

融合远心运动机构与串联机械臂的 穿刺手术机器人系统研究

张文彬¹, 沙连森², 史文青¹, 黄锟¹, 张名琦¹, 刘斌^{1,2}

(1. 中国科学技术大学生物医学工程学院(苏州), 230026, 合肥;

2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 215000, 江苏苏州)

摘要: 针对现有穿刺手术机器人远程中心运动(RCM)无法兼顾安全性、精准性及空间有效性的问题,提出结合RCM机构和多自由度串联机械臂,研制一款混联式穿刺手术机器人系统。首先,基于双平行四边形机构设计机器人末端RCM执行机构,用于保证穿刺手术过程中远程中心运动的精度与安全性;然后,结合串联机械臂搭建穿刺手术机器人系统以保证较大的工作空间;最后,设计混联式机器人与现有基于主动式RCM约束(ARCMC)的通用串联穿刺手术机器人系统RCM的定位精度对比实验。结果表明,与基于ARCMC的机型相比,所设计穿刺辅助机器人系统的远端中心俯仰运动和翻滚运动位置误差分别降低了52.6%和59.7%,且其工作空间也远高于基于被动式RCM约束(PRCMC)设计的穿刺手术机。由此可以证明所设计的混联式穿刺手术机器人系统在穿刺手术辅助方面的性能更好。

关键词: 远程中心运动机构;辅助穿刺;手术机器人;工作空间

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307001 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0001-08

Research on Puncture Surgery Assisting Robot System Integrating Remote Center of Motion Mechanism and Serial Manipulator

ZHANG Wenbi¹, SHA Liansen², SHI Wenqing¹, HUANG Kun¹, ZHANG Mingqi¹, LIU Bin^{1,2}

(1. School of Biomedical Engineering (Suzhou), University of Science and Technology of China, Hefei

230026, China; 2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,

Chinese Academy of Science, Suzhou, Jiangsu 215000, China)

Abstract: The remote center of motion (RCM) of existing puncture surgery robots does not balance the safety, precision and space effectiveness properly. To address this problem, this paper proposes to develop a hybrid puncture surgery robot system combining the RCM mechanism and the multi-degree-of-freedom serial manipulator. Firstly, an RCM actuator at the end of the robot is designed based on the double parallelogram mechanism to ensure the precision and safety of the remote center of motion during the puncture operation. Then, to ensure a larger working space, a puncture surgery robot system is built by combining the serial manipulator. At the end, a comparative experiment about the RCM positioning precision of the new system to the ARCMC (active remote center of motion constraint)-based system is conducted, and the result shows that the

position errors of the new system in RCM pitch motion and roll motion are reduced by 52.6% and 59.7% on average compared with those of the ARCMC-based system. Besides, the proposed hybrid robot system also provides much better working space than the PRCMC (passive remote center of motion constraint)-based robot. It is concluded that the proposed hybrid puncture surgery assisting robot system delivers better performance in puncture surgery assistance.

Keywords: remote central motion mechanism; auxiliary puncture; surgical robot; workspace

微创穿刺技术是现代外科手术中较为常用的技术^[1],医生在影像和其他信息引导下,将穿刺针刺入软组织的病灶靶点,进而可以完成活检、消融、放射、局部麻醉等操作,相较传统手术,微创穿刺具备切口小、出血少、恢复快的优势^[2-4]。但是,穿刺手术的精度和治疗效果十分依赖医生的技巧和经验,且术中影像辐射也会损害医生的健康,这限制了穿刺手术的应用。机器人遥操作辅助穿刺则可以克服医生手抖、疲劳和手眼协调等原因引起的误操作,提高穿刺的稳定性和精确性,也可以降低穿刺手术对于操作医生的经验要求,并可避免射线的伤害。为避免术中穿刺针位姿调整造成创口撕裂,机器人需要提供仅有绕创口处的横滚运动、俯仰运动、沿手术器械自身轴线的平移运动和旋转运动的约束运动^[5-6]。这4个自由度的运动轴线相交于远心不动点,其余本体需要与创口点保持一定距离,这类运动被称为远程中心运动(RCM)^[7,2]。实现该RCM约束的方法主要包括基于结构的被动式RCM约束(PRCMC)和通过运动控制实现的主动式RCM约束(ARCMC)两种^[8-9]。

PRCMC方法基于球形机构、平行四边形类机构、齿轮机构等机械结构^[10-12]设计执行机构,以实现术中穿刺针的远程中心运动。基于上述结构构建的穿刺机器人结构简单、控制方便,可以提高手术的安全性^[6]。Taylor等^[13-15]首次将RCM机构用于微创手术,针对不同使用场景设计了多种RCM机构。著名的da Vinci TM (Intuitive Surgical, Inc.)^[16-17]机器人通过设计特殊的机构,实现了机器人的RCM运动。Hadavand等基于一种新的并行RCM机构设计了用于肺癌诊断治疗的微创穿刺手术机器人,该机构具备简单的运动学解析解,在工作空间内拥有较好的操作性及方向均匀性^[18]。Kim等设计了一种可以与核磁共振设备兼容的6自由度RCM微创手术执行机构^[19]。由于自身结构特性,仅基于设计的远程中心运动机构无法满足机器人手术器械前期穿刺点定位运动的要求。针对此问题,现有方案主要是将远程中心运动执行机构固定在CT/MR床

上或患者身体上进行穿刺点定位^[20]。其中,床上固定方案通常是安装在床上的 x - y - z 轴移动平台与RCM运动机构相连,通过移动滑台的三轴移动实现穿刺点定位^[18],此方法虽然所需结构简单,但存在拆卸繁琐、适应性差的问题^[20]。身体固定方案是将RCM运动机构通过与之相连的移动平台固定在患者身体上,该方法具备体积小、成本低的优点,但同时也存在穿刺部位与角度受限并会对患者造成压迫等问题^[20]。

ARCMC方法主要通过控制串联机器人运动以实现穿刺针的远程中心运动,相比基于PRCMC设计的穿刺机器人,基于多轴机械臂运动控制实现RCM约束的方案具备更高的手术操作自由度以及空间有效性^[21]。Sandoval等^[22]提出一种使多自由度机器人在任务空间和RCM约束中具备笛卡尔导纳控制(CAC)效果的运动控制方法。Aghakhani等^[21]提出了一种用于机器人RCM约束运动控制的通用运动描述,由此可相对方便地推导出实现远程中心运动约束的控制方程。通过多自由度机器人关节运动控制实现的远程中心约束,一定程度上可以增加微创手术机器人的工作空间,但RCM约束是由软件控制实现,不存在物理结构约束,因此存在控制失控导致的伤害风险。同时,基于运动控制实现的RCM约束是一个拟合逼近过程,相比基于PRCMC方案实现RCM运动,其末端定位精度较低。

为兼顾微创穿刺手术实施过程中的安全性、精准性以及空间有效性,本文提出结合RCM机构和多自由度串联机器人,研制一款混联式穿刺手术机器人,以RCM机构作为机器人末端执行机构,用于保证穿刺手术过程中远程中心运动的精度与安全性,而穿刺前的穿刺点定位则通过串联机器人运动控制实现,以此保证足够的工作空间与适应性。首先基于双平行四边形机构设计机器人末端RCM执行机构;然后搭建穿刺手术机器人系统,并通过运动学建模仿真验证穿刺机器人的工作空间;最后进行远程中心运动误差对比实验,以此验证本文设计的混联式穿刺手术机器人末端远程中心执行机构的定位精度。

1 远程中心运动执行机构设计

被动式远程中心运动约束是一种利用少自由度机构限制器械运动,实现固定虚拟转动中心的方法^[6],这种机构具有结构简单、控制方便及成本低的特点。基于双同步带的 RCM 机构是典型的 RCM 机构^[6],由于关节数少且结构紧凑而得到广泛应用,本文在进行机器人末端 RCM 执行机构设计时便使用了该结构。如图 1 所示,机构末端具有 3 个自由度,分别为绕 S_1 轴和 S_2 轴的翻滚和俯仰转动自由度以及沿着 AB 方向的移动自由度,因此手术器械可执行绕 RCM 点的摆动运动及沿 AB 方向的平移运动。

机器人末端执行机构的翻滚动作由电机 1 带动实现,俯仰动作由电机 2 带动同步带轮和同步带实现,具体的运动示意图见图 2,两个电机都连接减速器(减速比 53)以实现减速增矩。为避免减速器齿轮间隙等因素带来的误差影响,采用双编码器的方案,包含电机端的增量式编码器和输出端的绝对值编码器,前者保证电机执行时的旋转速度精度,后者保证 RCM 姿态调整时的绝对转动角度精度。通过串级闭环控制(内环速度环,外环位置环),可以同时满足执行俯仰与翻滚动作时转动速度和绝对转动角度的精度。选用的增量式编码器旋转 1 圈可以产生 4 096 个脉冲,分辨率为 1.53×10^{-3} rad,经过减速器,输出端转速分辨率为 2.89×10^{-5} rad/s,可以满足 RCM 机构对于速度控制精度的要求。绝对值编码器均为 16 位的高精度编码器,分辨率可达到 9.58×10^{-5} rad,可以满足 RCM 机构对绝对位置控制的精度要求,同时输出端的单圈绝对值编码器和结构的设计能很好地保证手术器械在穿刺手术工作空间内的运动范围要求^[10]。末端执行机构平移运动依靠 AB 方向的丝杆滑台机构来完成,伺服电机 3 安装在 A 位置,通过丝杆传动把电机的旋转运动转为直线运动实现进针,具体的示意图见图 1。为了进一步保证手术的安全性,针对编码器反馈故障、通信错误等因素导致的电机失控等情况,在机器人末端手术器械与进针驱动滑台之间安装的 ATI 公司的六维力传感器,采集术中穿刺针末端所受力,并实时与所设阈值对比,在电机出现故障导致穿刺针与软组织交互力超过该值时,停止电机转动,避免失控造成危害。

由于器械绕 AB 轴的自转在一些穿刺手术中是不需要的,若需要可额外安装电机实现此运动,因此本文设计双同步带构型的 RCM 机构可以满足穿刺任务自由度要求。

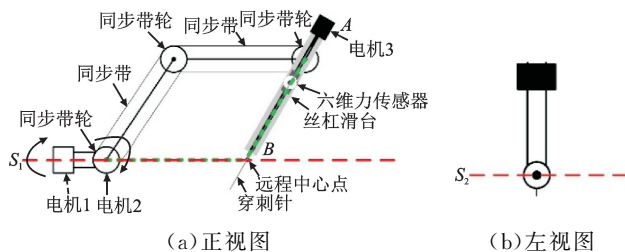


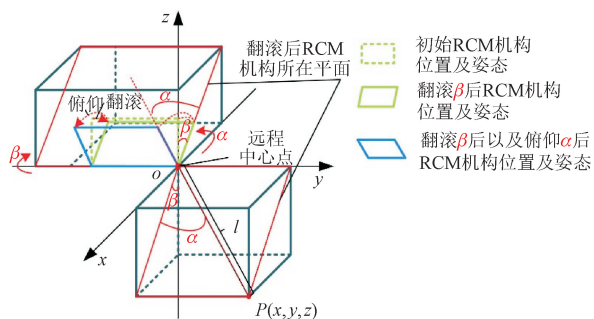
图 1 双同步带 RCM 机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of double synchronous belt RCM mechanism

如图 2 所示,以 RCM 机构的远程中心点为原点,RCM 机构初始位置两边互相垂直,以与机构初始位置两边共线的直线为 y 轴和 z 轴建立坐标系,故安装在机器人末端的穿刺针针尖 P 位置为

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha \sin \beta \\ y = l \sin \alpha \\ z = l \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为机构俯仰运动角度; β 为机构翻滚运动角度; l 为远程中心点到末端点的距离。根据文献^[10]中所提实际微创手术中的器械运动情况, α 、 β 、 l 的取值范围分别为 $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ 、 $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 、 $0 \leq l \leq 200$ mm^[10]。



α —机构俯仰运动角度; β —机构翻滚运动角度;

P —穿刺针末端位置; l —远程中心点到末端点的距离。

图 2 RCM 机构翻滚与俯仰运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the roll and pitch motion of the RCM mechanism

由式(1)可知,机构的 RCM 点($l=0$)位置始终保持在原点 o ,并不随着翻滚与俯仰动作而改变。基于蒙特卡罗法^[23],分析本文设计 RCM 机构穿刺针末端位置所能到达的位置。图 3 所示为通过 MATLAB 软件仿真得到的 RCM 机构末端穿刺靶区调整空间,发现是一个以 RCM 点为中心、顶角为 60° 的圆锥体。微创手术 95% 的操作都位于顶角为 60° 的圆锥体内^[24],且绝大多数微创手术器械的末端点到 RCM 点距离不超过 200 mm^[10]。因此,本文

设计基于双同步带的 RCM 末端执行机构可以满足工作空间任务要求。此外,由于本文设计机构的末端 RCM 运动是基于机械结构实现的,整个机构不会因为控制程序的问题导致器械运动超出上述运动空间,既保证了手术过程的安全性,也避免了基于运动控制实现远程中心运动存在的误差。

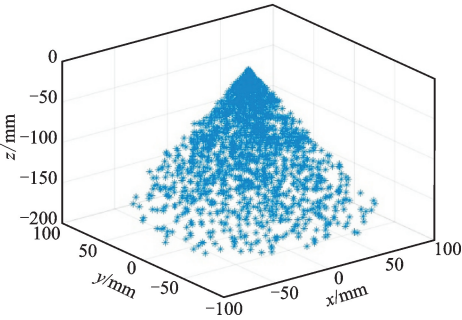


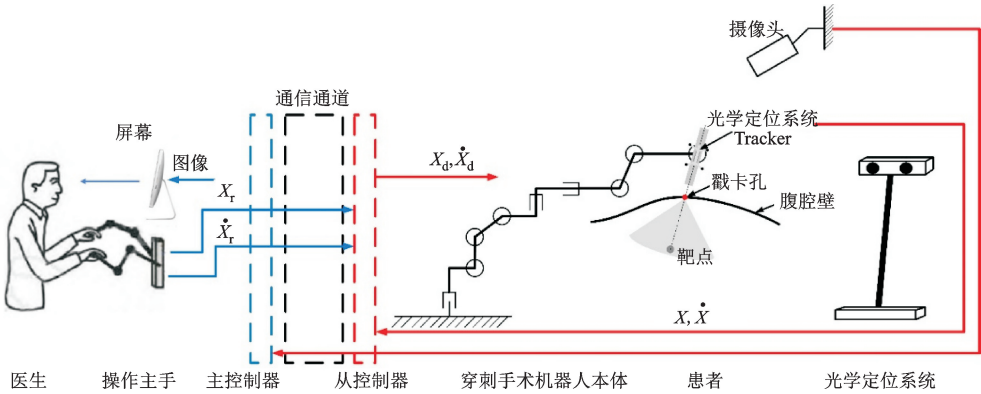
图 3 RCM 机构末端穿刺靶区调整空间

Fig. 3 Adjustment space of RCM end puncture target area

2 穿刺手术机器人系统

图 4 所示为本文设计混联式穿刺手术机器人系

统的操作示意图。在进行术中穿刺时,医生可以通过操作主手(Force Dimension 公司的 Omega. 7)远程控制穿刺针进行 RCM 调整姿态,采用的加拿大 NDI(Northern Digital Inc.)公司的 Vega ST 光学定位系统(精度为 0.12 mm),可以实时检测穿刺针位姿,医生可以通过摄像头实时关注手术现场。此外,在机器人末端穿刺针与进针驱动滑台间安装 ATI 公司的六维力传感器,通过传感器采集穿刺针与软组织间交互产生的力信号(包括 x 、 y 、 z 方向的力及绕三轴的扭矩),通过操作主手以力触觉的形式反馈给操作者,从而可以保证术中遥操作的高直觉性。图 5 所示为穿刺手术机器人本体,包括术前定位机构和末端 RCM 执行机构。其中,术前定位机构包括 5 个主动旋转关节,通过多关节的协调运动可以实现较大工作空间内的穿刺点定位,末端 RCM 机构包括俯仰、翻滚以及器械方向平移 3 个自由度。图 6 所示为机器人结构简图,基于 D-H 模型可以建立机器人运动学模型。基于上述设计方案完成了穿刺手术机器人系统,具体如图 7 所示。



$X_r, \dot{X}_r$ —操作主手的位置和运动速度; $X, \dot{X}$ —穿刺手术机器人本体末端的实际位置和速度;

$X_d, \dot{X}_d$ —机器人控制从控制器发出的机器人期望运动位置和速度。

图 4 混联式穿刺手术机器人系统操作示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the operation of the hybrid puncture surgery robot system

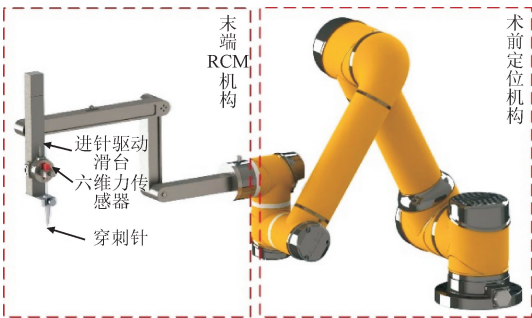


图 5 混联式穿刺手术机器人本体

Fig. 5 Hybrid puncture surgery robot body

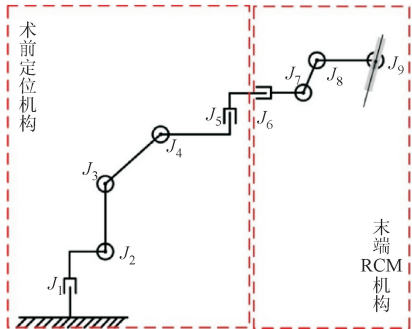


图 6 混联式穿刺手术机器人本体简图

Fig. 6 Schematic diagram of the hybrid puncture robot body

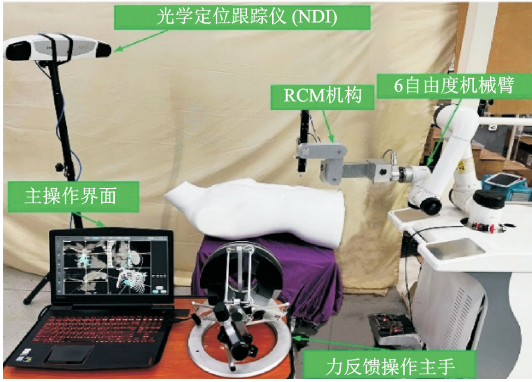


图 7 穿刺手术机器人系统
Fig. 7 Puncture surgery robot system

3 实验与结果

基于蒙特卡罗法^[23]对本文设计混联式机器人进行工作空间分析,结果如图 8 所示。由图可知,本系统末端工作空间最大能达到 1 171 mm,而现有基于 PRCMC 方案设计的穿刺手术机器人(床体固定式^[25-26]及身体固定式^[18])的工作空间仅有 200 mm,远小于本文设计机器人,较大的工作空间将保证本文设计机器人具备较强的人体穿刺手术场景适应性。

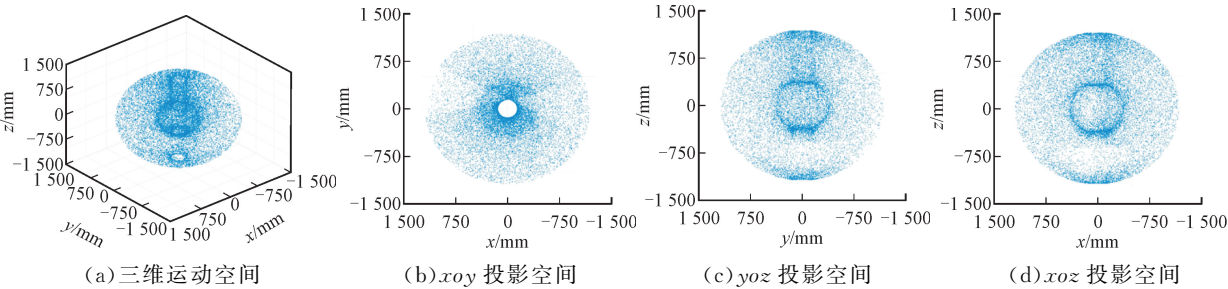


图 8 混联式穿刺手术机器人工作空间
Fig. 8 Hybrid puncture surgery robot workspace

为验证本文设计混联式穿刺手术机器人系统的远程中心运动性能,分别控制机器人末端执行俯仰和翻滚运动,以检测机器人末端 RCM 机构的运动精度,运动角度范围根据文献^[24]取 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。这里以通用串联多关节机器人运动控制实现的远程中心运动(ARCMC 方案)作为对比,图 9 为实验场景。为监测机器人执行远程中心运动的精度,通过在穿刺针远程中心点安装 NDI 公司的 Vega ST 光学定位系统(精度 0.12 mm)tracker,利用该光学定

位系统,记录远程中心点在运动过程中偏离原点的欧几里得距离为

$$e_i = \sqrt{(p_{xi} - p_{xrcm})^2 + (p_{yi} - p_{yrcm})^2 + (p_{zi} - p_{zrcm})^2} \tag{2}$$

式中: (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi}) 表示 NDI 记录点 i 在 NDI 坐标系下的坐标; $(p_{xrcm}, p_{yrcm}, p_{zrcm})$ 表示远程中心点在 NDI 坐标系下的坐标。此距离 e_i 可以表示机器人 RCM 运动时远程中心点的运动误差。

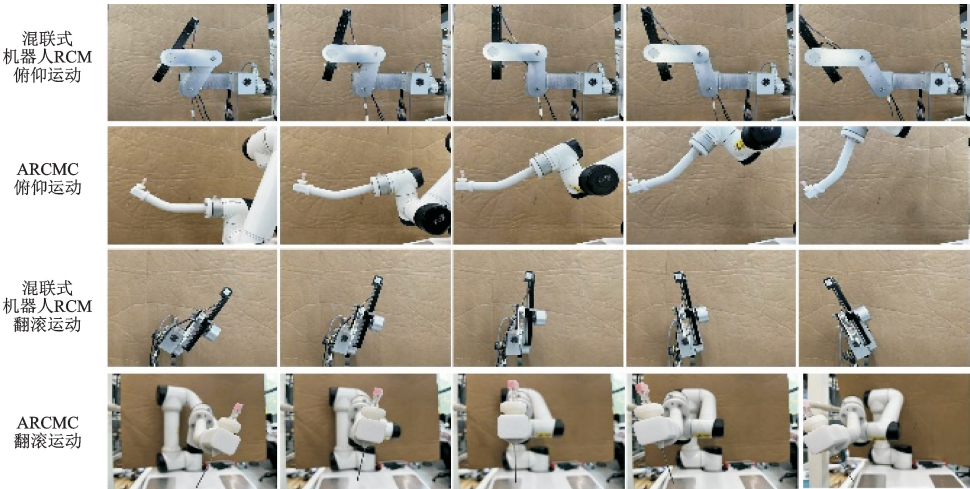


图 9 远程中心运动误差对比实验场景
Fig. 9 Comparison experiment of RCM error

本文设计混联式穿刺手术机器人与基于 ARCMC 方案的穿刺手术机器人实现远程中心运动时, 穿刺针末端偏离远程中心点的距离变化趋势见图 10。可以发现, 利用通用串联机器人运动控制实现 RCM 运动时, 穿刺针末端偏离远程中心点的距离总体大于混联式穿刺手术机器人, 由此可知本文设计机器人的末端远程中心运动定位精度更高。

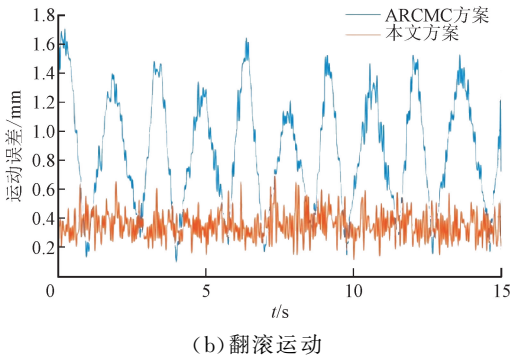
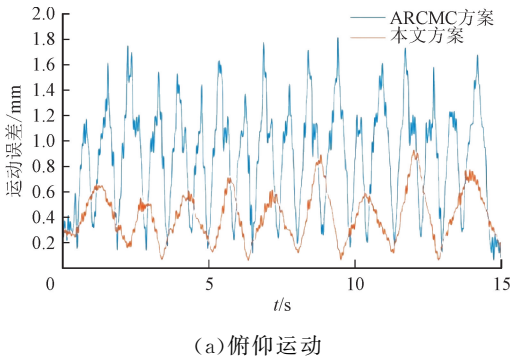


图 10 远程中心运动误差变化趋势对比
Fig. 10 Comparison of the variation trend of RCM error

表 1 所示为机器人运动时的定位误差。从中可以发现, 相比基于 ARCMC 方案实现的远程中心运动, 本文结合 PRCMC 和 ARCMC 的优点设计的混联式机器人末端执行机构的远程中心运动俯仰和翻滚平均运动精度分别提升了 52.6% 和 59.7%。

表 1 机器人末端运动偏离远程中心点的误差对比

RCM 约束运动	$(e_{\mu} \pm \sigma)/\text{mm}$	$e_{\min}/\text{mm}$	$e_{\max}/\text{mm}$
混联式机器人 RCM 俯仰	$0.410\ 7 \pm 0.189\ 6$	0.055\ 7	0.932\ 1
ARCMC 俯仰	$0.866\ 2 \pm 0.409\ 2$	0.061\ 6	1.812\ 1
混联式机器人 RCM 翻滚	$0.343\ 7 \pm 0.092\ 9$	0.098\ 3	0.697\ 9
ARCMC 翻滚	$0.852\ 8 \pm 0.383\ 6$	0.093\ 1	1.712\ 0

注: e_{μ} 、 σ 、 $e_{\min}$ 、 $e_{\max}$ 分别表示远程中心运动误差的数学期望、标准差、最小值以及最大值。

混联式穿刺手术机器人与基于 ARCMC 方案的穿刺手术机器人实现远程中心运动误差对比见图 11, 可以发现, 本文设计混联式机器人的末端远程中心运动定位精度更高。

四边形 RCM 机构与 6 自由度串联关节, 设计了一款可以兼顾保证末端远程中心运动精度及工作空间的混联式穿刺手术机器人系统, 多自由度串联关节可以保证满足临床需求的末端穿刺点定位空间以及姿态调整角度, RCM 机构则可以保证术中末端器械远程中心运动的精度及安全性。本文首先通过建模仿真验证了机器人的末端工作空间远高于基于 PRCMC 方案设计的穿刺手术机器人^[10], 通过对比实验, 证明了本文设计混联式机器人末端执行机构的 RCM 定位精度比通过多关节串联机器人运动控制(ARCMC 方案)实现的远程中心运动高。

虽然本文设计的混联式穿刺手术机器人可以兼顾远程中心运动精度与工作空间, 但由于融合了具有主动自由度的 RCM 机构, 机器人末端质量较大, 一定程度上增大了机器人操作的危险性。后续, 我们将开展机器人轻量化设计研究, 拟将拓扑优化方法用于末端 RCM 机构的轻量化设计, 在保证末端远端中心运动定位精度的基础上实现末端执行机构的减重。

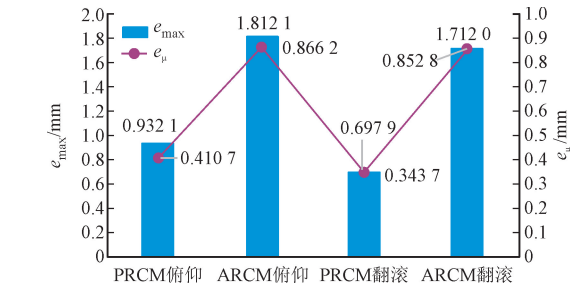


图 11 穿刺手术机器人远程中心运动误差对比
Fig. 11 Comparison of remote center motion errors of puncture surgery robots

4 结 论

远程中心运动定位精度与工作空间是穿刺手术机器人实现精准穿刺的关键, 本文提出融合双平行

参考文献:

- [1] YANG Chenguang, HUANG Dianyue, HE Wei, et al. Neural control of robot manipulators with trajectory tracking constraints and input saturation [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(9): 4231-4242.
- [2] 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 Guangbiao, FU Zhuang, ZHANG Tiefeng, et al. Robot-assisted puncture positioning methods under CT navigation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(4): 85-92, 99.
- [3] LEI Jiao, HUANG Junmin, YANG Xiaobo, et al. Minimally invasive surgery versus open hepatectomy for hepatolithiasis: a systematic review and meta analysis [J]. International Journal of Surgery, 2018, 51: 191-198.
- [4] 姜超, 张永远, 王晓晖, 等. 机器人辅助微创通道下经椎间孔椎间融合术治疗单节段腰椎间盘突出症的临床疗效 [J]. 西安交通大学学报(医学版), 2022, 43(5): 713-719.
JIANG Chao, ZHANG Yongyuan, WANG Xiaohui, et al. Clinical effects of robot-assisted minimal invasive transforaminal lumbar interbody fusion in the treatment of single-segment lumbar disc herniation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Medical Sciences), 2022, 43(5): 713-719.
- [5] 闫志远, 杜志江, 吴冬梅. 手术机器人运动再现及最优布置系统 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(12): 116-122.
YAN Zhiyuan, DU Zhijiang, WU Dongmei. Motion simulation and optimal position system of surgical robots [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(12): 116-122.
- [6] 宗光华, 裴旭, 于靖军, 等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 103-108.
ZONG Guanghua, PEI Xu, YU Jingjun, et al. Design of double parallelogram remote-center-of-motion mechanisms [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 103-108.
- [7] KUO C H, DAI J S. Kinematics of a fully-decoupled remote center-of-motion parallel manipulator for minimally invasive surgery [J]. Journal of Medical Devices, 2012, 6(2): 021008.
- [8] SU Hang, YANG Chenguang, FERRIGNO G, et al. Improved human-robot collaborative control of redundant robot for teleoperated minimally invasive surgery [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1447-1453.
- [9] CHA H J, YI B J. Modeling of a constraint force at RCM point in a needle insertion task [C]//2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2177-2182.
- [10] 叶伟, 杨臻, 李秦川. 一种远中心并联机构运动学与性能分析 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 65-73.
YE Wei, YANG Zhen, LI Qinchuan. Kinematics and performance analysis of a parallel manipulator with remote center of motion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 65-73.
- [11] ZHOU Xiaoqin, ZHANG Haijun, FENG Mei, et al. New remote centre of motion mechanism for robot-assisted minimally invasive surgery [J]. BioMedical Engineering OnLine, 2018, 17(1): 170.
- [12] 黄龙, 杨洋, 苏鹏, 等. 1R1T 远程运动中心机构的型综合 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 131-136.
HUANG Long, YANG Yang, SU Peng, et al. Type synthesis of 1R1T remote center of motion mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 131-136.
- [13] TAYLOR R H, FUNDA J, LAROSE D, et al. A telerobotic system for augmentation of endoscopic surgery [C]//1992 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 1054-1056.
- [14] TAYLOR H R, FUNDA J, ELDRIDGE B, et al. A telerobotic assistant for laparoscopic surgery [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1995, 14(3): 279-288.
- [15] TAYLOR R, JENSEN P, WHITCOMB L, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation [J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1201-1210.
- [16] KUO C H, DAI J S. Robotics for minimally invasive surgery: a historical review from the perspective of kinematics [C]//International Symposium on History of Machines and Mechanisms. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2009: 337-354.
- [17] 冯锦腾, 范坤, 贾卓奇, 等. 58 例达芬奇机器人系统辅助肺部手术的临床分析 [J]. 西安交通大学学报(医学版), 2019, 40(3): 421-424.
FENG Jinteng, FAN Kun, JIA Zhuoqi, et al. Clinical analysis of 58 cases of Da Vinci robot system-assisted pulmonary surgery [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Medical Sciences), 2019, 40(3): 421-424.

- [18] HADAVAND M, NAISH M D, PATEL R V. A parallel remote center of motion mechanism for needle-based medical interventions [C]//5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-6.
- [19] KIM D, KOBAYASHI E, DOHI T, et al. A new, compact MR-compatible surgical manipulator for minimally invasive liver surgery [C]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2002. Heidelberg, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 99-106.
- [20] 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 Xingguang, WEN Hao, HE Rui, et al. Advances and key techniques of percutaneous puncture robots for thorax and abdomen [J]. Robot, 2021, 43(5): 567-584.
- [21] AGHAKHANI N, GERAHAND M, SHAHRIARI N, et al. Task control with remote center of motion constraint for minimally invasive robotic surgery [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 5807-5812.
- [22] SANDOVAL J, POISSON G, VIEYRES P. Improved dynamic formulation for decoupled Cartesian admittance control and RCM constraint [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1124-1129.
- [23] 周律, 周昱明, 汪亮, 等. 基于蒙特卡罗方法的双臂机器人工作空间分析 [J]. 机械传动, 2014, 38(6): 85-87.
- ZHOU Lü, ZHOU Yuming, WANG Liang, et al. Dual-arm robot workspace analysis based on the Monte Carlo method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(6): 85-87.
- [24] LUM M J H, ROSEN J, SINANAN M N, et al. Optimization of a spherical mechanism for a minimally invasive surgical robot: theoretical and experimental approaches [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(7): 1440-1445.
- [25] STOIANOVICI D, CLEARY K, PATRICIU A, et al. AcuBot: a robot for radiological interventions [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(5): 927-930.
- [26] TAYLOR R, JENSEN P, WHITCOMB L, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation [J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1201-1210.

(编辑 杜秀杰)