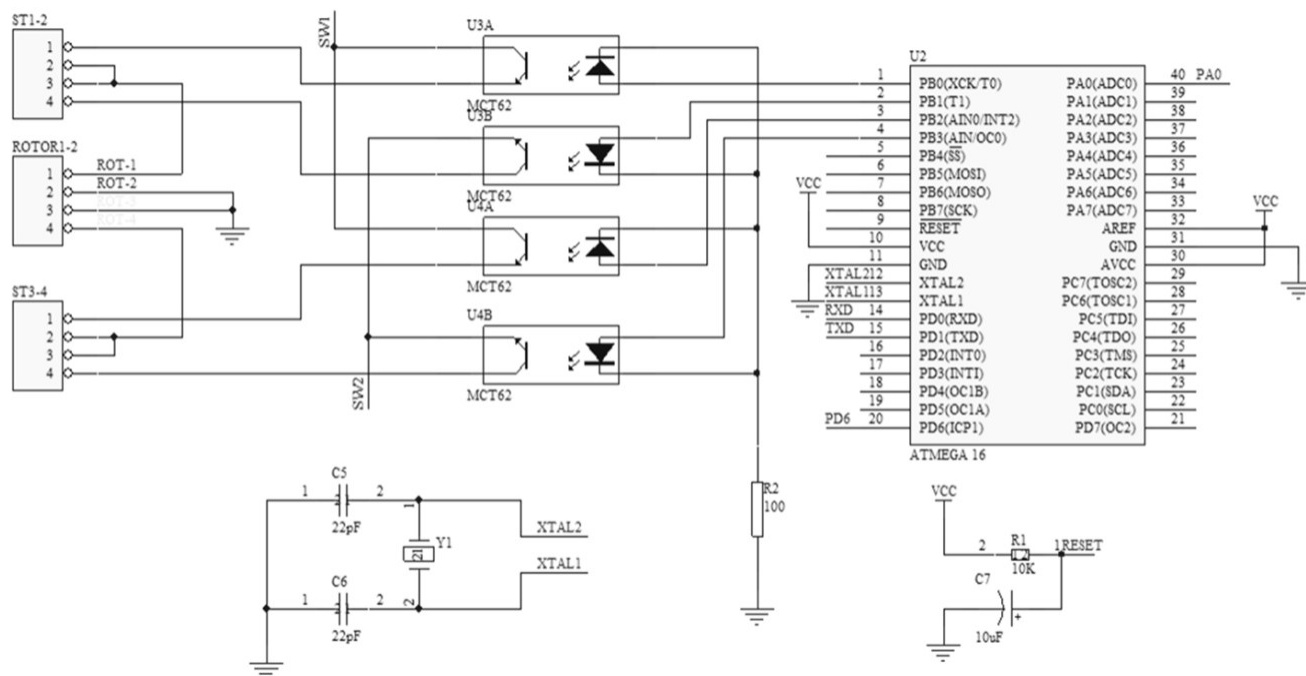


图5 单片机与MCT62连接电路

Fig.5 Connecting circuit between AVR single chip microcontroller and MCT62

```

void main(void)
{
    DDRB|=BIT(0); //配置横向电机正转输出口
    DDRB|=BIT(1); //配置横向电机反转输出口
    DDRB|=BIT(2); //配置纵向电机正转输出口
    DDRB|=BIT(3); //配置纵向电机反转输出口
    DDRD|=BIT(6); //配置灯开关输出口
    PORTD&=~BIT(6); //灯开关输出低电平
    PORTB=0x00;
    Init_kb();           //中断打开
    Uart_init(19200);    //波特率 19200
    while(1)
    {
        if(RFLAG)
            Exncircuit();
    }
}

```

3 X线机限束器控制系统软件设计

依据以上设计的串口通信电路系统和串口通信测试软件,搭建系统测试实验平台。串口调试助手可以实现发送接收16进制数、字符串、传输文件、搜索出空闲串口等功能。如图6所示,可使用串口调试助手设置串口参数,向下位机发送控制命令。使用Visual Basic语言编写操作软件,软件界面如图7所示。4个按钮分别控制FOV的长、短、宽、窄,其指令

分别对应横向电机的正、反转,纵向电机的正、反转,按钮中间区域显示当前FOV的大小。摄影监视系统安装在限束器下部窗口边缘,右边视频窗口显示摄像系统传回的视频信号,监测模拟光投射到患者检查部位的覆盖范围,以便医生在远程隔室对所需FOV进行实时调节。

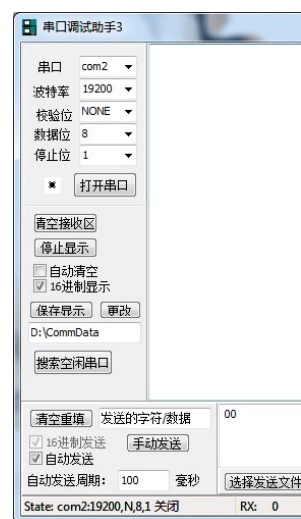


图6 串口通信调试

Fig.6 Serial communication debugging

程序设计思路为:运用点击Command控件,通过MS Comm控件发送信号,设定Mouse Up和Mouse Down事件发送信号可以通过点击Ms Comm控件的长短来控制发送短暂或长时间连续的信号。



图7 X线机限束器控制系统软件界面
Fig.7 Software interface of X-ray collimator control system

当 Mouse Down 事件发生时产生一条指令,程序把对应指令发送给单片机;当 Mouse Up 事件发生时结束指令的发送。发送指令频率由程序中的 timer 控件控制, timer 控件随着 Mouse Down 和 Mouse Up 事件而启动和停止, timer 控件控制信号时间能精确到 ms, 因此能准确控制 FOV 范围。MS Comm 控件还用于接收单片机的反馈信号, 限束器开合状态通过电位器测量后, 经单片机转换成数字信号传回计算机。由 MS Comm 控件接收, 对接收的数据进行相应处理, 使其对应某一确定整数值并在软件界面上实时显示。X 线机限束器控制系统软件设计部分程序如下^[15-17]:

```
Private Sub Command1_MouseDown(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
    but1 = Button
    Timer1.Enabled = True
End Sub
```

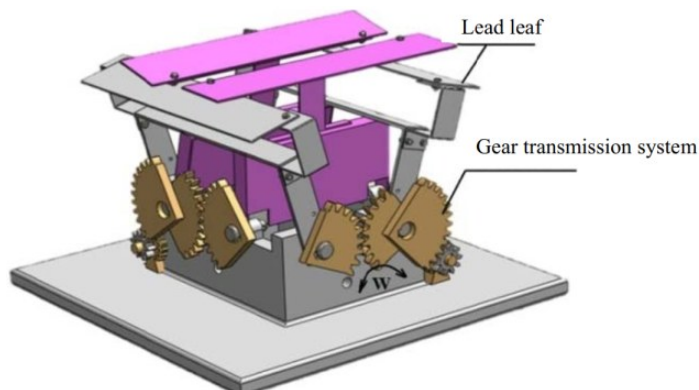


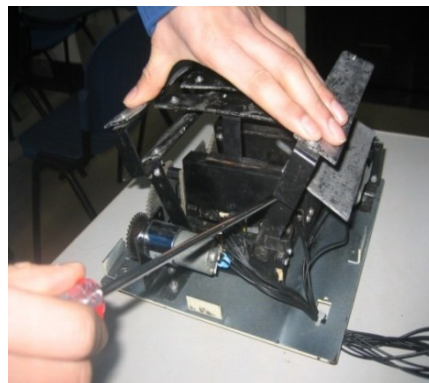
图8 X线机限束器控制系统机械结构
Fig.8 Mechanical structure of X-ray collimator control system

```
Private Sub Command1_MouseUp(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
    Timer1.Enabled = False
End Sub
```

4 X线机限束器控制系统机械结构

单片机与计算机软件按照通讯协议实施数据交换。通过计算机软件控制单片机 PB₀、PB₁、PB₂、PB₃ 端口的高低电平。4 个端口常态处于低电平, 工作时, 依据指令对应的端口置为高电平, 单片机接收到指令进行相应处理后, 控制限束器的纵向及横向直流电机正、反转, 电机分别带动齿轮传动系统, 齿轮旋转带动纵、横向两组遮线铅叶运动, 从而分别控制两组遮线铅叶的开合, 即改变射线出射窗口的大小, 达到控制射线 FOV 的目的^[18]。

图 8 为 X 线机限束器控制系统机械结构。限束器的铅叶在齿轮传动系统的作用下可以对称地同时打开或闭合, 以控制 X 射线射束的大小。限束器铅叶的开合范围相对较小, 则只需较小的旋转角就能满足控制要求, 所以限束器的驱动电机也采用普通永磁式直流电动机, 体积小, 结构简单, 无需励磁电源。永磁式直流电动机型号 JQ24-125G840, 并配备 ZGA25RP216 的直流 24 V, 变速比 rpm 为 20 的齿轮变速箱。采用同步齿型带传动方式, 以减少电机振动对光电编码器输出信号的影响, 保证光电编码器计算的精确度。限束器内装有一只 100 W 卤钨灯泡, 通过反光镜反射出限束器来模拟 X 射线的投照范围, 反光镜角度可以由位于限束器侧面的机械结构调节, 同时必须保证在振动冲击条件下不发生角度偏转^[19]。



5 X线机限束器控制系统测试分析

建立X线机限束器控制系统测试平台,对串口通信进行测试。串口调试助手的参数设置为:波特率19 200,数据位8,停止位1。使用16进制发送串口数据,串口为计算机COM口,在串口调试助手的发送窗口输入00/01/10/11等控制指令并发送,下位机开始工作,上位机周期性发送数据给下位机,单片机也周期性接收来自下位机的数据。测试表明系统工作稳定,即PC机与单片机之间能够进行正常的串口通信。

对X线机限束器控制软件进行测试,控制软件界面的4个按钮分别控制FOV的窄、宽、长、短。点击4个按钮给单片机发送不同指令。如:点击“narrow”,则通过串口发送“0x00”给单片机,单片机接收到此信号后,控制纵向电机的正转。其余3种情况分别控制纵向电机的反转、横向电机的正转和横向电机的反转等,从而达到控制X射线FOV的目的。系统电路在控制软件发出的控制指令下正常工作,能够对系统进行有效控制^[20-21]。

采用光野/FOV一致性检测板、准直筒等检测工具对X射线机的模拟灯光野与X射线FOV的误差进行测试。图9为模拟灯光野与X射线FOV的偏差示意图。实验数据分析表明, $|a_1| + |a_2| = 0.019\ 2S \leq 0.02S$, $|b_1| + |b_2| = 0.018\ 7S \leq 0.02S$, 模拟灯光野与FOV相应边之间的偏差之和不超过X射线管焦点到灯光野垂直距离(S)的2%,符合《医用X射线治疗卫生防护标准》。

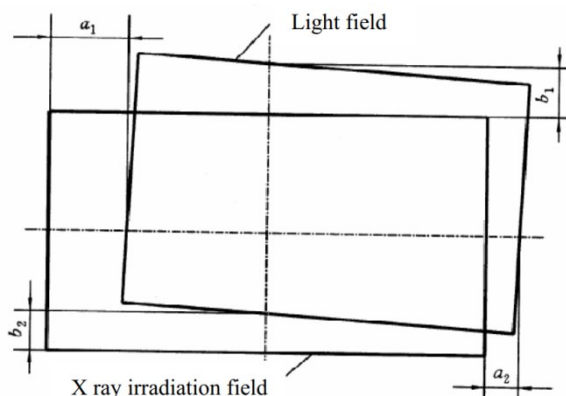


图9 模拟光野与X射线照射野的偏差示意图

Fig.9 Deviation of simulated light field and X-ray irradiation field

6 结论

实验结果表明,通过视频摄像系统监视模拟光投射在患者检查部位的视野范围,实现了限束器控制的数字化,提高了控制精度,方便了远距离操作,

简化了医生的操作步骤,提高了工作效率。电路结构简单、成本低。后期通过优化改进设计有望实现语音控制、X线机摄影片规精确定位、自动识别源像距以及人机交换智能控制等功能。

基于AVR单片机的医用X线机限束器控制系统由控制软件、通讯电路、机械传动这3部分组成。以Visual Basic语言编写系统控制软件,在软件界面上实时显示限束器开合尺寸的大小数值,视频窗口显示摄像系统传回的视频信号,监测模拟光投射到患者检查部位的覆盖范围;采用AVR单片机实现PC机与下位机之间的串口通讯,RS-232串口接收PC机发送的指令,以控制相应的外围电路;采用Solid Works设计传动结构和Protel 99SE软件绘制电路原理图,制作限束器机械结构和PCB电路实物,建立X线机限束器控制系统实验测试平台。针对医用X线机限束器控制系统PC机与单片机之间的串口通信、X线机限束器控制软件和模拟灯光野与X射线FOV的误差等项目进行测试分析,均符合X线机限束器功能要求和临床检查要求。基于AVR单片机的医用X线机限束器控制系统可进行量产,应用于临床中或作为教学仪器。

【参考文献】

- [1] AKAISHI T. Automation system of X-ray filter in digital subtraction angiography[J]. Comput Meth Prog Biomed, 1998, 57(1/2): 111-114.
- [2] 秦维昌. 医学影像设备学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2006: 10-58.
- [3] QIN W C. Medical imaging equipment[M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2006: 10-58.
- [4] 成洪. 医用X光机限束器子系统的设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [5] CHENG H. Design and study of a medical X ray machine beam limiting device[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [6] 王艳, 聂生东. 基于卓越计划的X线机实验的设计[J]. 中国医学物理杂志, 2017, 34(3): 256-258, 271.
- [7] WANG Y, NIE S D. Design of experimental teaching model of X-ray machine based on excellence program[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(3): 256-258, 271.
- [8] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 12-46.
- [9] WANG X M. Single chip microcomputer control of motor[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics University Press, 2011: 12-46.
- [10] 靳峰. X射线诊断设备运动控制系统设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [11] JIN F. The design and implementation of X-ray system with motion controller[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [12] LIANG X M, LI S C, HASSAN A B. A novel PID controller tuning method based on optimization technique[J]. Journal of Central South University, 2010, 17(5): 1036-1042.
- [13] 崔少飞. 齿科全景体层X线机数字化升级系统[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [14] CUI S F. Digital upgrades system of dental panoramic tomography X-

- ray unit[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [9] WEN S T, JIANG S H, WANG S L. Gray scale potential: a new feature for sparse image[J]. Neurocomputing, 2013, 116(10): 112-121.
- [10] FLORES J S. An analytical depletion mode MOSFET model for analysis of CCD output characteristics[C]. Proceedings of SPIE, 1992, 1656: 466-475.
- [11] 刘东华, 于勉. 口腔全景X射线摄影[J]. 现代物理知识, 2013, 18(6): 44-45.
- LIU D H, YU M. Oral panorama X radiography[J]. Modern Physics, 2013, 18(6): 44-45.
- [12] 张倩. 基于TDI-CCD齿科全景数字化成像系统的硬件设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- ZHANG Q. Hardware design of a dental panoramic digital radiography system based on TDI-CCD [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [13] 吕春丽. 基于DSP的数字化X线机电机驱动器的设计[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- LÜ C L. Design of digital X-ray machine motor driver based on DSP [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [14] PATNAIK S K. Artificial neural network based proportional plus integral plus derivative controller for a brushless DC position control system[J]. J Vib Control, 2012, 18(14): 2164-2175.
- [15] BAKER D R, MANCINI L. An introduction to the application of X-ray micro tomography to the three-dimensional study of igneous rocks [J]. Lithos, 2012, 148(9): 262-276.
- [16] 游继安. 基于STM32的乳腺X线机控制系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- YOU J A. Design for control system of mammography based on STM32[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2014.
- [17] 陈文光, 饶益花. 基于高频逆变技术的X光机研究与设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(13): 116-122.
- CHEN W G, RAO Y H. Research and design on X-ray machine based on technology of high-frequency inverter[J]. Modern Electronics Technology, 2009, 32(13): 116-122.
- [18] 林宇宁. X线曝光参数的最优化及其与图像质量和放射剂量之间的相关性研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2007.
- LIN Y N. A study on optimization of X-ray exposure parameters (kVp and mAs) and relationship between exposure parameters, image quality and radiation dose [D]. Xi'an: the Fourth Military Medical University, 2007.
- [19] 常江, 胡丹. 串行通讯中的波特率设置和误差分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2004, 23(2): 22-24.
- CHANG J, HU D. Baud rate setting and its error analysis in serial communication [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2004, 23(2): 22-24.
- [20] 张博. 医用X线机高压发生器控制系统的设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- ZHANG B. Design and implementation of control system for high voltage generator of medical X-ray machine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [21] LI F, WANG S B, HOU W, et al. Design and research on high voltage power supply of medical X-ray machine [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2016: 943-947.

(编辑:谭斯允)