

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514631

面向穿刺手术机器人主从控制的快速构建方法*

左思浩¹, 赵燕江^{1,2}, 张永德¹, 叶乐³, 段海龙¹

(1. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学威海研究院 威海 264300; 3. 上海交通大学医学院附属仁济医院 上海 200127)

摘要:主从控制是实现机器人辅助穿刺操作控制的关键方式之一。然而,由于穿刺辅助机器人感知和反馈方式的复杂性和差异性,手术机器人系统主从控制的快速构建存在很大的挑战。故提出一种面向穿刺手术机器人主从控制的快速构建方法,实现主从运动映射的快速构建和主从控制的快速实施。建立物体运动坐标系,并定义和构建物体运动映射坐标变换的相对位置变换链,实现对物体运动坐标变换的显性表达和运动映射的快速构建;进一步提出基于直观性映射模型的主从运动映射快速构建策略,针对多种感知反馈的从手对象,快速构建主从运动映射的相对位置变换链,实现主从控制多重坐标变换的运算,进而快速实现定制化和多样化的主从控制。进行实验研究,利用提出的主从控制快速构建方法分别对两种主手对象和两种从手对象的 4 种主从控制进行快速构建与实施。实验结果表明:主从控制映射的快速构建策略,可以实现对多种感知反馈主从运动映射的快速构建,得到了 4 种主从运动映射的相对位置变换链,每一种变换链表示一种独立的主从控制,以适应不同应用场景的需求;通过相对位置变换链的多重坐标变换的控制计算,实现了主从控制的快速实施,验证了所提的主从控制快速构建方法的可行性与实用性。

关键词: 机器人辅助; 穿刺手术; 主从控制; 快速构建; 运动相对位置变换链

中图分类号: TH242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

Rapid construction method for master-slave control of surgical insertion robots

Zuo Sihao¹, Zhao Yanjiang^{1,2}, Zhang Yongde¹, Ye Le³, Duan Hailong¹

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Weihai Research Institute, Harbin University of Science and Technology, Weihai 264300, China; 3. Renji Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200127, China)

Abstract: Master-slave control is one of the key methods for realizing the control of robot-assisted puncture operations. However, due to the complexity and diversity of puncture-assisted robots as well as their sensing and feedback methods, there exist significant challenges in the rapid construction of master-slave control for surgical robot systems. This paper proposes a rapid construction method for master-slave control of puncture surgical robots, which enables a rapid construction of the master-slave motion mapping and a rapid implementation of the master-slave control. Firstly, a coordinate system for the object motion is established, and the relative position transformation chain for the coordinate transformations of object motion mapping is further defined and constructed to realize explicit expression of the coordinate transformations of the object motions, and thus achieving the rapid construction of the motion mapping. Secondly, a rapid construction strategy for the master-slave motion mapping based on an intuitive mapping model is proposed. For the slave objects with various sensing and feedback modes, the relative position transformation chain for the master-slave motion mapping is quickly constructed to enable the calculation of the multiple coordinate transformations for the master-slave control and to further realize the rapid realization of the customized and diversified master-slave control. Experimental studies are then conducted using the proposed method, and the rapid constructions and implementations of 4 types of the master-slave control for two master objects and two slave objects are implemented, respectively. The experimental results show that: The proposed rapid construction strategy for the master-slave control

收稿日期: 2025-10-28 Received Date: 2025-10-28

* 基金项目: 国家自然科学基金(U23A20391, 52775015)、山东省自然科学基金(ZR2023ME132)项目资助

mapping can realize a rapid construction of the master-slave motion mapping with various sensing feedbacks, and 4 relative position transformation chains for the master-slave motion mapping are obtained, where each transformation chain represents an independent type of the master-slave control to accommodate the requirements of different application scenarios; through the control calculation of the multiple coordinate transformations based on the relative position transformation chains, the rapid implementation of the master-slave control is achieved, which verifies the feasibility and practicality of the proposed rapid construction method for the master-slave control.

Keywords: robot-assisted; needle insertion; master-slave control; rapid construction method; relative position transformation chain

0 引 言

穿刺操作是经皮介入治疗的关键步骤,主要应用于诊断和治疗(如活体组织检查、脓肿引流、肿瘤消融和药物投送等),并且涉及许多人体组织器官(包括乳腺、脑、前列腺和内脏等)。主从控制是机器人辅助穿刺操作控制中必不可少的方式。主从控制的构建需要考虑穿刺操作场景中人手的运动和人眼关注对象的运动(如物理空间针,图像空间针等),通过采集人手运动的传感数据来控制机器人的末端运动。在进行穿刺操作的主从控制研究中,研究者首先研究针与组织相互作用的力反馈主从控制。Abolhassani等^[1]采用一种直接力反馈架构实现了针穿刺组织的多自由度主从控制。Nisky等^[2]提出在力反馈穿刺主从控制中分别对位置和力设置比例增益的方法,以解决针在穿刺软组过程中感知和动作之间的延迟问题。Ferraguti等^[3]提出了一种基于比例微分(proportional derivative, PD)控制器的主从控制方法,实现主手端对机器人的虚拟力反馈控制。Shin等^[4]提出了一种基于双边控制器的主从控制方法,该控制器包含一个非线性状态观测器,可以实现穿刺过程中针与组织交互特征的观测。Takhmar等^[5]通过建立基于投影的力映射(projection-based force reflection, PBF)算法的主从控制,对比直接力反馈控制,具有更好的触觉的临场感。上述研究虽然实现了力反馈和多自由度穿刺的主从控制操作,但由于软组织变形的非线性问题,主从控制仍无法有效保证针与病灶在组织内相对位置的精准性。如果不引入针与组织位置感知的反馈信息,针穿刺组织的主从控制将无法进一步深入研究和应用。

因此,学者们开展基于医学图像感知反馈的主从控制。常见的引入超声图像作为实时感知信息,引导进行主从穿刺操作^[6-8]。Abayazid等^[9]结合针尖追踪和柔性针路径规划提出超声图像和虚拟3D图像的双重视觉反馈及双重力反馈的主从控制,实现柔性针规划路径引导的主从穿刺操作。Baksic等^[10]提出一种力反馈设备与3D虚拟夹具和增强荧光镜图像双重视觉反馈的主从控制。Selim等^[11]研究模拟针刺交互作用来增强触觉反馈,为医学图像引导下的主从控制提供缺失力反馈信息。Saccenti等^[12]研究利用增强显示技术构建虚拟组织和针

环境,实现引导物理场景的针刺操作。牛国君等^[13]提出了一种考虑显示器和内窥镜运动的一致性、位移增量和比例运动的主从控制方法。这些研究以医学图像引导的主从控制,使得穿刺操作可以进一步应用,但受限于针与超声探头等医学图像设备的空间约束,使得针和病灶的图像特征,难以稳定保持。因此,主从控制需要借助手术导航的空间定位,利用术前影像(如CT^[14-16]、超声^[17-18]、MRI^[19-20]、X-ray^[21])重建的三维解剖模型与术中实时影像的配准,通过空间坐标转换算法,将病灶位置与穿刺路径精准映射到机器人工作空间^[22],为穿刺操作的主从控制划定安全有效的约束边界^[23]。Siepel等^[8]提供了一个通用控制单元的主从控制框架实现了GUI对针和超声探头控制。Berger等^[24]提供一种按键式主从控制方式,控制针在超声平面约束下进行单维运动。而医生的主从操作,结合临床经验对穿刺过程进行动态调整,医生在进行临床决策时,会主观选择不同的实时图像感知反馈,并在该图像感知反馈的安全的约束空间内,进行主从控制操作。为满足医生主观选择感知反馈信息进行主从穿刺操作需求,需要构建多感知反馈的针刺操作的主从控制。

穿刺操作主从控制的关注点在于感知信息中针与病灶的相对位置,针与病灶的相对运动是由穿刺机器人的驱动机构、医学图像检测设备和病床上的病人之间的运动实现。结合穿刺操作所涉及解剖部位多^[25-27],临床手术术式复杂^[28-29],以及所兼容的环境不同(如磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI))^[30-31],机器人驱动结构^[32]存在很大的差异性,且主从控制包含感知信息中针与物理的针、感知信息中病灶与物理病灶之间复杂空间注册定位,难以构建统一主从运动映射。而采用“机器人自主定位导航+主从操作穿刺”的协同模式,进一步增加了主从运动映射变化。李陇南等^[33]利用李雅普夫函数构建有限时间约束下的主从控制方式,提高控制的稳定性和鲁棒性。姜紫阳等^[34]提出一种改进型自适应带限多线性傅里叶拟合器,来拟合不同人及不同时段引入的主手抖动信号,并补偿主从控制对抖动信号的影响。Baksic等^[10]提出基于关键动作的主从控制,让操作者来完成决策性的动作,让机器人根据虚拟夹具的轨迹来自动完成复杂的轨迹运动,包括对呼吸运动的补偿。这些研究通过利用自动控制的效果消除主从控制过程中不利影响。

综上所述,主从控制的核心逻辑是建立主端(医生操作端)与从端(穿刺机器人执行端)之间的精准交互映射,同时融合多源感知反馈实现闭环控制。而主从控制的快速构建是兼容机器人不同的硬件配置结合具体穿刺场景快速实施主从控制,为医生个性化订制主从交互方式。但是由于辅助穿刺机器人感知反馈和驱动结构的差异,加之医生对感知反馈的主观选择,造成了主从控制构建的复杂性与挑战性。目前缺少一种主从控制快速构建方法,实现个性化定义的主从控制,这也正是构建主从控制的核心问题所在。针对这个问题,提出一种主从控制快速构建方法,主要解决3个问题:1)针对机器人多种感知中多重坐标变换,如何快速定义物体的运动(包括速度和位移)的问题;2)针对不同主手输入信号和不同感知反馈信号,如何实现主从对象运动映射快速构建问题;3)如何快速实施主从控制的问题。

1 主从控制的运动分析

1.1 运动的坐标变换

对物体运动过程的3个位置建立3个坐标系,分别为 *base*、*now*、*control*,如图1所示。坐标系 *base* 表示物体基坐标系,坐标系 *now* 表示运动物体在当前位置建立的局部坐标系,坐标系 *control* 表示被控制的运动物体在下一刻要达到位置建立的坐标系, *D* 表示物体运动的位移, *V* 表示物体运动的速度。

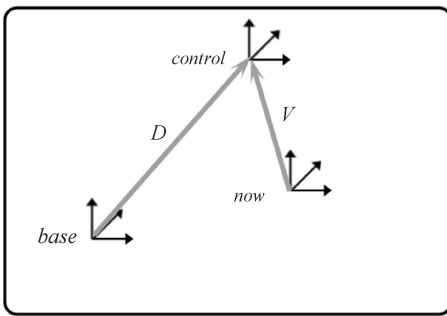


图1 物体运动的坐标系

Fig. 1 The frames of the object motion

将物体运动的位移和速度,用坐标系 *control*、*now*、*base* 之间的坐标变换来表示,下一时刻的位置 *control* 到初始位置 *base* 的坐标变换可以计算出物体的位移,下一时刻的位置 *control* 到当前位置 *now* 的坐标变换可以计算出物体的速度,即:

$$\begin{cases} D_{control} = f(T_{control}^{base}) \\ V_{control} = f(T_{control}^{now}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_{control}$ 表示物体运动的位移; $V_{control}$ 表示物体的速度; $T_{control}^{base}$ 表示物体从坐标系 *control* 到坐标系 *base* 的坐标变换; $T_{control}^{now}$ 表示虚拟主手从坐标系 *control* 到坐标系 *now* 的坐标变换。

如果两个物体 *A*、*B* 之间做主从运动,它们的位移映射为:

$$D_A = k_d \cdot D_B \quad (2)$$

式中: D_A 和 D_B 分别表示物体 *A* 和 *B* 运动的位移; k_d 表示位移映射的比例。

根据物体坐标系 *control*、*now* 和 *base* 之间的坐标变换求解物体的运动,进一步推导出,两个物体运动映射转化成坐标变换的形式,如图2所示。

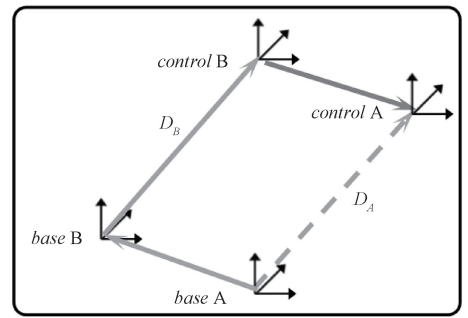


图2 两个物体位移映射的坐标变换

Fig. 2 The transformations for the displacement mapping between two objects

物体位移映射的坐标变换为:

$$T_{control A}^{base A} = T_{control A}^{control B} \cdot T_{control B}^{base B} \cdot T_{base B}^{base A} \quad (3)$$

式中: $T_{control A}^{base A}$ 表示物体 *A* 从坐标系 *control A* 到 *base A* 的坐标变换; $T_{control A}^{control B}$ 表示从物体 *A* 的坐标系 *control A* 到物体 *B* 的坐标系 *control B* 的坐标变换; $T_{control B}^{base B}$ 表示物体 *B* 从坐标系 *control B* 到 *base B* 坐标变换; $T_{base B}^{base A}$ 表示从物体 *B* 的坐标系 *base B* 到物体 *A* 的坐标系 *base A* 的坐标变换。 $T_{control A}^{control B}$ 和 $T_{base B}^{base A}$ 是齐次坐标变换矩阵 $T_{4 \times 4}$, 即:

$$T_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: 包含旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 和平移矩阵 $P_{3 \times 1}$ 。

如果 $T_{control A}^{control B}$ 和 $T_{base B}^{base A}$ 中的旋转矩阵 R 为单位矩阵表示坐标系 *control A*、*base A* 分别与坐标系 *control B*、*base B* 的方向相同,与此同时,平移矩阵的 P 相同,等同于比例系数 $k_d = 1$; 若平移矩阵 P 不同,等同于比例系数 $k_d \neq 1$ 。

根据物体位移映射转化成坐标变换的原理,将物体的速度映射转化成坐标变换的形式,如图3所示。

如果两物体 *A*、*B* 做主从运动,且它们是速度映射,即:

$$V_A = k_v \cdot V_B \quad (5)$$

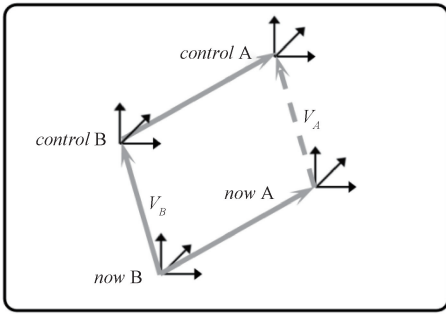


图 3 两个物体速度映射的坐标变换

Fig. 3 The transformation for the velocity mapping between two objects

式中: V_A 和 V_B 分别表示物体 A 和 B 运动的位移; k_v 表示物体 A, B 速度映射比例。

那么两个物体速度映射转化成坐标变换形式, 即:

$$T_{control A}^{now A} = T_{control A}^{control B} \cdot T_{control B}^{now B} \cdot T_{now B}^{now A} \quad (6)$$

式中: $T_{control A}^{now A}$ 表示物体 A 从坐标系 *control A* 到 *now A* 的坐标变换; $T_{control A}^{control B}$ 表示从物体 A 的坐标系 *control A* 到物体 B 的坐标系 *control B* 之间的坐标变换; $T_{control B}^{now B}$ 表示物体 B 从坐标系 *control B* 到 *now B* 的坐标变换; $T_{now B}^{now A}$ 表示从物体 B 的坐标系 *now B* 到物体 A 的坐标系 *now A* 的坐标变换。

1.2 相对位置变换链的构建

根据坐标系 A 到 B 坐标变换, 将从 A 到 B 相对位置关系定义为相对位置单元 (A - B), 进一步的, 根据坐标变换 $T_A^B = T_A^C \cdot T_C^B$ 的相对位置关系定义为相对位置变换链, 符号表示为:

$$(A - B) = (A - C) \oplus (C - B) \quad (7)$$

式中: (A - B)、(A - C) 和 (C - B) 分别表示 A 相对于 B、A 相对于 C 和 C 相对于 B 的相对位置单元, 分别对应一个坐标变换; 符号 \oplus 定义为相对位置变换链的加法操作 (类似于向量在几何上的加法操作), 相当于坐标变换矩阵计算的点积操作。

将物体 A、B 的主从运动映射用相对位置变换链进行构建, 实现对坐标变换的显性表达和运动映射的快速构建。位移映射的相对位置变换链可根据式 (3) 的坐标变换来构建, 即:

$$(control A - base A) = (control A - control B) \oplus (control B - base B) \oplus (base B - base A) \quad (8)$$

同理, 速度映射的相对位置变换链是根据式 (6) 来构建, 即:

$$(control A - now A) = (control A - control B) \oplus (control B - now B) \oplus (now B - now A) \quad (9)$$

如果有 n 个物体的集合 $E = [E_1, \dots, E_i, \dots, E_n]$, 且它们存在多个位移映射约束, 即:

$$D_{E_0} = \dots = k_i \cdot D_{E_i} = \dots = k_n \cdot D_{E_n} \quad (10)$$

式中: k_1, \dots, k_n 表示多个物体连续的速度映射比例, 那么, 它们连续的坐标变换, 如图 4 所示。

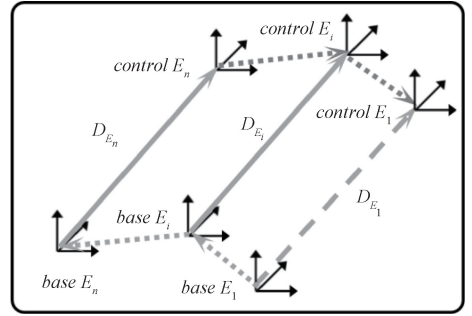


图 4 多个物体的位移变换

Fig. 4 The displacement transformations of the multiple objects

更进一步, 推导出它们的运动映射的相对位置变换链为:

$$(control E_1 - base E_1) = \sum_{i=1}^{n-1} (control E_i - control E_{i+1}) \oplus (control E_n - base E_n) \oplus \sum_{i=2}^{n-1} (base E_i - base E_{i+1}) \quad (11)$$

同理, 它们存在多个物体的速度映射约束, 即:

$$V_{E_0} = \dots = k_i \cdot V_{E_i} = \dots = k_n \cdot V_{E_n} \quad (12)$$

可以推导出它们的相对位置变换链为:

$$(control E_1 - now E_1) = \sum_{i=1}^{n-1} (control E_i - control E_{i+1}) \oplus (control E_n - now E_n) \oplus \sum_{i=2}^{n-1} (now E_i - now E_{i+1}) \quad (13)$$

2 主从控制的快速构建方法

2.1 主从运动映射的快速构建策略

主从控制快速构建策略, 是在主从控制过程中定义了主手对象, 虚拟主手, 虚拟从手, 从手对象和机器人末端 5 个坐标系节点, 如图 5 所示, 在 5 个节点之间定义连续的主从运动映射, 并将其转化成坐标变换的相对位置变换链, 与多种感知反馈的多重坐标变换的相对位置变换链连接。

其中, 主手对象是指操作者所使用的工具自身的坐标系, 虚拟主手是根据操作者主观理解人手操运动建立的坐标系, 虚拟从手是指根据人眼观察的物体, 操作者对其主观理解运动建立的坐标系, 从手对象是指根据人眼观察的物体, 机器人感知反馈中的运动建立的坐标系, 机器人末端是指机器人驱动机构的末端建立的坐标系。

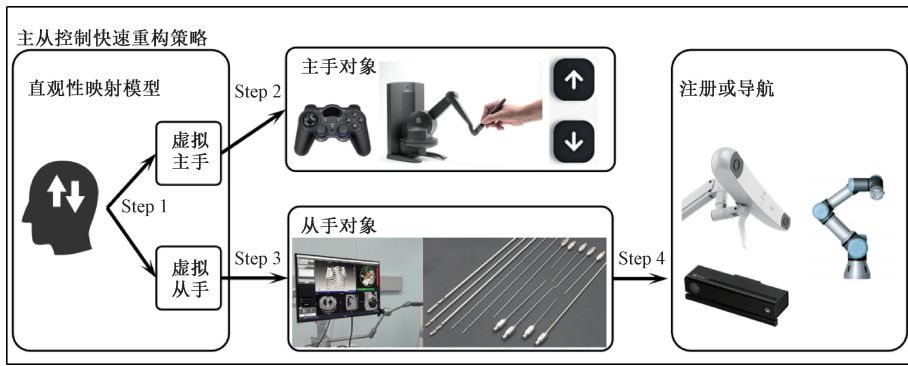


图5 主从运动映射的快速构建策略

Fig. 5 The rapid construction strategy for the master-slave master-slave motion mapping

主从运动映射的构建顺序为:

$$\begin{cases} \text{Step1: } M_{\text{virtual slave}} = M_{\text{virtual master}} \\ \text{Step2: } M_{\text{master object}} = M_{\text{virtual master}} \\ \text{Step3: } M_{\text{slave object}} = M_{\text{virtual slave}} \\ \text{Step4: } M_{\text{end-effector}} = M_{\text{slave object}} \end{cases} \quad (14)$$

式中:函数 M 表示物体运动的位移 D 和速度 V ,如式(2)和(5)所示。

图5中 Step1~4 的含义为:

Step 1 表示确定虚拟从手到虚拟主手的运动映射,也是影响主从控制直观性映射。

Step 2 表示确定主手对象到虚拟主手的运动映射,也是将实际人手运动的数据映射到人手操作工具的传感数据。

Step 3 表示确定从手对象到虚拟从手的运动映射,基于人眼观察的对象,将机器人感知反馈中的运动数据映射到操作者主观理解的运动数据上。

Step 4 表示确定机器人末端到虚拟从手的运动映射,是机器人驱动机构的末端的运动数据,经过多重坐标变换,映射到人眼观察对象的感知运动数据上。

2.2 虚拟主/从手的直观性映射模型

主从控制的直观性,是主从操作的关键影响因素。在机器人辅助穿刺操作的场景中,根据人手操作运动和人眼观察物体运动的主观理解构建虚拟主手和虚拟从手。虚拟从手到虚拟主手的运动映射是主从控制快速构建方法中对直观性的设计。但为了主从控制的完成度,在对虚拟主手和虚拟从手运动映射时,还要兼顾人手操作工具(主手对象)的传感数据和人手观察物体的感知反馈运动数据从手对象的运动。因此,提出的直观性映射模型将虚拟主手和虚拟从手位移、速度,实现4种排列的运动映射组合,利用式(9)和(10),分别推导出坐标变换和相对位置变换链的形式,得到直观性映射模板,如表1所示,使用时,可根据操作主观理解的人手操作的运动和人眼观察对象的运动,选择适合的模板。

2.3 主/从对象到虚拟主/从手的运动映射

主手对象是指人手操作的工具,如三维鼠标,游戏手柄和软件图像交互界面中的按键等,结合自身数据特征构建坐标系。这些工具传感器数据是在已经建立好的坐标系约束下,该坐标系即为主手对象坐标系。

若工具传感器数据是多个一维的,可根据主手对象特点自定义主手坐标系,并将传感器数据转化成主手坐标系下的数据,例如,游戏手柄和软件图像交互界面中的按键等。然后,进一步定义主从对象到虚拟主手的运动映射,其相对位置变换链为:

$$\begin{aligned} (\text{control virtual master} - \text{now virtual master}) = \\ (\text{control virtual master} - \text{control master object}) \oplus \\ (\text{control master object} - \text{now master object}) \oplus \\ (\text{now master object} - \text{now virtual master}) \end{aligned} \quad (15)$$

从手对象是基于人眼观察的物体,如物理场景中的针尖,图像中的针尖,或知识型约束或几何约束中的针尖,这是由操作者主观选择物体。而从手对象的运动数据是该物体在机器人感知反馈中的运动数据。

从手对象是根据操作者意愿从机器人中选择感知反馈对象,其运动数据是直接由机器人感知模块提供的,在这同一个感知反馈对象上,而虚拟主手,是根据操作者主观理解的运动来定义。从手对象和虚拟从手运动映射,是指根据人眼观察理解的物体运动求解出在机器人感知空间中物体运动,若它们的运动映射是速度映射,其相对位置变换链为:

$$\begin{aligned} (\text{control slave object} - \text{now slave object}) = \\ (\text{control slave object} - \text{control virtual slave}) \oplus \\ (\text{control virtual slave} - \text{now virtual slave}) \oplus \\ (\text{now virtual slave} - \text{now slave object}) \end{aligned} \quad (16)$$

2.4 机器人末端到从手对象运动映射

从手对象是从感知反馈的运动数据,与机器人末端运动映射,刚好是机器人注册或导航等感知方法的多重坐标变换的结果。根据机器人注册或空间定位等感知

表 1 直观性映射模板
Table 1 Intuitive mapping template

运动映射	坐标变换运算	相对位置变换链	坐标系示意图
$D_{virtual\ slave} = k_1 \cdot D_{virtual\ master}$	$T_{control\ virtual\ slave}^{base\ virtual\ slave} = T_{control\ virtual\ slave}^{control\ virtual\ master} \cdot T_{control\ virtual\ slave}^{base\ virtual\ master}$	$(control\ virtual\ slave - base\ virtual\ slave) = (control\ virtual\ slave - control\ virtual\ master) \oplus (control\ virtual\ master - base\ virtual\ master) \oplus (base\ virtual\ master - base\ virtual\ slave)$	
$D_{virtual\ slave} = k_2 \cdot V_{virtual\ master}$	$T_{control\ virtual\ slave}^{base\ virtual\ slave} = T_{control\ virtual\ slave}^{control\ virtual\ master} \cdot T_{control\ virtual\ slave}^{now\ virtual\ master}$	$(control\ virtual\ slave - base\ virtual\ slave) = (control\ virtual\ slave - control\ virtual\ master) \oplus (control\ virtual\ master - now\ virtual\ master) \oplus (now\ virtual\ master - base\ virtual\ slave)$	
$V_{virtual\ slave} = k_3 \cdot V_{virtual\ master}$	$T_{control\ virtual\ slave}^{now\ virtual\ slave} = T_{control\ virtual\ slave}^{control\ virtual\ master} \cdot T_{control\ virtual\ slave}^{now\ virtual\ master}$	$(control\ virtual\ slave - now\ virtual\ slave) = (control\ virtual\ slave - control\ virtual\ master) \oplus (control\ virtual\ master - now\ virtual\ master) \oplus (now\ virtual\ master - now\ virtual\ slave)$	
$V_{virtual\ slave} = k_4 \cdot D_{virtual\ master}$	$T_{control\ virtual\ slave}^{now\ virtual\ slave} = T_{control\ virtual\ slave}^{control\ virtual\ master} \cdot T_{control\ virtual\ slave}^{base\ virtual\ master}$	$(control\ virtual\ slave - now\ virtual\ slave) = (control\ virtual\ slave - control\ virtual\ master) \oplus (control\ virtual\ master - base\ virtual\ master) \oplus (base\ virtual\ master - now\ virtual\ slave)$	

方法中,可将从手对象到机器人末端运动坐标变换定义为 $T_{perception}$,则有:

$$T_{slave\ object}^{robot} = T_{perception} \quad (17)$$

进一步的,同时拓展到物体运动过程中坐标 *control*、*now* 和 *base* 这 3 个层面上,如式 (18) 所示。

$$T_{control\ slave\ object}^{control\ robot} = T_{now\ slave\ object}^{now\ robot} = T_{base\ slave\ object}^{base\ robot} = T_{perception} \quad (18)$$

在机器人中,从手对象的运动是由机器人末端运动来实现,机器人末端到从手对象运动映射的目标求解出机器人末端的运动,若是运动映射为速度映射,则坐标变换的形式为:

$$T_{control\ robot}^{now\ robot} = T_{perception}^{-1} \cdot T_{control\ slave\ object}^{now\ slave\ object} \cdot T_{perception} \quad (19)$$

实际临床需要考虑穿刺过程中软组织变形非线性干扰或者模型预测等,因此可将相关补偿构建在坐标变换中,在将进行补偿的位置到机器人末端的坐标变换定义为 $T_{compensation}$,而从手对象到补偿的位置的坐标变换可定义为 $T_{perception}$,则有:

$$T_{slave\ object}^{robot} = T_{compensation} \cdot T_{perception} \quad (20)$$

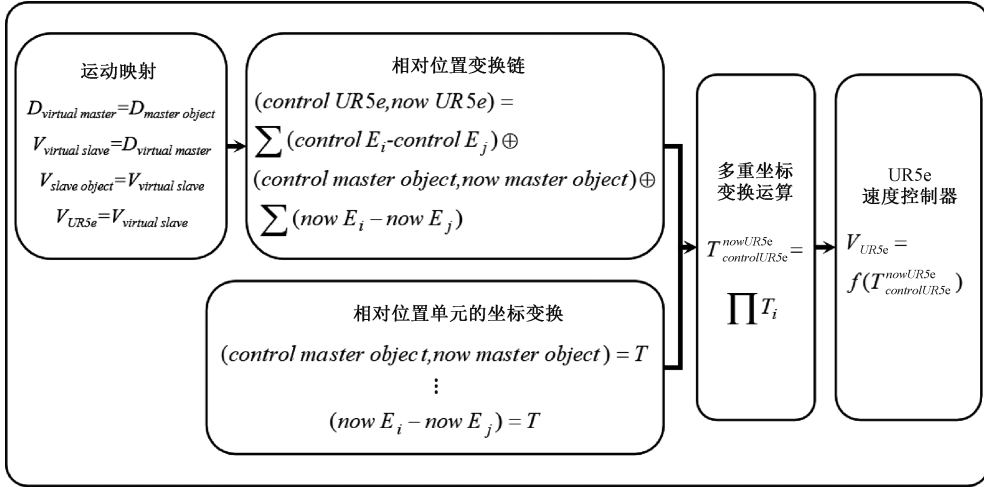


图 6 主从控制的快速实施

Fig. 6 Fast implementation of the master-slave control

实现主从控制的快速实施,具体过程为:

- 1) 根据虚拟主/从手,主/从手对象和机器人末端,确定它们的运动 $M(D$ 或者 $V)$,根据式 (14) 设置每个步骤的运动映射;
- 2) 根据式 (10) 和 (11),将过程 1) 中的结果转化运动参数的相对位置变换链;
- 3) 为过程 2) 相对位置变换链中的每个相对位置单元分别确定其坐标变换矩阵;
- 4) 根据过程 2) 的相对位置变换链,完成多重坐标变换计算。为了优化坐标变换的计算效率,对齐次坐标变换矩阵进行降维处理,并将欧拉角的旋转矩阵转化成四元数进行旋转变换计算,以减少运算次数;
- 5) 将过程 4) 输出的坐标变换转换成运动 M ,用于控制指令。

3 主从控制快速构建实验

选择两种主手对象和两种从手对象,快速构建主从控制,根据主手对象和从手对象的特点,选择适配的直观性映射模板,分别设计出相对位置变换链,验证主从控制的快速构建。根据相对位置变换链的多重坐标变换计算,并应用实时控制系统中,来实现多种交互方式。

2.5 基于相对位置链的主从控制快速实施

相对位置变换链是主从运动映射快速构建的输出,其中包含的每个相对位置单元对应一个坐标变换矩阵,它是根据实际穿刺机器人系统来定义。相对位置变换链,调用离散的相对位置单元对应的坐标变换矩阵,来计算多重坐标变换。

基于相对位置变换链的主从运动映射的多重坐标变换计算,如图 6 所示。

3.1 实验环境

实验平台选择 ROS2, Moveit2 和通用机器人 (universal robots) 开发工具包的软件框架,硬件选择机械臂 UR5e 作为从手对象,选择 3D 鼠标 Touch X (3D systems, Inc.) 和游戏手柄作为主手对象,选择 kinect V2 提供视觉空间。利用 ROS2 平台上硬件开源驱动包调用硬件数据,然后利用 moveit_servo 包发布 UR5e 的控制参数话题实现对 UR5e 的运动控制。

3.2 实验设置

主从控制的构建实验选择两个主手对象和两个从手对象,如表 2 所示。

表 2 主手对象和从手对象的选择
Table 2 Selection of master objects and slave objects

主手对象	从手对象
Touch X	物理空间针 (Physical Needle)
游戏手柄 (Joystick)	图像空间针 (Image Needle)

利用排列组合快速构建了 4 种主从控制方式,如图 7 所示。

4 种主从控制方式分别为:

- 1) 主手对象 Touch X 与从手对象物理空间针的主从

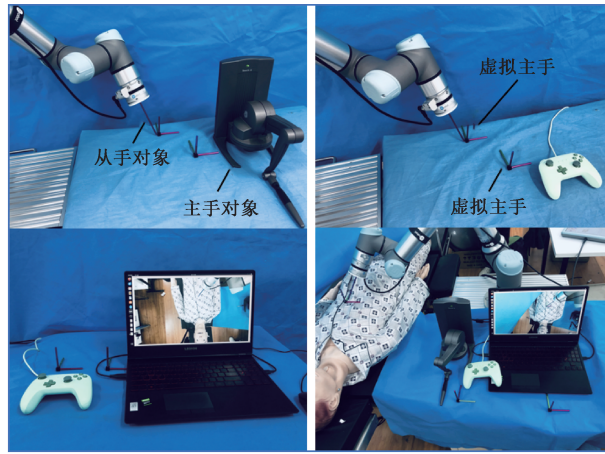


图 7 穿刺操作的 4 种主从控制

Fig. 7 Four master-slave control about the needle insertion

控制,如图 7 左上图所示,直观性模板选择的是 $V_{virtual\ slave} = V_{virtual\ master}$ 。物理空间针的参考坐标系原点始终在针尖上,方向于 UR5e 的基座坐标系保持不变。

2) 主手对象游戏手柄与从手对象物理空间针的主从控制,如图 7 右上图所示,直观性模板选择的是 $V_{virtual\ slave} = P_{virtual\ master}$ 。物理空间针的坐标系建立与第 1 种主从控制分支相同。

3) 主手对象游戏手柄与从手对象图像空间针的主从控制,如图 7 左下图所示,直观性模板选择的是 $V_{virtual\ slave} = P_{virtual\ master}$ 。

4) 主手对象 Touch X 与从手对象物理空间针的主从控制,如图 7 右下图所示,直观性模板选择的是 $V_{virtual\ slave} =$

$V_{virtual\ master}$ 。

依据上述 4 种主从控制,设置两个实验。

实验 1:根据快速构建策略构建 4 种主从控制的相对位置变换链。

实验 2:选择实验 1 中的两个相对位置变换链创建两个主从控制过程。人手在一个方向上反复进行操作运动,采集主从控制的主手对象和从手对象的坐标数据,作为主从控制的输入和输出。

3.3 实验结果

1) 实验 1

实验 1 的实验结果是 4 种主从控制的相对位置变换链,如图 8 所示。

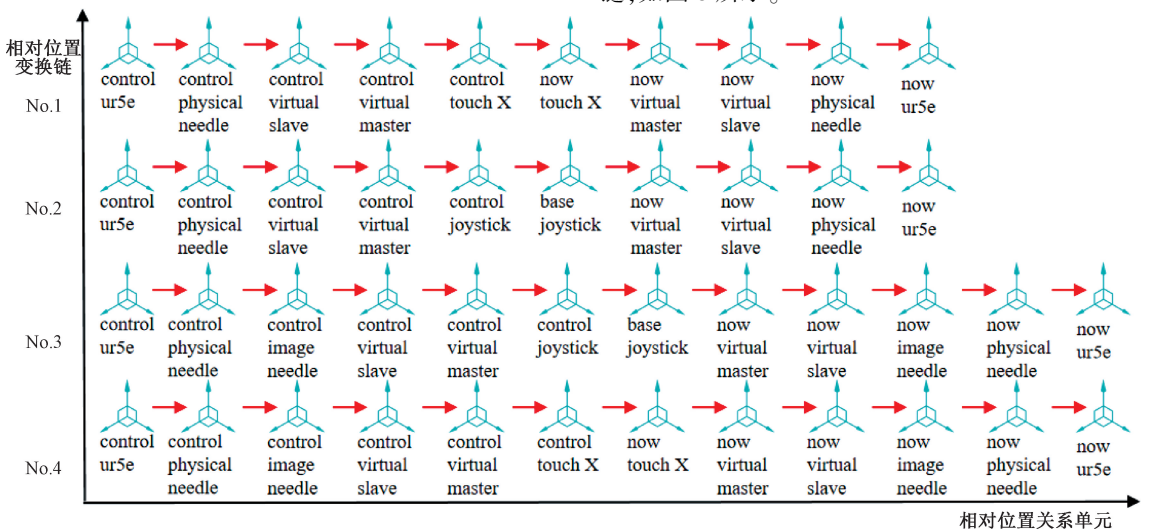


图 8 不同主从运动映射的相对位置变换链

Fig. 8 Relative position transformation chain of different master-slave motion mappings

No. 1 相对位置变换链表示第 1 种主从控制,其主手对象为 Touch X 和从手对象为物理空间针,共经历 9 重坐

标变换。

No. 2 相对位置变换链表示第 2 种主从控制,其主手

对象为游戏手柄和从手对象为物理空间针,共经历9重坐标变换。

No.3 相对位置变换链表示第3种主从控制,其主手对象为 *Touch X* 和从手对象图像空间针,共经历11重坐标变换。

No.4 相对位置变换链表示第4种主从控制,其主手对象为 *Touch X* 和从手对象为物理空间针,共经历11重坐标变换。

每个主手对象对应同一个从手对象,分别对应一个直观性映射模板,构成了两个独立的主从控制模式,进而对应两种交互方式。因此,两个主手与两个从手组合形成4种独立的主从控制模式,进而对应4种交互方式。而每一种交互方式都一个相对位置变换链。

2) 实验2

实验2的实验结果包含两种主从对象的输入的实时曲线(图9)和两种主从控制输入和输出的实时曲线(图10)。

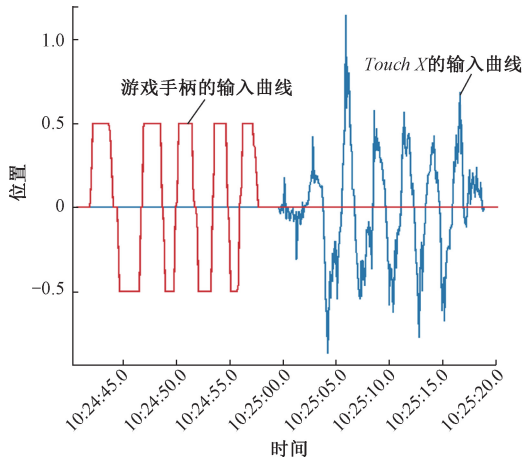


图9 两种主手对象输入的实时曲线

Fig.9 Real-time curves for the inputs of two master objects

主从对象游戏手柄的输入为图9中矩形曲线,主手对象 *Touch X* 的输入为图9中三角形曲线,分别用于主从控制输入。这表明实验获取了不同的实时数据信号,均转换成了明确虚拟主手的坐标系下的坐标,主手对象游戏手柄的传感器数据表示手柄的位移,主手对象 *Touch X* 的传感数据表示速度,分别对应两种直观性映射模板。作为主从控制的输入,图10中主从控制输入曲线奇数上边与偶数下边与图9中游戏手柄的输入曲线矩形部分和 *Touch X* 的输入曲线三角形部分是相同的。主从控制的输出为图10中的曲线奇数下边与偶数上边,与主从控制输入数据相同但方向相反。这表明主从控制的输入经过相对位置变换链多重坐标变换的计算,输出的结果是从手对象的坐标系单轴方向与虚拟主手的单轴方向相反,相当于比例系数为-1。

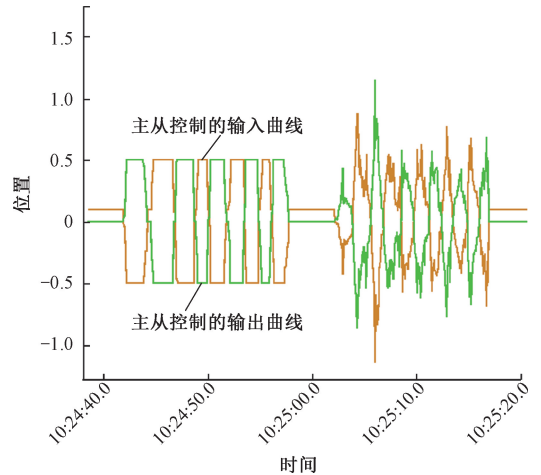


图10 两种主从控制的输入和输出的实时曲线

Fig.10 Real-time input and output curves for two types of master-slave control

3.4 结果讨论与分析

基于快速构建策略,快速实现了4种主从控制的相对位置变换链的定义,每一条独立串联的链,表示一种相对位置变换链,其对应一种主从控制方式,相对位置变换链的差异,也表示达出两种主从控制的差异性。相对位置变换链 No.1 和 No.2 的差异(*control touch X-now touch X*)和(*control joystick-base joystick*)体现了两种主从控制在主手对象的输入的不同,差异(*now touch X-now virtual master*)和(*base joystick left-now virtual master*)体现了两种主从控制的直观性映射模板的差异性,即进行主从操作时,操作者主观理解运动形式是不同的。相对位置变换链 No.2 和 No.4 的差异(*now virtual slave-now image needle*)和(*now virtual slave-now physical needle*)体现了主从控制的从手对象的差异性,即操作者观察的感知对象不同。

基于相对位置变换链实施的主从控制,使用者主从操作时实现各个位置的针尖定位。但两种主手对象所实现的主从操作效果不同,利用 *Touch X* 的主从控制可以有灵活的针尖运动轨迹优于利用游戏手柄中的主从控制的运动轨迹,但在小空间范围内,利用游戏手柄中的主从控制的主从控制通过微小移动比利用 *Touch X* 中的主从控制中主从控制更快速的定位到目标位置上。从手对象有差异的主从控制里,感知反馈图像针相比物理针中的主从控制,缺省了一个空间维度,使得针的运动仅是在相机投影面的运动。以图像针作为感知反馈的主从控制,是操作者手上移动的距离映射到图像像素上的距离。

提出主从快速构建方法的优越性体现在:

1) 多重坐标变换通过相对位置变换链的快速连接,可以快速处理机器人操作中所包含多样的定位导航和注册的感知方法;

2) 直观性映射模板可以快速实现手动工具和人眼观察对象的主观理解运动的匹配,快速完成直观性构建;

3) 不同的主从控制要求可以基于快速构建策略,构建出不同的相对位置变换链,实现不同的主从控制操作;

4) 快速构建的主从控制可以在集成化的机器人平台上,被快速部署和实施,并快速构建多种主从操作方式。

尽管如此,提出的快速重构方法,也有一些局限性,体现在:

1) 相对位置关系传递链,增加了构建运动映射的复杂度,也增加了构建感知方法中注册导航的坐标变换的复杂度;

2) 主从控制的实施,非常依赖于每相对位置单元对应的坐标变换矩阵的准确性。

4 结 论

本研究提出一种主从控制快速构建方法,实现了对多感知反馈的主从运动映射的快速构建以及主从控制快速实施。通过建立物体运动过程中的3个坐标系(*control*、*now*和*base*),将物体运动映射转化成了坐标变换的形式;采用相对位置变换链对坐标变换进行显性表达,实现了运动映射坐标变换、多感知反馈主从运动映射和机器人注册导航的多重坐标变换连接;主从运动映射的快速构建策略,定义了主/从对象、虚拟主/从手和机器人末端5个节点,结合直观性映射模型实现5个节点之间多种主从运动映射的相对位置变换链的快速构建。每种主从运动映射的相对位置变换链代表一种新的主从控制操作。相对位置关系传递链中的相对位置单元对应一个坐标变换矩阵,它们根据穿刺机器人感知信息来确定的,被不同的相对位置变换链重复调用。快速构建的相对位置关系传递链,通过相对位置单元的坐标变换矩阵,对应多重坐标变换的控制计算,实现对主从控制的快速实施。

未来研究将对基于直观性映射模板的主从控制方法的延时性、稳定性进行量化评价与对比,为得到更优的主从控制方式提供依据。同时,也将继续细化相对位置变换链中各种坐标变换矩阵的标定方法,探究标定误差对主从控制的影响。

参考文献

- [1] ABOLHASSANI N, PATEL R V. Teleoperated master-slave needle insertion[J]. *The International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery*, 2009, 5(4): 398-405.
- [2] NISKY I, PRESSMAN A, PUGH C M, et al. Perception and action in teleoperated needle insertion[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2011, 4(3): 155-166.
- [3] FERRAGUTI F, PREDA N, MANURUNG A, et al. An energy tank-based interactive control architecture for autonomous and teleoperated robotic surgery[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1073-1088.
- [4] SHIN J, ZHONG Y M, GU CH F. Master-slave robotic system for needle indentation and insertion[J]. *Computer Assisted Surgery*, 2017, 22: 100-105.
- [5] TAKHMAR A, POLUSHIN I G, TALASAZ A, et al. Cooperative teleoperation with projection-based force reflection for MIS[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1411-1426.
- [6] 孙百强,王重阳,林鹏,等. 超声引导便携式脉管穿刺机器人[J]. *中国科学院大学学报(中英文)*, 2025, 42(4): 547-553.
SUN B Q, WANG CH Y, LIN P, et al. Ultrasound-guided portable vessel puncture robot[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 42(4): 547-553.
- [7] 段星光,何睿,温浩,等. 穿刺手术机器人技术发展综述[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2025, 6(7): 1069-1079.
DUAN X G, HE R, WEN H, et al. Review of the development of percutaneous surgical robot[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2025, 6(7): 1069-1079.
- [8] SIEPEL F J, MARIS B, WELLEWEERD M K, et al. Needle and biopsy robots: A review[J]. *Current Robotics Reports*, 2021, 2(1): 1-12.
- [9] ABAYAZID M, PACCHIEROTTI C, MOREIRA P, et al. Experimental evaluation of co-manipulated ultrasound-guided flexible needle steering: Co-manipulated ultrasound-guided needle steering[J]. *The International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery*, 2016, 12(2): 219-230.
- [10] BAKSIC P, COURTECUISSÉ H, BAYLE B. Shared control strategy for needle insertion into deformable tissue using inverse Finite Element simulation[C]. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2021: 12442-12448.
- [11] SELIM M, DRESSCHER D, ABAYAZID M. Virtual needle insertion with enhanced haptic feedback for guidance and needle-tissue interaction forces[J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5560.
- [12] SACCENTI L, VARBLE N, BORDE T, et al. Integrated needle guide on smartphone for percutaneous interventions using augmented reality[J]. *CardioVascular & Interventional Radiology*, 2025, 48(7): 1042.
- [13] 牛国君,曲翠翠,潘博,等. 腹腔镜微创手术机器人的主从控制[J]. *机器人*, 2019, 41(4): 551-560.

- NIU G J, QU C C, PAN B, et al. Master-slave control of the celiac minimally invasive surgical robot [J]. *Robot*, 2019, 41(4):551-560.
- [14] 杨晓涵, 孙振, 齐岩松, 等. 图像引导下的遥操作脑室穿刺手术机器人[J]. *中国生物医学工程学报*, 2023, 42(3):311-320.
- YANG X H, SUN ZH, QI Y S, et al. Image-guided teleoperated robotic ventricular puncture system[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2023, 42(3):311-320.
- [15] 陈光彪, 付庄, 张铁锋, 等. CT导航下的机器人辅助穿刺定位方法[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(4):85-92,99.
- CHEN G B, FU ZH, ZHANG T F, et al. Robot-assisted puncture positioning methods under CT navigation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(4):85-92,99.
- [16] HE X F, XIAO Y Y, ZHANG X, et al. Low-dose CT fluoroscopy-guided interventional minimally invasive robot[J]. *Heliyon*, 2024, 10(7):28914.
- [17] 毕津滔, 张永德, 孙波涛. 基于电磁跟踪与超声图像的介入机器人穿刺导航方法及实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7):253-262.
- BI J T, ZHANG Y D, SUN B T. Puncture navigation method and experiment study of interventional robot based on electromagnetic tracking and ultrasound image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7):253-262.
- [18] 孙广开, 曲道明, 周正干. 机器人辅助激光超声检测系统及参量匹配方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8):1961-1969.
- SUN G K, QU D M, ZHOU ZH G. Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8):1961-1969.
- [19] VOGT I, EISENMANN M, SCHLÜNZ A, et al. MRI-compatible and sensorless haptic feedback for cable-driven medical robotics to perform teleoperated needle-based interventions [J]. *Internal Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2025, 20(1):179-189.
- [20] VRIES M D, WIJNTJES M, MISRA S. MR-guided HDR prostate brachytherapy with teleoperated steerable needles[J]. *Journal of Robotic Surgery*, 2023, 17(5):2461-2469.
- [21] KILLEEN B D, GAO C, OGUINE K J, et al. An autonomous X-ray image acquisition and interpretation system for assisting percutaneous pelvic fracture fixation[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2023, 18(7):1201-1208.
- [22] SCHARLL Y, RADOJICIC N, LAIMER G, et al. Puncture accuracy of robot-assisted CT-based punctures in interventional radiology: An Ex vivo study [J]. *Diagnostics*, 2024, 14(13):1371.
- [23] 段星光, 温浩, 何睿, 等. 胸腹腔经皮穿刺机器人研究进展及关键技术分析[J]. *机器人*, 2021, 43(5):567-584.
- DUAN X G, WEN H, HE R, et al. Advances and key techniques of percutaneous puncture robots for thorax and abdomen[J]. *Robot*, 2021, 43(5):567-584.
- [24] BERGER J, UNGER M, KELLER J, et al. Design and validation of a medical robotic device system to control two collaborative robots for ultrasound-guided needle insertions [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022, 9(9):875845.
- [25] HE CH Y, NGUYEN R H, FORBRIGGER C, et al. A hybrid steerable robot with magnetic wrist for minimally invasive epilepsy surgery [C]. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2023:6830-6836.
- [26] DNA S, LIM S, HASHIBA K, et al. ProBot: Robot-ultrasound probe for transrectal and transperineal prostate biopsy[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2025, 73(2):902-910.
- [27] LU J X, HUANG Z K, ZHUANG B Y, et al. Development and evaluation of a robotic system for lumbar puncture and epidural steroid injection [J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2023, 17(17):1253761.
- [28] PATEL N A, YAN J W, LEVI D, et al. Body-mounted robot for image-guided percutaneous interventions: Mechanical design and preliminary accuracy evaluation [C]. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018:1443-1448.
- [29] SHARMA S, PARK J H, AMADIO J P, et al. A novel concentric tube steerable drilling robot for minimally invasive treatment of spinal tumors using cavity and U-shape drilling techniques [C]. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2023:4710-4716.
- [30] LI J H, MA L B, MA ZH K, et al. An MRI-guided stereotactic neurosurgical robotic system for semi-enclosed head coils [J]. *Journal of Robotic Surgery*, 2024, 19(1):35.
- [31] IVAN V, KATJA E, ANTON S, et al. MRI-compatible abdomen phantom to mimic respiratory-triggered organ movement while performing needle-based interventions [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and*

Surgery, 2024, 19(12):2329-2338.

- [32] 张帆,何彦霖,周康鹏,等. 穿刺手术柔性针路径规划技术现状和展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6):1-13.
ZHANG F, HE Y L, ZHOU K P, et al. Current situation and prospect of flexible needle path planning technology for puncture surgeries[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6):1-13.
- [33] 李陇南,黄攀峰,马志强. 基于时变输出约束的机器人遥操作有限时间控制方法[J]. 机器人, 2022, 44(1):19-34, 44.
LI L N, HUANG P F, MA ZH Q. Finite-time control method for robot teleoperation based on time-varying output constraints[J]. Robot, 2022, 44(1):19-34, 44.
- [34] 姜紫阳,代煜,张建勋,等. 主从式手术机器人主手消抖方法[J]. 机器人, 2019, 41(3):327-333.
JIANG Z Y, DAI Y, ZHANG J X, et al. Tremor reduction of the master arm for master-slave surgical robot[J]. Robot, 2019, 41(3):327-333.

作者简介



左思浩, 2014年和2018年于哈尔滨理工大学分别获得学士和硕士, 现于哈尔滨理工大学攻读博士学位, 主要研究方向为医疗机器人、机器人交互控制。

E-mail: zuosihao1992@163.com

Zuo Sihao received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 2014 and 2018, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree from Harbin University of Science and Technology. His main research interests include medical robot and robotic interaction control.

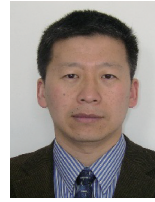


赵燕江(通信作者), 2003年于黑龙江科技学院获得学士学位, 2006年和2012年于哈尔滨理工大学分别获得硕士和博士学位, 2013~2014年在美国托马斯杰弗逊大学做博士后工作。现为哈尔滨理工大学机械动力工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为医疗机器人、多指灵巧手。

方向为医疗机器人、多指灵巧手。

E-mail: zhaoyj@hrbust.edu.cn

Zhao Yanjiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Heilongjiang Institute of Science and Technology in 2003, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 2006 and 2012, respectively. He worked as a post-doctoral research fellow during 2013 and 2014 in Thomas Jefferson University. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in School of Mechanical & Power Engineering at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include medical robot and multi-finger dexterous hand.



张永德, 分别于1988、1993和1999年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为医疗机器人、教育机器人和仿生机器人。

E-mail: zhangyd@hrbust.edu.cn

Zhang Yongde received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1988, 1993 and 1999, respectively. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include medical robot, education robot and biomimetic robot.



叶乐, 2008年于浙江温州医科大学获得学士学位, 2017年于上海交通大学医学院获得麻醉学硕士学位, 现为上海交通大学医学院附属仁济医院疼痛科医生, 主要研究方向为可视化影像引导技术, 机器人辅助超声引导的慢性疼痛的微介入治疗。

E-mail: yele@renji.com

Ye Le received his B. Sc. degree from Wenzhou Medical University in Zhejiang in 2008, and his M. Sc. degree in Anesthesiology from Shanghai Jiao Tong University School of Medicine in 2017. He currently serves as a pain specialist physician in the Department of Pain Management at Renji Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine. His main research interests include visual image-guided technology and robot-assisted, ultrasound-guided minimally invasive interventional therapy for chronic pain.