

骨科手术机器人的协同控制方法*

Collaborative Control Method for Cranio-maxillofacial Surgical Robot System

王 内¹ 栾 楠¹ 张诗雷² 桂海军² 吴锦阳²

(1 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2 上海交通大学 医学院附属第九人民医院, 上海 200011)

摘 要: 基于力反馈设备, 通过引入虚拟约束和力反馈, 介绍了能满足颅颌面整复手术需求的人机协同操作控制策略。在机器人可达工作空间内, 基于模糊控制算法实现了反馈力的规划。通过对手术操作进行合理的过程规划, 在模拟手术实验中实现了所提出的骨科手术机器人的人机协同操作控制策略。最后, 设计了一组对比试验, 验证了这种协同控制策略有效性和合理性。

关键词: 颅颌面手术机器人 协同控制 虚拟约束 力反馈 模糊控制 过程规划

DOI: 10.3969/j.issn.1007-080x.2013.01.010

Abstract: This paper proposes a collaborative control method of a 7-DOF navigated robot designed for cranio-maxillofacial surgery. This method is based on virtual fixtures, force feedback and also tele-operation. Working inside the safe working space of the robot, the virtual feedback force is assigned through the fuzzy control algorithm and transformed to the tele-operation side through network. Meanwhile, we also proposed a reasonable process planning method to optimally realize the collaborative control method. Performance of our method was validated by designed experiments.

Key words: cranio-maxillofacial surgical robot collaborative control virtual fixtures force-feedback fuzzy control process planning

0 引 言

骨科手术机器人主要辅助医师完成精确的锯切、磨削、钻孔、定位等操作, 与 da Vinci^[1] 等主从式系统不同, 其自主性较高。现有骨科机器人系统大多由工业机器人技术发展而来, 在膝、髋关节造型等较为简单的应用上, 这种技术路线取得了成功。而对于颅颌面骨整复手术来说, 解剖结构复杂, 手术操作类型广泛, 又涉及到头部重要组织结构, 危险性大, 手术难度很大,

尚未有成功的机器人手术系统见诸报道。^[2~7]

而本文针对颅颌面骨整复手术这种相对复杂的手术提出了基于遥操作和力交互的人机协同操作模式。这种模式有利于提高医师的临场感和注意力, 提高人机交互接口的操作性能, 从而能有效处理这种复杂手术过程。通过操作医师对机械臂的实时控制, 在利用机器人的稳定性和精确度的同时, 也能保证手术过程

* 基金项目: 上海交通大学医工交叉基金(YG2011MS06); 上海交通大学医学院博士创新基金(BXJ201229)。

作者简介: 王 内 1989 年生, 硕士研究生。研究方向为机器人与智能控制。

栾 楠 1973 年生, 副教授。主要研究方向为机器人学、机器人智能控制等。

的安全性;同时,本文也提出了基于这种控制策略的手术过程规划及操作方法,以便在此基础上开展机器人辅助颅颌面骨整复手术的临床应用研究。

1 系统组成

1.1 手术机器人系统组成

本文的手术机器人系统主要由三部分组成:机械臂本体、手术机器人导航系统,及其三维导航软件、力反馈设备。其中,机器人本身具有7个自由度,多出的1个冗余自由度可以用于操作度优化和避障。导航系统基于NDI Polaris Vicra系列红外跟踪仪,位置精度 $\pm 0.25\text{ mm}$ 。三维导航软件采用自主研发的高

精度光学导航辅助颅颌面骨畸形整复手术软件系统,该软件可以用来实现病灶部位任意轨迹的术前操作路径规划。力反馈设备采用Force Dimension公司的Novint Falcon力反馈控制器,可实现三维位置空间的力反馈。

手术过程中,医生根据反馈力的大小和导航系统的提示判断手术动作的情况,必要时进行调整操作并通过三维力反馈器输入到控制器。导航系统和力反馈操纵器对机器人动作进行双重控制,既能实现术前规划的作业路径,又能接受术中医师实时的现场干预。整个系统的硬件组成如图1所示。

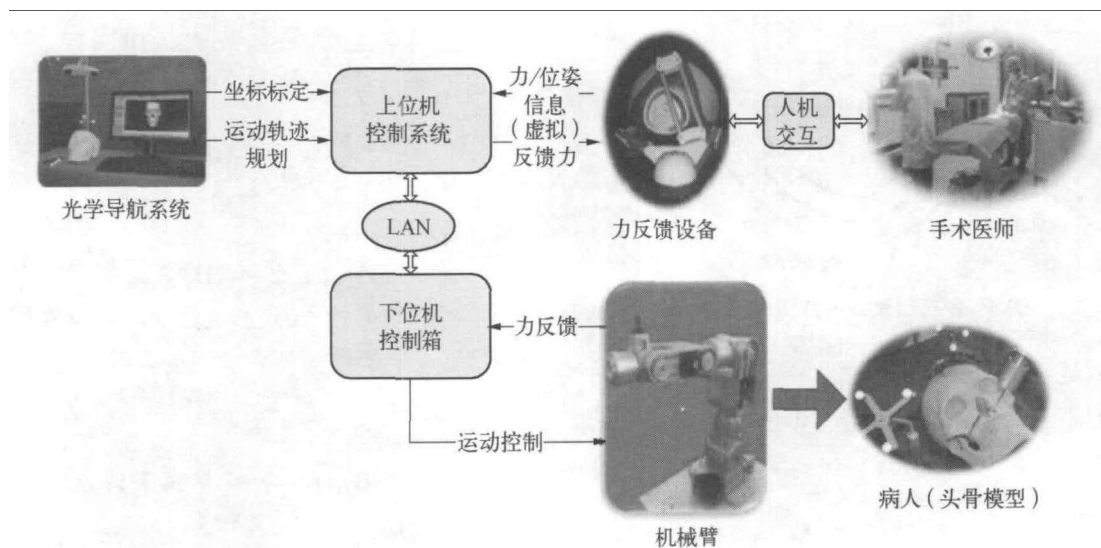


图1 协同控制系统组成示意图

1.2 控制系统结构框图

为使机械臂能够满足骨科手术对刚度、精度、运动灵活性及实时应用的要求,并尽量方便医生的操作,我们需要以手术操作要求为指标对7自由度机械臂进行运动学及动力学的优化,使机械臂在手术过程中保持良好的灵活性;同时对包括导航系统、控制系统、机械臂在内的整个手术机器人系统进行实时通信的协调和误差统一建模,提高系统精度;并在人机交互中利用协调控制策略和虚拟约束将医生的主观判断与机械臂的精准结合起来。

将上述协调控制策略及模糊控制、虚拟约束等控制算法与下位机运动控制系统相结合,得到图1中上位机控制系统和下位机控制箱部分详细的控制模块框图,进而完善控制系统整体结构框图如图2

所示。

2 协同控制策略设计

2.1 基于力反馈的力-速度控制算法设计

当执行器(手术刀)进入预定义工作区域之后(距离信息可以由视觉伺服获得),我们希望医生在通过力反馈设备遥控执行器时,能实现“加力则走,失力则停,加力愈大,运动越快”的规律。那么,理论上可以采用的最简单的速度控制规律为

$$\dot{x} = k \cdot \Delta f. \quad \text{st: } \|\dot{x}\| \leq \|\dot{x}_0\|; x \in D_s. \quad (1)$$

其中, Δf 为操作者施加力 f_o 和环境反作用力 f_e 的差值,如图3所示; α 、 β 分别为操作者施加力 f_o 和环境反作用力 f_e 的调节比率系数。

$$\Delta f = \alpha f_o - \beta f_e. \quad (2)$$

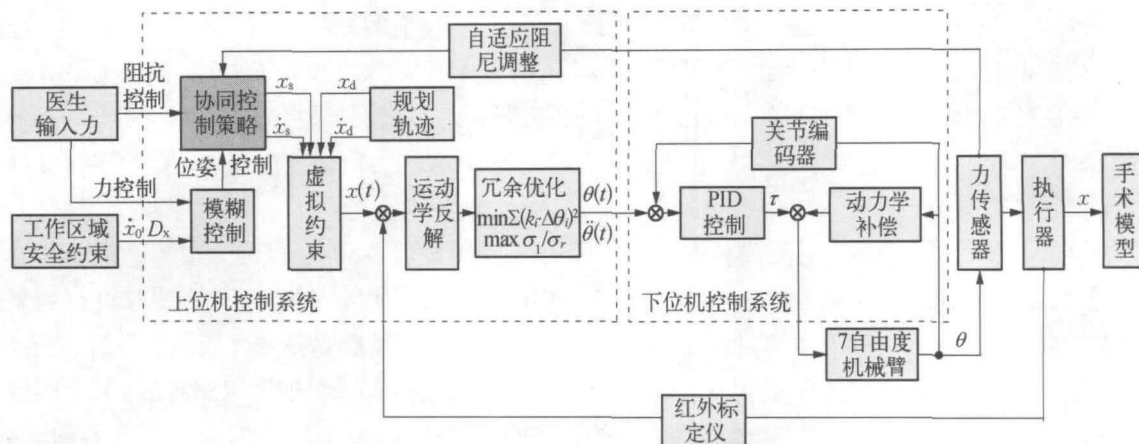


图2 控制系统结构框图

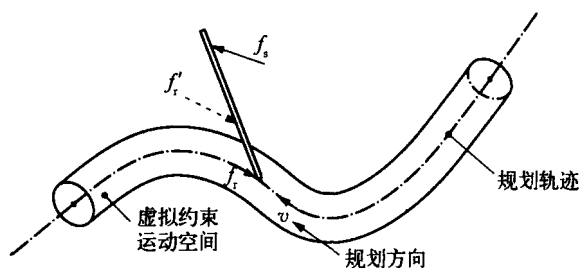


图3 执行器受力模拟图

由于做截骨手术过程中人机协同操作模式下,为保证手术刀不会由于力反馈设备 Falcon 产生的反馈力

$$\|f_r'\| = \begin{cases} 0 & x \in D_x; \|\dot{x}\| \leq \|\dot{x}_0\|; \\ (w_1\varphi(x, V_D) + w_2\psi(\dot{x}, \dot{x}_0, f_r))F_{\max} & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

其中, V_D 为 D_x 和 \bar{D}_x 的交界面; D_x 为手术过程中的工作空间,危险工作区间即为 \bar{D}_x ; w_1 、 w_2 为权系数; F_{\max} 为人为设定的最大虚拟反馈力;函数 φ 、 ψ 则用以表征执行器的位置量及速度量进入危险空间或工作状态程度的函数,从模糊控制理论的角度来说即为相应的率属度函数。式(3)表达的正是系统控制变量即虚拟反馈力的模糊控制规则表达式。这里篇幅有限,不再赘述模糊控制算法细节。

综上,同时加入动力学量 M 、 C 作为加速度量和速度量的调节系数,完善式(1)给出的力反馈控制环的控制规律如下式:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} = k_v \text{Sgn}(\alpha f_s - \beta f_r - \gamma f_r') \cdot (\alpha f_s - \beta f_r - \gamma f_r'). \quad (4)$$

2.2 颅颌面截骨手术过程中的人机协同控制实现

实际上,单纯的主动式操作方式或者自动操作方

f_r 的突变逆向运动,所以在人机协同控制的模式下(H-R模式),需要定义一个 $\text{Sgn}(f)$ 函数:

$$\text{Sgn}(f) = \begin{cases} 0 & f \leq 0; \\ 1 & f > 0. \end{cases}$$

同时,我们对执行器在医师的操作过程中的速度量 \dot{x} 和操作空间的虚拟约束,是通过程序添加反作用力 f_r 并由力反馈设备反馈给操作者实现的。我们定义其为虚拟(反馈)力。如图3,其1-范数模量定义为

式都不能最大效率地综合利用医师的经验主观判断以及机械臂的精准性。而任何一个手术任务都可以分化为很多子任务,其中一些简单而且安全的任务是可以直接由机器人自动完成的,而有一些任务则必须在医师操纵的前提下通过与手术机器人协作完成,如前文提到的锯切任务。

本文以本实验室研究的颅颌面骨科手术为例。首先,通过人机交互界面可以选择3种操作模式:H模式,R模式,H-R模式,分别表示手动模式、自动模式和人机协作操作模式。我们根据需求和分析将颅颌面截骨手术任务主要分割为5个子步骤,如图4所示。手术刀由任意点A在医师(H模式)通过机械臂三维操作摇杆运动到离头颅近点B,然后直线插补(R模式)到截骨线初始点C,开始在人机协同操作模式下(H-R模式)进行“截骨”手术;运动到退刀点D之后自动直线

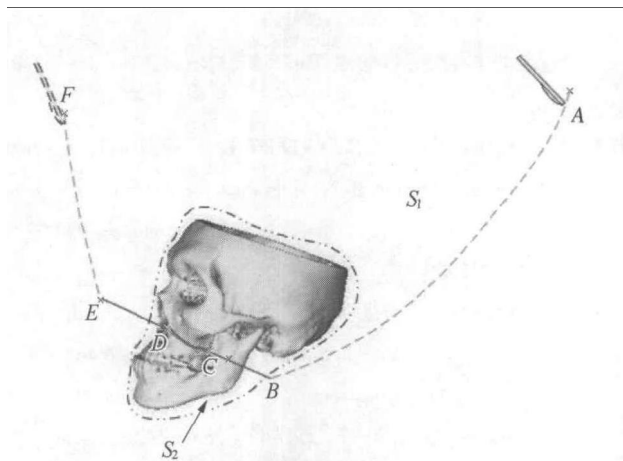
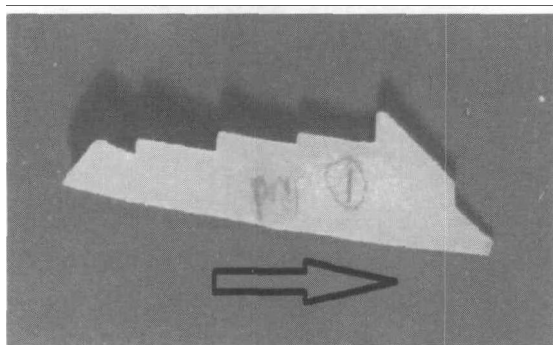


图4 颌颌面截骨手术过程规划

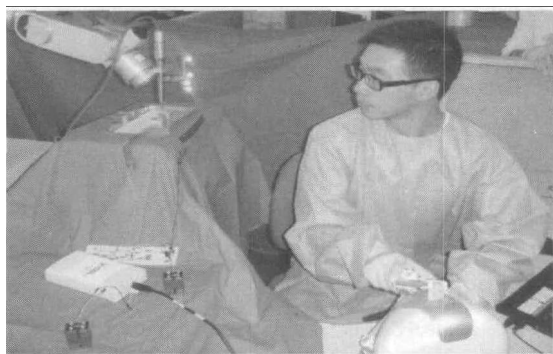
插补(R模式)到退出点 E ,再由操作者手动控制(H模式)运动到任意远离病人的合适位姿 F ,便于搬离手术机械臂。

3 实验验证

为了验证上述H-R协作模式的有效性,我们设计了一组对照实验。切割材料为树脂材料,横截面如图5a所示,越厚的地方表示切割的时候所受阻力会越大。笔者分别以手持手术刀和以遥控操作器操作机械臂,执行切割任务,即沿图5a切割方向执行切割试样,切割轨迹预定义为直线。



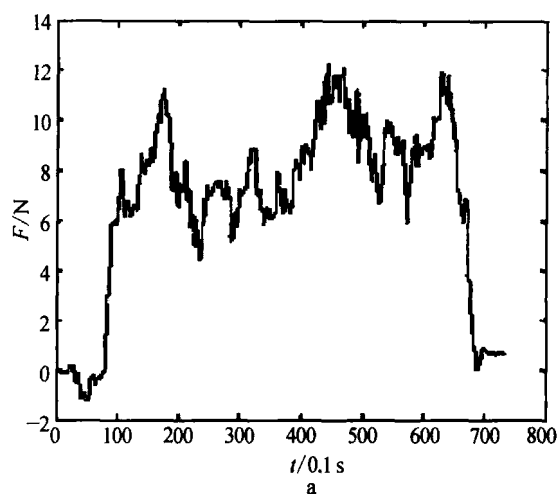
a



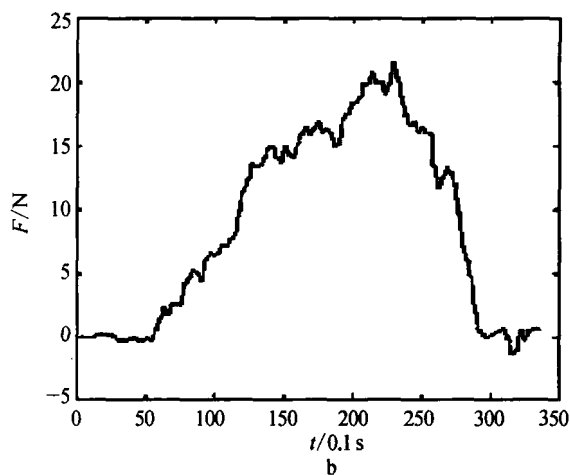
b

图5 切割材料样品及切割实验

两组实验中,将力传感器采集到的信号经过低通滤波(主要是过滤来复锯的颤动及其他白噪声信号)处理之后,得到刀具所受阻力随时间变化曲线如图6所示。



a



b

图6 实验中力采集数据对照图

从图6a可以看出,即使经过低通滤波处理,由于人手的抖动和操作不熟练,导致力传感器采集到的力信号变化波动依然会比较大,而且采集到的阻力的大小变化趋势与切割材料并无太大关系。而从图6b则可以看出,经过滤波处理之后反馈到人手的阻力没有急剧波动,而且明显随着切割材料厚度实时变化,也意味着能更为准确和敏感地反映材料的切割难易程度。

总而言之,这种协同操作模式能够通过给予操作医师以力反馈,同时过滤掉人手直接操作的颤动和不稳定性,使得医师能通过力操作器更敏感地感受到来自切割材料的阻力,从而实时有效地干预调整手术刀

的速度、位姿和进程。也就是说,通过术前精确的手术规划轨迹加上过滤掉重力和颤动的实时力反馈的控制,使得即使是不熟练的操作者,依然可能完成资深医师才能完成的颅颌面截骨手术。

4 结束语

本文主要以颅颌面截骨手术为例,设计了基于力反馈和虚拟约束的人机协同控制策略,并基于此协同控制策略,给出了一种比较合理的适用于颅颌面截骨手术过程控制的总体规划方法。本文最后设计了一组对比实验,从实验结果可以验证得出这种协同控制策略的有效性和安全性。需要注意的是,文中设计的协同控制策略和手术规划方法虽然是专为颅颌面截骨手术设计的,但也可以作为其他类型手术操作控制策略及方案设计的参考。本论文验证了这种协同操作方式的可行性,实际作用于真实骨质材料的探索还有待完善。

参考文献

- [1] KENNETH C CURLEY. An Overview of the Current State

and Uses of Surgical Robots [J]. General Surgery, 2005, 10(2): 155 - 164.

- [2] TAYLOR R H, MITTELSTADT B D, PAUL H A, et al. An Image-Directed Robotic System for Precise Orthopaedic Surgery [J]. IEEE Trans. Robot. Automat, 1994(10): 261 - 275.
- [3] DAVIES B L, HARRIS S J, LIN W J, et al. Active Compliance in Robotic Surgery — The Use of Force Control As a Dynamic Constraint [J]. Institution of Mechanical Engineers — H, 1997, 211(4): 285 - 292.
- [4] ENGEL D, RACZKOWSKY J, WWORM H. A Safe Robot System for Craniofacial Surgery [C]. ICRA, 2001.
- [5] HEIN A, LUETH T C. Robot Control in Maxillofacial Surgery [J]. Experimental Robotics, 2000(4): 173 - 182.
- [6] 孙立宁,张剑,杜志江.一种基于图像导航的骨外科手术机器人系统[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(2): 285 - 289.
- [7] BURGHART C, KEITEL J, HASSFELD S, et al. Robot Controlled Osteotomy in Craniofacial Surgery [C]. ICRA, 1999.

(上接第33页)

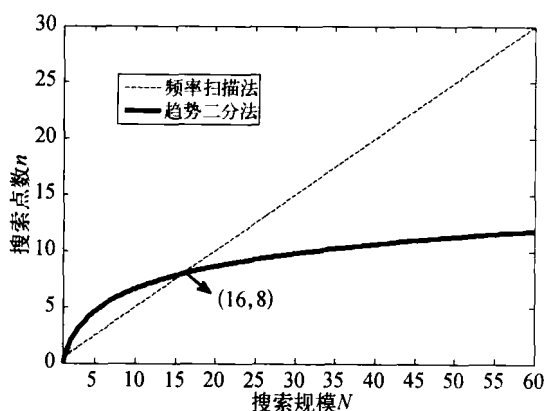


图5 两种搜索算法对比

4 结束语

对比叶片疲劳加载各种方案,提出基于激光测距传感器位移反馈的摆锤共振疲劳加载闭环控制系统,提高了控制精度。传感器实时获取叶片疲劳加载过程的振幅和频率等系统状态参数,为加载过程的监测和分析提供重要信息。此外,还提出两种共振频率搜索策略,经过对比分析,趋势二分法更适用于搜索规模较

大的实际情况。本文对于摆锤共振型疲劳加载控制系统以及系统共振频率搜索提供了理论基础,对实际工程应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] 邬湘成. 风电叶片疲劳加载试验系统研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [2] WALT MUSIAL. Wind Turbine Testing and Certification. [EB/OL]. (2004-02-24)[2012-11-6]. <http://windpower.sandia.gov/2004BladeWorkshop/PDFs/WaltMusial.pdf>.
- [3] WHITE D, MUSIAL W, ENGBERG S. Evaluation of the New B-REX Fatigue Testing System for Multi-Megawatt Wind Turbine Blades. [EB/OL]. (2004-12-15)[2012-11-6]. <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37075.pdf>.
- [4] OLE JESPER DSHL KRISTENSEN, ERIK R JOGENSEN. Accelerated Fatigue Testing of LM19.1 Blades. [EB/OL]. (2003-05-12)[2012-11-6]. <http://www.risoe.dtu.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1358.pdf>.