DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.07.022

基于 STM32 的脊柱手术钻孔辅助装置控制系统*

李翔昱,汤 卿*,徐邦杰,姚 进

(四川大学 机械工程学院,四川 成都 610065)

摘要:针对椎弓根内固定手术中实施钻孔时操作强度大、风险高的问题,对已经设计完成的钻孔辅助装置机械系统进行了配套的电路及控制系统的设计。对椎弓根内固定术钻孔操作中存在的困难进行了分析,给出了钻孔辅助装置配套控制系统的设计方案;基于 STM32 微控制器设计了可以进行拖动状态、微调状态和锁紧状态快速切换的钻孔机械臂关节阻尼控制系统;设计了钻孔自动进给控制系统,以及钻孔操作配套的状态辅助显示系统;完成了试验样机的制作,并且进行了测试试验。研究结果表明:该装置设计合理,能够满足拟定的设计要求,为医生实施手术钻孔提供便利和判断依据,减轻医生钻孔实施过程中的劳动强度,并且能够帮助解决脊柱手术由于钻孔时可能存在的生理颤振给手术带来的风险问题。

文章编号:1001-4551(2020)07-0851-05

Control system of drilling assistant device for spinal surgery based on STM32

LI Xiang-yu, TANG Qing, XU Bang-jie, YAO Jin

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the problem of high intensity and high risk of drilling for pedicle fixation, the circuit and control system of drilling auxiliary device was designed. Difficulties that exist in the drilling operation of pedicle internal fixation were analyzed, the design scheme of the control system were given. Based on the STM32 microcontroller, a joint damping control system for drill manipulator was designed, which could quickly switch between drag state, fine adjustment state and lock state. The automatic feed control system for drilling and the auxiliary display system for drilling operation were designed. The prototype was manufactured and tested. The results show that the design of the device is reasonable and can meet the proposed design requirements. It can provide convenience and judgment basis for doctors to carry out surgical drilling, reduce labor intensity during the process of drilling, and help solve the risk of spinal surgery caused by the possible physiological flutter during drilling.

Key words: spinal drilling operation; microcontroller; magnetic clutch; damping control

0 引 言

椎弓根钉内固定术作为脊柱手术中稳定性重建的 重要手段,其基本原理是将骨钉经由椎弓根植入椎体 中,并利用骨钉及支撑杆对脊柱进行固定和支撑。由 于脊椎周围遍布重要的神经、血管及脏器,植入骨钉前 的钉道准备过程具有高风险。钉道的方向稍有偏差或 穿出椎体都可能造成造成病人相应的功能失调乃至永 久的残疾^[1-2]。

医生术前能够根据医学成像准确地确定钻孔的位 置和深度。术中,脊柱手术主要依靠医师手持电钻进 行钻孔。医生在钻孔时首先要依据影像目测钻孔的位 置和方向,然后手持电钻定位后一边钻孔一边观察钻 孔的情况。在这个过程中很难保证正确的电钻钻孔位

收稿日期:2019-11-08

基金项目:四川省重点研发项目(重大科技专项)(2017SZ0096)

作者简介:李翔昱(1994-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事医疗设备机电一体化方面的研究。E-mail:lxy_9868@163.com

通信联系人:汤卿,男,副教授,硕士生导师。E-mail:tangqing_scu@163.com

置和方向,同时长时间的手术操作所带来的疲劳也增加了误操作的可能性^[34]。

目前,脊柱骨折最好的治疗手段是进行椎弓根内 固定术,椎弓根钉是否能够准确植入是脊柱手术成功 与否的关键。文献报道:术后 CT 查实,传统脊柱手术 椎弓根穿破率高达21%~31%,对脊椎、神经根、大血 管等造成严重威胁^[5-7]。

针对这一问题,本文将研发一款脊柱手术钻孔辅助装置,就控制系统提出设计方案,并完成相应实验平台的试制和初步实验^[8-11]。

1 装置整体设计

1.1 装置整体功能

在脊柱钻孔手术时,为了达到钻臂运动比较灵活 的目的,钻臂末端应满足在三维空间具有6个自由度。 考虑到钻孔手术的危险性,笔者给出了更加符合人机 工程学的设计指标,即整个装置满足重力自平衡、钻臂 运动时的阻尼可调节,钻臂可以锁紧,锁紧时具有足够 的刚度等设计指标。另外,电钻在钻孔时要能够自动 进给并且进给量可调,同时需要实时显示钻孔过程中 的各项参数指标。

目前笔者已完成6自由度、具有重力自平衡功能 的钻孔辅助装置机械结构设计,如图1所示。



图 1 脊柱钻孔辅助装置结构设计

装置整体的重力自平衡通过配重系统实现,钻臂 关节 J1 为移动关节,关节 J2-J6 为转动关节,末端通过 步进电机直线模组构成的进给关节 J7 和电钻联接。 在各转动关节处设计有磁粉离合器,作为实现阻尼控 制的核心部件,可以通过控制其制动力矩实现手术钻 孔定位时的拖动、微调和锁紧状态的切换,并且保持钻 臂具有一定的刚度和稳定性。在各转动关节处还设置 有光学编码器,用以检测各关节的转动角度并计算末 端电钻的实时位姿。笔者在转动关节 J6 末端设置有 手术电钻,通过步进电机直线模组和转动关节 J6 末端 连接,从而实现直线钻孔进给。

1.2 控制系统总体设计

控制系统需要设计实现电流/电压输出控制功能, 编码器信号读取功能,以及步进电机驱动控制功能。 据此设计的控制系统总体方案如图2所示。



主控芯片选择 STM32F767,阻尼控制方案为通过 定时器 TIM8 和 TIM9 产生 5 路 PWM 信号转换为大小 可控的电压输出,经过功率放大后输入到磁粉离合器, 实现转动关节的变阻尼控制以及锁紧。直线进给系统 方案为通过 TIM10 产生一路 PWM 输出给定频率和个 数的脉冲,控制步进电机直线模组的进给量,同时利用 两个 IO 口控制步进电机是否使能及正反转。位置信 号检测方案为通过采用定时器 TIM1-TIM5 的编码器 接口模式,进行编码器脉冲信号的读取和计数。

钻孔时各项数据的实时显示通过 LCD 屏幕以及 力/力矩传感器实现,钻孔时的各项操作通过 LCD 触 控屏幕的人机交互界面实现。

2 控制系统

2.1 阻尼控制系统设计

根据磁粉离合器的工作原理^[12],其具有如下特性:励磁电流与转矩呈线性关系,传递的转矩不受滑差影响的特性。因此,为了达到控制转矩的目的,需要控制输出电流的大小。

由于 STM32F767 的 DAC 输出只有两路,本文采用 PWM + RC 滤波的方式来实现 DAC 输出。实际电路中典型的 PWM 波形可以用分段函数表示为:

$$f(t) = \begin{cases} V_H & kNT \le t \le nT + kNT \\ V_L & kNT + nT \le t \le NT + kNT \end{cases}$$
(1)

式中:T—单片机中计数脉冲的基本周期;n—PWM 波 一个周期的计数脉冲个数;N—PWM 波一个周期中高 电平的计数脉冲个数;V_H/V_L—PWM 的高低电平值; k— 谐波次数。

将式(1) 展开成傅里叶级数,可得:

$$f(t) = \left[\frac{n}{N}(V_{H} - V_{L}) + V_{L}\right] + 2\frac{V_{H} - V_{L}}{\pi} \sin\left(\frac{n}{N}\pi\right) \cos\left(\frac{2\pi}{NT}t - \frac{n\pi}{N}k\right) + \sum_{k=2}^{\infty} 2\frac{V_{H} - V_{L}}{k\pi} \left|\sin\left(\frac{n\pi}{N}k\right)\right| \cos\left(\frac{2\pi}{NT}kt - \frac{n\pi}{N}k\right) \quad (2)$$

$$\vec{x} \oplus : n/N(V_{H} - V_{L}) + V_{L} - \vec{n}\vec{n}\vec{x}\vec{x} = \frac{2}{N} \frac{V_{H} - V_{L}}{\pi} \sin\left(\frac{n}{N}\pi\right) \cos\left(\frac{2\pi}{NT}t - \frac{n\pi}{N}k\right) - \vec{x}\vec{w}\vec{x}\vec{y} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} 2\frac{V_{H} - V_{L}}{k\pi} \left|\sin\left(\frac{n\pi}{N}k\right)\right| \cos\left(\frac{2\pi}{NT}kt - \frac{n\pi}{N}k\right) - \vec{n}\vec{x}\vec{w}\vec{y} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} 2\frac{V_{H} - V_{L}}{k\pi} \left|\sin\left(\frac{n\pi}{N}k\right)\right| \cos\left(\frac{2\pi}{NT}kt - \frac{n\pi}{N}k\right) - \vec{n}\vec{x}\vec{w}\vec{y} = 0$$

式(2)中的直流分量与n成线性关系,并随着n从 0 到N,直流分量在 V_L 到 $V_L + V_H$ 之间变化。因此,本文 只需设计低通滤波器进行解调,滤除高频分量,就可以 得到从 PMW 波到电压输出 DAC 的转换。式(2)中的 第 2 项的幅度和相角与n 有关,频率为 1/(NT),其实 就是 PWM 的输出频率,该频率是设计低通滤波器的依 据。如果能把 1 次谐波很好过滤掉,则可以消除绝大部 分的高次谐波。

据此,可以得出 PWMDAC 的分辨率公式:

$$p = \log_2 N \tag{3}$$

如果假设 *n* 的最小变化为 1,当 *N* = 256 的时候, 分辨率就是 8 位。在该假设条件下,设计要求 1 次谐波 对输出电压的影响不要超过 1 个位的精度,也就是 3. 3/256 = 0. 012 89 V。假设 V_H 为 3. 3 V, VL 为 0 V, 那 么一次谐波的最大值是 2 * 3. $3/\pi$ = 2. 1 V,因此,该二 阶 RC 滤波电路的设计需要提供至少 – 20lg(2. 1/ 0. 012 89) = – 44 dB 的衰减。

由于本系统的定时器频率为 108 MHz,考虑 8 位分 辨率的情况下,PWM 频率为 108 M/256 = 421.875 kHz。 二阶 RC 滤波的要求截止频率为 33.62 kHz,根据下式, 可以计算出二阶 RC 滤波器的所需的电容电阻值:

$$f = \frac{\pi RC}{2} \tag{4}$$

据此,可以通过改变PWM占空比的方式调节单片机 IO 接口的输出电压大小,再通过磁粉将输入电压转

换成对应的电流值,用于控制磁粉离合器。具体的电压 计算公式为:

$$V_{\text{out}} = \delta (V_H - V_L) + V_L \tag{5}$$

式中:δ—PWM的占空比。

2.2 直线进给系统设计

本文拟采用两个5V开关量控制步进电机,其输 出分别用于使能步进电机驱动和控制步进电机正反 转,另外还需要一路脉冲发送用于控制步进电机的实 际运动量。

本文通过定时器的 PWM 功能实现对步进电机的 控制。具体通过发送对应个数的脉冲控制步进电机的 进给量。进给量计算公式如下:

$$s = N\theta\gamma(mm) \tag{6}$$

式中:s-进给量;N-发送脉冲个数;θ-步距角;γ-导程。

具体实现方式为使用 PWM 输出加定时器中断模 式,每发送一个脉冲均触发一次定时器中断;其次在中 断服务函数中维护一个全局变量,记录已经发送的脉 冲个数,当脉冲数达到设定个数时,关闭定时器中断和 PWM 输出。

本文设计的 LCD 屏幕界面如图 3 所示。



图 3 LCD 触控屏幕界面

该交互界面中,第一行为阻尼模式切换按钮,包括拖动、微调和锁紧模式,分别对应为 Drag、Inch 和 Lock 按钮。第二行的数字调节按钮通过设置步进电机的进 给量(mm)来实现钻孔深度的设置。第三行第一个复 选框用来确认钻孔的深度,未勾选时第四行的开始按 钮无效。第二个复选框用来改变步进电机运动的方 向。第四行的两个按钮用来控制末端直线模组的启动 和停止,对应于图中的 Start 和 Stop 按钮。

2.3 手术操作流程

使用该装置完成脊柱手术钻孔流程,如图4所示。



具体的钻孔操作流程如下所述:

(1)打开电源开关,磁粉离合器初始化为锁紧状态;(2)轻按LCD 屏幕上的 Drag 将辅助钻臂工作模式 切换到拖动模式,这时医生可以用较小的牵引力将骨 钻拖动到打孔位置;(3)轻按LCD 屏幕上的 Inch 按 钮,调整钻孔位置和角度;(4)轻按LCD 屏幕上的 Lock 按钮进入锁紧状态;(5)输入钻孔进给量和进给 速度,勾选确认复选框 DepthConfirm,然后轻按 Start 按 钮开始自动进给操作;(6)观察显示屏上显示的钻孔 数据;(7)一旦出现问题,按下 Stop 按钮或急停按钮。 如需退出骨钻,勾选进给装置的反向运动复选框 ReverseDirection,输入退出量;(8)钻孔完成预先设定的 进给量后,由医生决定骨钻退出或者继续进给。

3 实验及结果分析

根据 20 N 左右的拖动力的需求,本文通过 DOE 的方法分别确定了拖动和微调状态下所需的关节摩擦 力矩,并通过 3 个按钮分别实现。为了确保钻孔时的 安全,按下锁紧后锁紧力矩最大。

试验过程包括:启动设备、拖动钻臂、微调钻头位

姿、设置钻孔深度等。实验结果表明:在最大工作力矩 下可以满足完全锁紧的需求。

最终完成的实验样机的性能参数,如表1所示。

表1 试验样机性能参数

钻臂位置显示精度/(°)	进给速度/(mm・s ⁻¹)
0.01	0.5
最大进给深度/mm	锁紧状态工作电流/A
50	1

4 结束语

本文根据椎弓根内固定术实施钻孔操作过程中的 难点,为已经设计完成的钻孔辅助装置机械系统设计 了控制系统,实现了钻臂拖动状态、微调状态和锁紧状 态的快速切换控制;实现了钻孔状态的辅助显示,为医 生在钻孔时对手术状况的判断提供了帮助。

该系统同时也实现了钻孔自动进给控制,解决了 脊柱手术由于钻孔时,可能存在的劳动强度和生理颤 振给手术带来的风险问题。

参考文献(References):

- [1] 郭世绂. 脊柱外科医师应重视骨质疏松性骨折的预防 [J]. 中国脊柱脊髓杂志,2006,16(11):805-806.
- [2] 王洪伟.脊柱椎弓根螺钉定位导向装置的研制与临床应 用进展[J].中国矫形外科杂志,2012,20(6):519-522.
- [3] 翟浩瀚,陈 艺,龙 浩,等.经皮椎弓根穿刺辅助定位导向装置在经皮椎体成形术中的应用[J].中国骨科临床与基础研究杂志,2014,6(4):222-226.
- [4] GODZIK JA. Quantitative assessment of the accuracy and reliability of robotically guided percutaneous pedicle screw placement: technique and application accuracy[J]. Operative neurosurgery, 2019, 17(4):389-395.
- [5] HIYAMA A, SAKAI D, STAO M, et al. The analysis of percutaneous pedicle screw technique with guide wire-less in lateral decubitus position following extreme lateral interbody fusion [J]. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2019,14(1):304-309.
- [6] 邓忠良,谢维波,任广军,等. CT 引导下经皮穿刺椎体成 形术的初步应用[J].重庆医学,2002,31(12):1159-1160.
- [7] 韩建达,宋国立,赵忆文,等.脊柱微创手术机器人研究现 状[J].机器人技术与应用,2011(4):24-27.
- [8] 盛国栋.基于力反馈的主从式机器人辅助脊椎穿刺手术 系统[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院, 2014.
- [9] HEO D, JANG J, LEE J, et al. Slippage reduction of lumbar spondylolisthesis using percutaneous pedicle screw with

· 855 ·

reduction fixation system after interbody fusion: a comparison with traditional open fusion and pedicle screw fixation [J]. Journal of Clinical Neuroscience, 2019(67):156-162.

[10] HAN X. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial [J]. Journal of Neurosurgery-Spine, 2019,30(5):615-622.

- [11] 郑小丽.脊柱手术机器人的柔顺控制及骨削手术规划 [D].长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2013.
- [12] 吴晓刚, 王旭东, 余腾伟, 等. 基于神经元 PID 的磁粉离 合器电流控制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(10):61-63.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

李翔昱,汤 卿,徐邦杰,等. 基于 STM32 的脊柱手术钻孔辅助装置控制系统[J]. 机电工程,2020,37(7):851-855. LI Xiang-yu, TANG Qing, XU Bang-jie, et al. Control system of drilling assistant device for spinal surgery based on STM32[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(7):851-855. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第840页)

5 结束语

基于 TRIZ 理论,笔者完成了对取货门的导槽连 杆组合机构传动设计;分析了其数学描述,避免了货门 运动过程发生卡槽现象;通过理论分析连杆运动过程 中θ的变化,得到连杆角度φ变化;通过 Motion 仿真 分析,验证了设计计算结果的正确性。

该机构用在智能大容量零售柜自动取货门上,具 有运行时间短、不易被破坏、操作方便、运动平稳和噪 音较小等优点。

参考文献(References):

- [1] 周憬钰. 三角肘杆式压力机主驱动机构的运动学与静力 学分析[J]. 锻压技术,2018(12):97-103.
- [2] 宁水根,黄 键,张 勇,等.客车外摆式行李舱门四连杆 机构设计[J].汽车工程师,2012(2):22-24,55.
- [3] 杜建军.平面连杆机构运动误差分析系统的开发[D]. 沈 阳:东北大学机械工程与自动化学院,2012.
- [4] 魏代善,管殿柱,唐国龙.盘形凸轮参数化设计及运动仿

真[J]. 现代制造工程,2017(5):110-114.

- [5] 柯尊芒,鹿新建,冯华伟,等.双曲柄多连杆压力机滑块运动曲线研究[J].精密成形工程,2013,5(4):16-19.
- [6] VLADIMIR P. Review of TRIZ[M]. SpringerInternati- onal Publishing, 2019.
- [7] 刘曦泽. 基于发明问题解决理论的系统设计方法应用 [J]. 浙江大学学报,2009,43(12):2244-2249,2263.
- [8] 张付英,徐燕申. 基于 TRIZ 的液压缸移动密封的进化研 究[J]. 润滑与密封,2004(3):14-17.
- [9] 田 源,周永清.基于 TRIZ 理论的自动增排雨水井盖设 计[J].机械设计与研究,2018,34(1):43-44,49.
- [10] 何 川,张 鹏,陈利琼. TRIZ 在概念设计中的应用 [J].四川大学学报:工程科学版,2003(5):19-23.
- [11] 张益贵,沙福泰. 准直器光阑曲线导槽的设计与加工 [J]. 医疗装备,2013,26(9):15-16.
- [12] 张久雷.双电机驱动的六足直立式步行机构设计与运动 学分析[J].机械传动,2018,42(10):106-111.
- [13] 孙 桓. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 孔朵朵. 基于 Motion 的升降割台仿真分析与优化设计 [J]. 机械设计与制造,2018(2):231-234.

[编辑:方越婷]