

基于遥操作机器人的医疗超声检测系统设计与实现

宾一鸣,段晋军,郭安,崔坤坤,孙伟栋,姜锦程,王国栋,吴陈远

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:基于高精度遥操作设备和协作机器人搭建一种新型医疗超声检测平台,可用于远程超声检查等应用领域。研究基于双边末端的位姿映射方法、双边力反馈方法与运动保护机制以及动态冲击力反馈与实时感知规避的柔顺控制方法,实现应用于远程医疗超声平台的遥操作机器人随动控制与临场力感知效果,保证遥操作医疗超声平台的实时平稳操作。通过实验验证:该平台具有较强的可行性和稳定性,可为未来超声检测提供新的工作范式。

关键词:遥操作机器人;双边力反馈;柔顺控制;临场力感知

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0015-05

Design and Implementation of Medical Ultrasonic Testing System Based on Telerobot

BIN Yiming, DUAN Jinjun, GUO An, CUI Kunkun, SUN Weidong, JIANG Jincheng, WANG Guodong, WU Chenyuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new medical ultrasonic testing platform applicable to remote ultrasonic inspection and other application fields is built based on high-precision teleoperation equipment and cooperative robot. Position and attitude mapping method based on bilateral terminal, bilateral force feedback method and motion protection mechanism, and compliance control method based on dynamic impact force feedback and real-time perception avoidance are studied. Thus follow-up control and field force perception effect of telerobot applied to telemedicine ultrasonic platform is realized and real time stable operation of teleoperation medical ultrasonic platform is ensured. The experiment verifies that the platform has strong feasibility and stability, and call provide a new working paradigm for ultrasonic testing in the future.

Keywords: telerobot; bilateral force feedback; compliance control; on-site force perception

0 引言

伴随着日渐成熟的互联网技术与机器人技术,医疗机器人在远程医疗中的地位愈发凸显。远程医疗手术和康复是医疗机器人最为典型的两类应用场景。医生在手术机器人辅助下,可以完成更微创、更精准、更安全的手术,在腹腔镜类、骨科类以及介入类等手术中得到越来越多的应用^[1-2]。

在当今社会疫情常态化以及大健康的时代背景下,基于医工结合的无接触式医疗诊断愈发受到社会各界的重视^[3-4]。其中超声检测作为医院中的常规检测项目,在各大医院中应用广泛、需求量大。受到现实需求影响,一种新型医疗超声检测平台^[5]如雨后春笋般出现在人们的视野中。这样的平台往往基于高精度遥操作杆以及协作机器人而搭建,运用远程遥操作机器人技术助力远程医疗发展^[6]。在世界医疗范围内,美国 Intuitive Surgics 公司在 1990 年得到了美国国家卫生局的投资,到目前为止共推出了四代产品,其开发的 Da Vinci 手术机器人系统^[7-8],在目前临床中被广泛应用。该系列产品由搭载主手和三

维成像系统的医生控制台以及从端手术机械臂构成,通过变尺度遥操作控制,辅助医生进行操控,是远程操控机械臂在医疗领域最成功的案例之一。在国内,哈工大也对应用于手术医疗的遥操作机器人开展了相关的研究^[9]。目前远程超声机器人作为一个新兴的机器人应用方向,愈发引起人们的关注^[10]。2016 年,澳洲墨尔本迪金大学的智能系统研究所(IISRI)研发出一款具有触感的医疗超声机器人^[11],具有柔性机械臂结构,机械臂末端安装超声探头和触觉传感器,可以辅助医生远程为病人进行腹部超声波扫描检查。2020 年,华大智造的远程超声机器人系统^[9-12],可全自动实时远程超声诊断,由医生远程完成操作,并联合深圳市罗湖区以及各三甲医院具有了相关应用。但在以上的研究中,基于医疗超声平台的遥操作系统仍然需要更多关于机器人柔顺运动与控制的研究以保证机器人执行医疗操作的稳定性与柔顺性。目前针对此问题的相关研究较少。

传统的机器人控制技术可以通过轨迹规划的方法在机器人工作状态中避免抖动现象^[13-14],但在遥操作机器

基金项目:国家青年科学基金项目(52205017);之江实验室开放课题资助项目(K2022NBOAB08)

第一作者简介:宾一鸣(2000—),男,广西桂林人,硕士研究生,研究方向为遥操作机器人研究。

通信作者简介:段晋军(1988—),男,山西太原人,讲师,工学博士,研究方向为机器人柔顺控制、遥操作技术、多机器人协作与位置力协调控制等,duan-jinjun@nuaa.edu.cn。

人精细操作过程中,由于机器人与遥操作设备的异构位姿映射、操作者存在的无意识、不连续的抖动操作以及操作者^[15]输入的具有随机性质的运动曲线均会使得机器人在随动控制过程中产生不连续的运动轨迹,其形成的冲击会引发机器人的抖动。在对位置精度具有高要求的应用环境中,这样的抖动现象不能简单地采用滤波算法进行平滑处理,以免破坏机器人与遥操作设备之间的位置映射关系。此外,在传统的双边力反馈算法下,这样的机器人抖动现象往往难以被操作者感知,而在遥操作中基于位置的直接控制方法也缺乏一般化的表达模态。上述问题在严重时会影响遥操作系统的柔顺性与稳定性,妨碍遥操作技术在医疗领域中的精准操作。

为解决上述问题,本文搭建了一套基于遥操作机器人的医疗超声检测系统。为了提高遥操作的稳定性和安全性,构建了临场力感知、柔顺操作机制以及运动保护机制,并分析了系统的稳定性和柔顺性。本文基于 Force Dimension omega.7 遥操作杆、珞石 xMate3 pro 及搭载实时操作系统的工控机构建遥操作机器人系统。通过对上述方法进行实验测试,证明了方法的有效性。

1 基于位置的遥操作机器人直接控制方法

为了在应用场合中保持良好的通信实时性与较高的运动精度,本文采用了基于位置的遥操作机器人直接控制方法。

搭建系统使用的遥操作设备与机器人的运动结构并不时常保持一致。如图 1 所示,为实现遥操作设备对机器人的随动控制,需要分别取二者的关键运动点作为映射点(通常为设备末端点)建立位姿映射关系。遥操作设备的运动信息作为系统的输入,其映射点相对于基座的位姿信息由其正运动学获取,机器人的运动则由机器人映射点的位姿信息经机器人逆运动学进行求解。二者位姿信息通过映射关系进行转换。

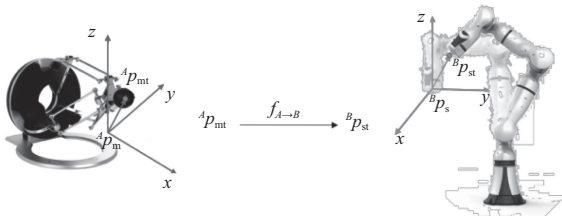


图 1 基于运动映射点的位置映射关系

若将遥操作设备(master)映射点的运动空间点集记为 $\{A\}$ 、运动原点记为 ${}^A p_m$;机器人(slave)映射点随动的运动空间点集记为 $\{B\}$ 、运动原点记为 ${}^B p_s$;则在运动映射 f_{A-B} 过程的某一时刻 t ,操作者通过遥操作设备向系统输入映射点相对于原点的位移量 x_m ,其相对于基坐标系的坐标为 ${}^A p_{mr}$;机器人映射点输出的位移为三维列向量 x_s ,相对于基坐标系的坐标为 ${}^B p_{sr}$ 。

二者的位移应保持线性关系,可将 ${}^B p_{sr}$ 求解如下:

$${}^B p_{sr} = f_{A-B}({}^A p_{mr}) = k_p \cdot ({}^A p_{mr} - {}^A p_m) + {}^B p_s \quad (1)$$

式中 k_p 为缩放比例系数。式(1)确定了运动点的位置关系。

如图 2 所示,对于映射点在 t 时刻方位的映射,遥操作设备映射点起始方位记为 R_{Om} ,运动的变换以旋转矩阵表示为 R_m ,其运动过后的新方位为 R_{Omt} ;机器人映射点起始方位为 R_{Os} ,运动的变换以旋转矩阵表示为 R_s ,其运动过后的新方位为 R_{Ost} 。

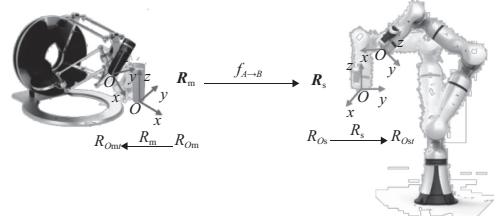


图 2 基于运动映射点的位姿映射关系

旋转关系中 R_m 与 R_s 应保持相等,可将 R_{Ost} 求解如下:

$$R_{Ost} = f_{A-B}(R_{Omt}) = R_{Os} R_{Om}^{-1} R_{Omt} \quad (2)$$

方位的映射不要求缩放,故上式确定了运动点的方位关系。将式(2)与式(1)联立,即可构造完整的映射变换矩阵 $T_{Ost} = \begin{bmatrix} R_{Ost} & {}^B p_{sr} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,确定遥操作设备与机器人之间的映射关系。由机器人逆运动学进一步计算机器人关节上的位移量,即可完成对机器人运动位姿的求解。这种位姿映射关系可以应用于遥操作设备与机器人异构的情况,保证了遥操作设备与机器人的映射点之间位置精度。

2 遥操作过程中的运动保护机制

作为一种面向医疗超声诊断、与人体具有紧密接触的遥操作系统,必须对潜在的运动隐患与安全隐患设计对应的保护机制,保护患者的生命安全。

在这个过程中,系统应对机器人的运动限位进行软限位设计,避免医生的误操作造成的系统失稳与刚性碰撞;对运动过程中的接触力进行分向保护。

2.1 软限位与静态虚拟墙

基于操作者在限位附近的关节运动有可能带来碰撞等危险状况进行考虑,必须给予机器人进行算法层面的限位保护。

如图 3 所示,机器人的关节电机正常可在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 的工作范围对机器人进行驱动,软限位则进一步将机器人的运动范围限制在 $(\theta_1 + \Delta\theta) \sim (\theta_2 - \Delta\theta)$ 的区域之中。

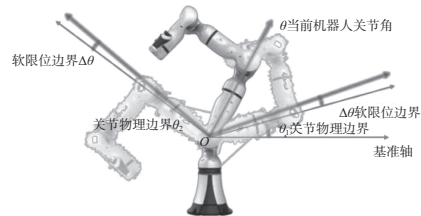


图 3 机器人的软限位

软限位虽然可以保护机器人运动过程不会受到来自电机限位的故障影响,但是并不足以提供良好的操作体验。

如图4所示,这种情况下,系统拟采用静态虚拟墙对机械臂末端的工作空间进行进一步限制,使机械臂末端只能在工作台上方的虚拟墙包围范围内进行运动。当机械臂末端运动至靠近虚拟墙的区域时,基于弹簧接触模型的接触力算法会为遥操作设备提供接触力 $\mathbf{F}_{static} = [x_{F,static}, y_{F,static}, z_{F,static}]^T$,以让操作者对静态虚拟墙进行感知。



图4 机器人虚拟墙位置

2.2 接触力边界约束与动态虚拟墙

基于医疗环境的复杂性,采用简单的阈值保护或是断电保护等方案都是不合适的,因此必须提出一种新的接触力保护机制,以更好地保障接触过程。

动态虚拟墙是一种基于弹簧接触模型提出的动态接触力的保护方法。类比于静态虚拟墙,不同的是,动态虚拟墙的工作边界是随着机械臂末端与外部环境发生的接触而发生改变的,在与人体实际接触时便可对人体进行接触保护。

动态虚拟墙的构建首先需要实时对机械臂末端的接触状态进行判断,找到零力接触点的存在条件。如图5所示。当力传感器读取到的外部力 \mathbf{F}_{ext} 数值大于高通滤波算法的滤波上限 \mathbf{F}_{filter} 时,则将外部力等于滤波上限时刻对应的机器人末端位置记为零力接触点,表示为该时刻的机器人末端所受外部力 $\mathbf{F}_{ext} = [x_{F,ext}, y_{F,ext}, z_{F,ext}]^T$ 。



图5 动态虚拟墙与零力接触线

对此情形下,沿接触力法向构造一弹簧接触模型,则接触力法向向量 \mathbf{n}_F 以 \mathbf{F}_{ext} 的方向余弦形式表示为

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{x_{F,ext}}{\sqrt{x_{F,ext}^2 + y_{F,ext}^2 + z_{F,ext}^2}} \\ \cos\beta = \frac{y_{F,ext}}{\sqrt{x_{F,ext}^2 + y_{F,ext}^2 + z_{F,ext}^2}} \\ \cos\gamma = \frac{z_{F,ext}}{\sqrt{x_{F,ext}^2 + y_{F,ext}^2 + z_{F,ext}^2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{n}_F = [\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma]^T \quad (4)$$

设定皮下的接触点与实际接触点距离为 d_{free} ,计算弹簧接触模型的零力接触点 p'_{free} 。

$$\begin{cases} x'_{free} = d_{free} \cdot \cos\alpha + x_{free} \\ y'_{free} = d_{free} \cdot \cos\beta + y_{free} \\ z'_{free} = d_{free} \cdot \cos\gamma + z_{free} \end{cases} \quad (5)$$

记反馈力为 F_{dyn} , 机器人末端此时的位置为 ${}^B p_{st} = [x_{B,p_{st}}, y_{B,p_{st}}, z_{B,p_{st}}]^T$, 则有:

$$\Delta l_{free} = \sqrt{(x_{B,p_{st}} - x_{p'_{free}})^2 + (y_{B,p_{st}} - y_{p'_{free}})^2 + (z_{B,p_{st}} - z_{p'_{free}})^2} \quad (6)$$

$$F_{dyn} = \Delta l_{free} \cdot k_{dyn} \quad (7)$$

即求解得到动态虚拟墙带来的反馈力 F_{dyn} 。

3 基于动态冲击力反馈与实时感知规避的柔顺遥操控制方法

为实现遥操作医疗超声诊断中要求的精确性与运动柔顺性,并提高遥操作设备的操作性与操作者对于设备的感知能力,针对机器人执行端在遥操作过程中的抖动问题,利用机器人逆运动学和拉格朗日动力学等方法,对机器人抖动原因进行分析讨论,并提出了一种基于遥操动态补偿的机械臂柔顺随动控制策略。

3.1 遥操作机器人冲击抖动原理分析

图6为遥操作设备的运动曲线与机器人运动曲线的映射示意图。在严格的映射关系下,操作者施加于设备的不连贯的、无规律的运动轨迹也将映射为机器人运动点的对应轨迹。这条映射后的轨迹将保留不连贯与无规律的特点。

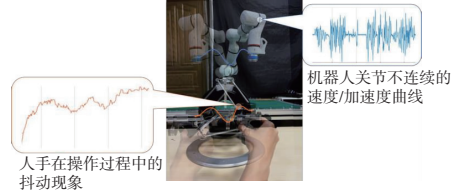


图6 操作者施加运动曲线与机器人的映射点曲线

图6同时揭示了拟定的遥操作柔顺运动曲线与机器人关节运动曲线的对应关系。在理想状态下,遥操作设备向系统输入一条柔顺的运动曲线,经过位姿映射算法与机器人运动学逆解得到的机器人关节速度以及加速度曲线仍然是不连续的。

在机器人关节的运动过程中,若其速度曲线不连续或加速度绝对值过大,在速度间断点处会产生对于机器人的刚性冲击;若其加速度曲线不连续或加速度导数绝对值过大,在加速度间断点处会产生对于机器人的柔性冲击。由以上分析可知,设备之间的运动学异构会导致难以预测的关节运动曲线,其存在的间断点将引发关节电机上的刚性冲击与柔性冲击,从而使运动中的机器人呈现抖动的不良状态。

为了追求操作人员对临场的感知效果,提高遥操作系统完成复杂任务的能力,许多遥操作系统都采用了双边力反馈技术。这项技术建立控制端到执行端的正向力反馈路径,或执行端到控制端的反向力反馈路径,从而使得操作人员感知到现场力。在遥操作设备与机器人异构的情况下,应构建力-位置架构的力反馈方式。一方面,对于遥操作设备所提供的位置与速度信息,机器人映射点与外

部接触力大小采用比例-微分(PD)控制器进行导纳控制;另一方面,通过在机器人映射点上安装力传感器,遥操作设备上的力大小将与力传感器的数值保持一致,以此构建了遥操作设备与机器人之间的双向力反馈路径,其关系如下:

$$\begin{cases} F_m = F_{\text{sensor}} \\ F_s = -K_s(p_s - p_{sd}) - B_s(\dot{p}_s - \dot{p}_{sd}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: d 为期望; K 为位置增益系数; B 为速度增益系数;期望位移 p_{sd} 与期望速度 \dot{p}_{sd} 均在遥操作设备中读取。

式(8)表明,虽然双边力反馈机制能较好地使操作者感受到机器人映射点的受力状态,但是在机器人外部力较小的笛卡儿空间运动情况下,机器人映射点的位移 p_s 、速度 \dot{p}_s 与期望的位移 p_{sd} 、速度 \dot{p}_{sd} 差值较小,经过系统循环后得到的反馈力 F_m 使冲击抖动现象的反馈会显得乏力。此外,在没有后驱设计的机器人上,仅基于机器人力传感器设计的力反馈机制则无法对冲击抖动现象进行有效反馈。因此,系统需要一种新的方法帮助操作者实现对机器人的柔顺控制。

3.2 融合动态冲击反馈的双边力反馈与实时感知规避的柔顺遥操作控制方法

如图7所示,对于前文提及的遥操作机器人抖动问题,其控制方法将冲击以力的形式进行反馈,力的方向将与操作者输入的速度方向相反,以达到使操作者实时感知的效果;操作者实时感知后对机器人运动的速度、加速度间断点进行实时规避。整个过程包括建立操作者输入功与机器人输出功的功能反馈映射关系;微分近似计算单位时间内机器人输出功与操作者输入功;利用余弦定理、功能反馈映射关系迭代计算求解遥操作设备反馈力,完成将机器人受到的冲击转化为遥操作设备反馈力的过程;最终将反馈力融入原有双边力反馈机制,得到融合动态冲击反馈的双边力反馈方法。

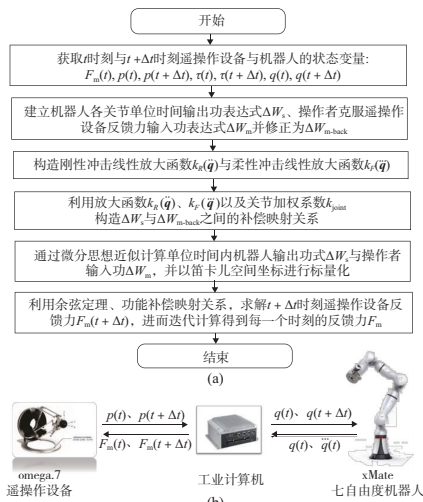


图7 遥操作设备的融合动态冲击反馈力的推导方法

式(9)分别为单位时间内操作者输入功 ΔW_m 以及机器人输出功 ΔW_s 的表达式:

$$\begin{cases} \Delta W_m = \int_t^{t+\Delta t} F_m(t) dp \\ \Delta W_s = \int_t^{t+\Delta t} \tau(t) dq \end{cases} \quad (9)$$

$$|F_{m_back}(t+\Delta t) + F_{m_back}(t)| = \frac{k_{R_joint} \cdot k_R(\ddot{q}) \cdot k_{F_joint} k_F(\ddot{q}) \cdot |\tau(t) + \tau(t+\Delta t)| \cdot |q(t) + q(t+\Delta t)|}{|p(t+\Delta t) - p(t)|} \quad (17)$$

为达到操作者在使用遥操作设备时感知到机器人的冲击带来的反馈效果,应将 ΔW_m 放大调整为 ΔW_{m_back} 。

对于不同构型的机器人,假定其自由度为 n 。根据刚性冲击与柔性冲击产生的原因以及对不同构型机器人抖动现象的影响效果,设定刚性冲击比例系数 a 与柔性冲击比例系数 b ,进而构造刚性冲击线性放大函数 $k_R(\ddot{q})$ 以及柔性冲击线性放大函数 $k_F(\ddot{q})$,其中 \ddot{q} 是由机器人各个关节的关节角加速度形成的 $n \times 1$ 的向量, \ddot{q} 是由机器人各个关节的关节角加速度导数形成的 $n \times 1$ 的向量。

$$\begin{cases} k_R(\ddot{q}) = a \cdot \ddot{q} \\ k_F(\ddot{q}) = b \cdot \ddot{q} \end{cases} \quad (10)$$

考虑到机器人不同关节受到数值相同的冲击时,机器人整体表现出不一致的抖动效果,故设定各个关节的 $n \times 1$ 加权系数向量,对刚性冲击与柔性冲击分别表示为 k_{R_joint} 、 k_{F_joint} 。结合式(10),建立 ΔW_s 与 ΔW_{m_back} 之间的映射关系:

$$\Delta W_{m_back} = -k_{R_joint} \cdot k_R(\ddot{q}) \cdot k_{F_joint} \cdot k_F(\ddot{q}) \cdot \Delta W_s \quad (11)$$

取 Δt 为一充分小的值,将机器人输出功 ΔW_s 与操作者输入功 ΔW_{m_back} 分别表示为向量点积形式。

$$\begin{cases} \Delta W_s = \tau(\Delta t) \cdot \Delta q(t) = \left[\frac{\tau(t+\Delta t) + \tau(t)}{2} \right] \cdot [q(t+\Delta t) - q(t)] \\ \Delta W_{m_back} = F_{m_back}(\Delta t) \cdot \Delta p(t) = \left[\frac{F_{m_back}(t+\Delta t) + F_{m_back}(t)}{2} \right] \cdot [p(t+\Delta t) - p(t)] \end{cases} \quad (12)$$

式中back代表经过冲击反馈处理的数据。

进一步地,对 ΔW_{m_back} 进行处理,由点积定义将向量点积形式转化为向量模与向量夹角相乘的形式:

$$\Delta W_{m_back} = - \left| \frac{F_{m_back}(t+\Delta t) + F_{m_back}(t)}{2} \right| \cdot |p(t+\Delta t) - p(t)| \quad (13)$$

类似地,对 ΔW_s 进行标量化处理,有

$$\Delta W_s = \left| \frac{\tau(t+\Delta t) + \tau(t)}{2} \right| \cdot |q(t+\Delta t) - q(t)| \quad (14)$$

将进一步计算所需向量在笛卡儿空间坐标系中分解,得:

$$\begin{cases} F_{m_back}(t) = [x_{F_{m_back}}(t), y_{F_{m_back}}(t), z_{F_{m_back}}(t)]^T \\ F_{m_back}(t+\Delta t) = [x_{F_{m_back}}(t+\Delta t), y_{F_{m_back}}(t+\Delta t), z_{F_{m_back}}(t+\Delta t)]^T \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} p(t) = [x_p(t), y_p(t), z_p(t)]^T \\ p(t+\Delta t) = [x_p(t+\Delta t), y_p(t+\Delta t), z_p(t+\Delta t)]^T \end{cases} \quad (16)$$

将标量化后的 ΔW_s 代入 ΔW_s 与 ΔW_{m_comp} 之间的映射关系,即可将 $|F_{m_back}(t+\Delta t) + F_{m_back}(t)|$ 求出:

记 α 为向量 $F_{m_back}(t)$ 与向量 $F_{m_back}(t+\Delta t)$ 形成的夹角,它们分别与已知的操作者操作遥操作设备的速度向量 $\dot{p}(t)$ 和 $\dot{p}(t+\Delta t)$ 方向相反,即

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{F_{m_back}^2(t) + [F_{m_back}(t) + F_{m_back}(t+\Delta t)]^2 - F_{m_back}^2(t+\Delta t)}{2 \cdot |F_{m_back}(t)| \cdot |F_{m_back}(t) + F_{m_back}(t+\Delta t)|} \quad (19)$$

将上式中的 $|F_{m_back}(t+\Delta t)|$ 进行整理分离:

$$|F_{m_back}(t+\Delta t)| = \sqrt{F_{m_back}^2(t) + [F_{m_back}(t) + F_{m_back}(t+\Delta t)]^2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot |F_{m_back}(t)| \cdot |F_{m_back}(t) + F_{m_back}(t+\Delta t)|} \quad (20)$$

设 $\dot{p}(t+\Delta t)$ 的方向余弦分别为 $\cos\alpha_{\dot{p}(t+\Delta t)}$, $\cos\beta_{\dot{p}(t+\Delta t)}$, $\cos\gamma_{\dot{p}(t+\Delta t)}$, $F_{m_back}(t+\Delta t)$ 如式(21)所示。通过迭代计算,即可得到每一时刻的冲击反馈力 F_{m_back} :

$$F_{m_back}(t+\Delta t) = |F_{m_back}(t+\Delta t)| \cdot [\cos\alpha_{\dot{p}(t+\Delta t)}, \cos\beta_{\dot{p}(t+\Delta t)}, \cos\gamma_{\dot{p}(t+\Delta t)}]^T \quad (21)$$

将计算得到的冲击反馈力与原有双边力反馈的力传感器数值进行结合,优化原有双边力反馈机制,得到融合了动态冲击反馈的双边力反馈方法,如式(22)所示。

$$\begin{cases} F_m = F_{\text{sensor}} + F_{m_back} \\ F_s = -K_s(p_s - p_{sd}) - B_s(\dot{p}_s - \dot{p}_{sd}) \end{cases} \quad (22)$$

4 实验验证

本文所搭建的遥操作机器人医疗超声系统如图8所示,其中包括了 Rokae xMate3 Pro 协作机器人、Force Dimension omega.7、末端六维力传感器、B 超探头等构成。

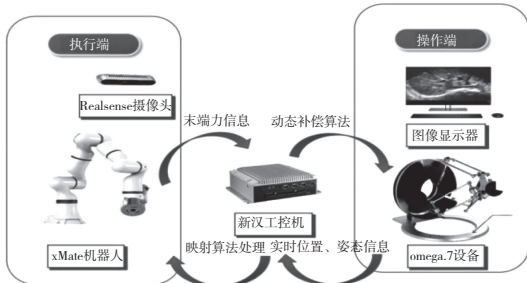


图8 遥操作医疗超声系统

本文基于以上的算法进行了机器人医疗超声平台实验:操作者手持 omega.7 遥操作设备,向系统输入运动信息;运动过程中操作者可以通过 Intel Realsense 相机实时观察索诺星无线超声探头与人体模型的接触情况;同时,索诺星超声探头将实时超声画面传输到手机、平板电脑等设备中,供操作者对病灶部位进行观察与诊断,如图9所示。



图9 遥操作机器人医疗超声平台

在运动过程中受到冲击的情况下,操作者成功完成了实时感知规避。实验结果表明,基于动态冲击力反馈与实

$$\alpha = \arccos \frac{\dot{p}^2(t+\Delta t) + \dot{p}^2(t) - [\dot{p}(t+\Delta t) - \dot{p}(t)]^2}{2 \cdot |\dot{p}(t+\Delta t)| \cdot |\dot{p}(t)|} \quad (18)$$

根据平行四边形法则,可得

5 结语

本文针对遥操作医疗检测系统中缺乏动态安全稳定控制问题,搭建了一套基于遥操作机器人的医疗超声检测系统,实现了临场感的双边力反馈控制与柔顺操作,通过实验结果表明,所设计的遥操作机器人的医疗超声检测系统可实现临场感的双边力反馈控制与柔顺操作,可用于医疗领域的遥操作超声诊断,并对远程遥操作的发展有重大的意义。

参考文献:

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.
- [2] 杜红波,吕群蓉,邹小明,等. 第三方远程医疗模式的伦理困境和对策[J]. 医学与哲学,2018,39(3):32-33,97.
- [3] 吴盛正,李柯研,彭成忠,等. 5G 远程机器人超声评估方舱医院隔离病房新冠肺炎心肺功能 1 例[J]. 临床超声医学杂志,2020,22(3):228-232.
- [4] 尹立雪,周鸿,金梅,等. 新型冠状病毒肺炎肺部超声检查及远程诊断实施方案(第一版)[J]. 中华医学超声杂志(电子版),2020,17(3):213-225.
- [5] 康辉,伍利,熊奕,等. 5G 远程超声诊断:提升医疗质量、安全和可及性[J]. 医学与哲学,2020,41(20):21-25.
- [6] 刘义灏,吕发勤,黎檀实. 5G 超声时代来临:远程超声应用的现状及进展[J]. 中华医学超声杂志(电子版),2019,16(4):241-243.
- [7] SHERIDAN T B, FERRELL W R. Remote manipulative control with transmission delay[J]. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics,1963,4(1):25-29.
- [8] TAYLOR R H, STOIANOVICI D. Medical robotics in computer-integrated surgery [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,2003,19(5):765-781.
- [9] 朱昊天. 多自由度医疗机器人主操作手关节电机控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [10] 赵新刚,段星光,王启宁,等. 医疗机器人技术研究展望[J]. 机器人,2021,43(4):385.
- [11] 佚名. 澳研发医疗机器人:可为千千米外病人照超声波[J]. 防灾博览,2016(4):89.
- [12] 白文坤,陈文颖,李艳平,等. 远程超声机器人临床应用体验评价[J]. 肿瘤影像学,2020,29(3):299-302.
- [13] GOMES P. Surgical robotics; reviewing the past, analysing the present, imagining the future [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2011,27(2):261-266.
- [14] GUO J, LIU C, POIGNET P. A scaled bilateral teleoperation system for robotic-assisted surgery with time delay[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2019,95(1):165-192.
- [15] BRIZZI F, PEPPOLONI L, GRAZIANO A, et al. Effects of augmented reality on the performance of teleoperated industrial assembly tasks in a robotic embodiment[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems,2018,48(2):197-206.

收稿日期:2022-12-07