

DOI:10.11784/tdxbz202504036

手持式椎板磨削手术机器人设计与优化

胡顺顺¹, 王凯峰^{1,2}

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学浙江国际创新设计与智造研究院, 绍兴 312099)

摘要: 现有接地式椎板磨削手术机器人存在空间占用大、易发生碰撞干涉、设置繁琐以及成本较高等问题, 制约了其在临床中的推广应用. 针对上述问题, 本文设计了一种手持式椎板磨削手术机器人, 通过在磨削工具与手柄之间嵌入小型并联机构模块, 补偿非期望的手部运动, 从而提升手术精度以及机器人对手术环境的适应性. 首先, 基于并联机构构型建立了机器人运动学模型, 分析了运动/力传递性能约束下机器人的优质工作空间. 然后, 以空间利用率(机器人优质工作空间体积与机器人占用空间的比值)为目标, 采用遗传算法对机器人结构参数(动平台半径 r 、静平台半径 R 、连杆长度 L)进行优化, 优化后机器人空间占用减小 9.33%, 优质工作空间体积增大 10.49%. 最后, 搭建了物理样机并开展了工作空间、定位精度与磨削精度测试实验. 实验结果显示: 机器人实际工作空间达到预期目标, 末端绝对定位精度为 0.516 mm, 机器人辅助磨削时误差为 0.560 mm, 而在无机器人辅助时磨削误差为 1.380 mm. 该研究验证了手持式机器人在椎板磨削辅助方面的可行性, 为椎板磨削手术中小型化、高精度机器人系统的设计与应用提供了理论基础与技术支撑.

关键词: 手术机器人; 并联机构; 结构设计; 工作空间; 参数优化

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)03-0240-11

Design and Optimization of a Handheld Surgical Robot for Laminae Grinding

Hu Shunshun¹, Wang Kaifeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Tianjin University-Zhejiang, Shaoxing 312099, China)

Abstract: Existing grounded surgical robots suffer from extensive space requirements, collision susceptibility, complex setup, and expensiveness, limiting their widespread adoption for clinical applications. Therefore, a handheld laminae grinding surgical robot was proposed herein. The robot compensated for undesired hand movements by embedding a small parallel mechanism module between the grinding tool and handle, thereby improving surgical accuracy and the robot's adaptability to the surgical environment. Initially, a robot kinematic model was designed based on the parallel mechanism configuration, and its good workspace was analyzed under constrained motion/force transfer performances. Next, taking the space utilization rate (the ratio of the good workspace volume of the robot to the occupied space) as an objective, a genetic algorithm was used to optimize the structural parameters of the robot (dynamic platform radius r , static platform radius R , and linkage length L), reducing the space occupation of the robot by 9.33% and increasing its quality workspace volume 10.49%. Finally, a physical prototype was constructed and subjected to workspace, positioning accuracy, and grinding accuracy experiments. Results reveal that the actual workspace of the robot satisfies the expected goals and achieves an absolute positioning accuracy of 0.516 mm. Notably, it realizes an error of robot-assisted grinding of 0.560 mm, which is lower than the grinding error of 1.380 mm realized without robot assistance. Overall, this study verifies the feasibility of a handheld robot in

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-06-03.

作者简介: 胡顺顺 (1998—), 男, 硕士研究生, hushunshun@tju.edu.cn.

通信作者: 王凯峰, wangkf@tju.edu.cn.

基金项目: 绍兴市科技计划资助项目 (2023A14016).

Supported by the Science and Technology Program of Shaoxing, China (No. 2023A14016).

vertebral plate grinding, offering a theoretical basis and technical support for designing and applying miniaturized, high-precision robotic systems in vertebral plate grinding surgeries.

Keywords: surgical robot; parallel mechanism; structural design; workspace; parameter optimization

椎管狭窄是一种常见的退行性脊柱疾病,其主要特征为突出的椎间盘或增生的骨组织侵入椎管空间导致脊髓神经压迫,从而引发疼痛、肢体无力及神经性跛行等症状,严重影响患者的生活质量^[1]. 椎板切除术是治疗椎管狭窄的重要手段,医生通常需借助高速磨削工具,对病灶区域的椎板进行精准磨削切除,以解除脊髓神经压迫^[2]. 由于椎板内侧紧邻脊髓神经,在椎板磨削过程中医生必须对磨削工具进行精细操控并保持高度的手眼协调,以保证切削精度. 然而在传统徒手椎板磨削手术中,骨屑遮挡及长时间操作所带来的疲劳等因素,均使得手术存在较大风险,容易造成硬脊膜穿透、神经损伤等严重术中并发症.

近年来,机器人辅助脊柱手术的快速发展,为提高椎板磨削操作的安全性和精确性提供了新思路. 机器人辅助脊柱手术系统结合医学影像导航与高精度执行机构,能够在预设路径下实现稳定操作,显著提升了手术质量. 早期机器人辅助脊柱手术系统的研究主要关注椎弓根螺钉置入机器人的开发. 目前,多款机器人系统已被广泛应用于临床手术中,包括 Mazor、ROSA 和天玑机器人等^[3],其可将导向组件准确定位并引导医生完成钻孔与螺钉放置任务,相较传统手术具有更高的定位精度与更小的创口尺寸^[4]. 然而,上述机器人多以提供静态引导为主,缺乏椎板磨削所需的动态操作能力.

针对椎板磨削的专用手术机器人目前尚处于实验研究阶段^[5],且多采用接地式结构. Deng 等^[6]基于 RSSS 脊柱手术机器人平台^[7],开发了一种大型七自由度椎板磨削手术机器人,该机器人采用串联结构形式,具备较大的工作空间,能够对多节段椎骨进行磨削. Li 等^[8-9]设计的椎板磨削机器人采用六自由度混联结构形式,兼顾结构刚度与工作空间性能,能够适应高负载磨削任务. Bhagvath 等^[10]设计了一种基于 KUKA 机械臂的机器人辅助磨削系统,并使用 3D 打印模型验证了系统的磨削效果. Vossel 等^[11]则设计了由轻型载体机械臂与末端高动态工具机器人构成的双机器人系统. 该机器人能够与医生协同进行快速定位与精细磨削,且能够通过更换工具机器人模块适配不同手术类型,具有良好的适应性. 尽管上述系统在精度与功能性方面具有优势,但其普遍存在体积庞大、在手术室中容易发生碰撞干涉、需依托专用台车

固定以及成本高等问题,制约了其在临床中的普及与应用. 为减小系统体积,樊路平^[12]提出了一种床旁式小型四自由度椎板磨削手术机器人,缩短了机器人基座与手术区域之间的距离,实现了结构紧凑化. Wu 等^[13]则设计了一种基于混联机构的五自由度紧凑型机器人. 该机器人在关键关节处集成了驱动感知一体化模块,能够平稳地进行椎板磨削. 然而,由于床旁式小型机器人的工作空间仍需覆盖整个病灶区域,此类机器人减小空间占用的效果有限,且需在患者摆体位后进行复杂定位与标定,影响手术效率.

手持式手术机器人因其小尺寸、低成本的优势而得到关注,能够为医生提供震颤抑制、主动引导等功能,进而辅助医生完成具有挑战性的任务^[14]. Schwarz 等^[15]基于 6-PSS 并联机构设计了一种用于椎弓根螺钉置入手术的手持式机器人. 该机器人能够在视觉系统辅助下稳定钻孔工具的位置和姿态,但具有较大的体积,总质量达到了 4.6 kg. Hung 等^[16]设计了一种轻量化的手持式骨钻孔机器人. 该机器人包含较多转动关节模块,总质量为 1.5 kg,同时,利用嵌入的并联机构对手部运动进行补偿,能够实现 1.5 mm 的钻孔路径跟踪精度^[17]. Navio 是一种商业手持式膝关节置换手术机器人,能够在磨削刀头超出规划区域时收回刀具,从而提高手术精度^[18]. 但该机器人仅具有沿轴线方向的移动自由度,难以进一步应用到需要精确磨削路径的手术中. Vossel 等^[19]基于平面五杆机构设计了一种手持式机器人. 该机器人具有专门适用于单髌膝关节置换手术的工作空间,总质量为 2.5 kg,能够快速补偿手部运动. 目前,在椎板磨削手术领域尚缺少手持解决方案.

综上所述,当前面向椎板磨削的接地式机器人系统仍存在空间占用大、设置耗时及成本高等不足,难以兼顾高精度与临床适用性. 为此,本文拟基于并联机构设计一种专用于椎板磨削手术的手持式机器人,该机器人通过在磨削工具与握持手柄之间嵌入小型并联机构模块补偿非期望的手部运动,从而提升手术精度. 首先建立机器人运动学模型,并求解机器人在运动/力传递性能约束下的优质工作空间;然后以结合运动学性能的空间利用率为性能指标,采用遗传算法对结构参数进行优化;最后进行样机搭建,并对工作空间、定位精度及磨削精度进行测试,验证机器人性能.

1 手持式椎板磨削手术机器人结构设计

1.1 设计需求分析

人体椎板厚度约为 2~6 mm, 内侧紧邻硬脊膜和脊髓神经, 椎板的磨削切除是治疗椎管狭窄等疾病的关键步骤. 机器人辅助椎板磨削手术方案中, 机器人按照规划路径逐层执行椎板磨削任务^[20], 并保留约 1 mm^[21]的内侧皮质骨区域, 然后医生使用咬骨钳去除剩余骨质, 椎板磨削过程如图 1 所示.

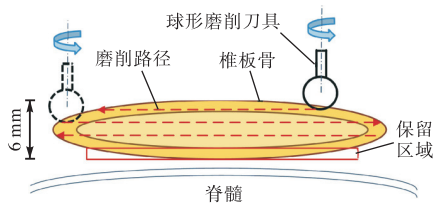
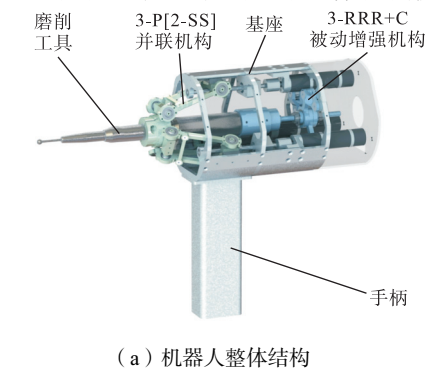


图 1 逐层磨削路径执行示意

Fig.1 Schematic of layer-by-layer grinding path execution

对于手持式机器人系统, 其按照规划路径进行椎板磨削的过程中涉及机器人系统中的 2 个控制回路. 即医生仅对基座进行控制, 并尽力控制基座沿规划路径运动, 机器人在此基础上对磨削工具进行精细控制, 提取并保留基座运动中沿规划路径的运动分量, 补偿偏离规划路径的运动分量, 如手抖以及患者呼吸引起的干扰运动.

椎板磨削手术中的常见并发症为硬脊膜损伤, 由



(a) 机器人整体结构

于硬脊膜与设定的磨削边界之间的最近距离约为 1 mm, 在磨削过程中极易造成磨削穿透而损伤硬脊膜, 根据文献中统计的数据, 其发生率可达 12.6%^[22]. 为避免硬脊膜损伤, 机器人需具备以下设计性能: ①自由度, 为精确控制球形刀具中心位置, 机器人需具备至少 3 个自由度; ②工作空间, 考虑医生手部运动误差与呼吸运动干扰(脊柱位移最大约 3 mm^[23]), 设定工作空间为半径 10 mm 的球形区域; ③定位精度, 在椎板磨削过程中, 为避免硬脊膜损伤, 机器人定位精度应小于 1 mm. 手持式椎板磨削手术机器人的关键设计指标见表 1.

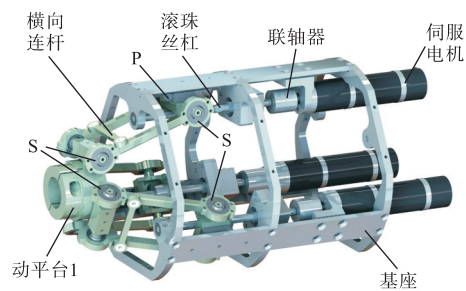
表 1 手持式机器人设计要求

Tab.1 Design parameters for the handheld robot

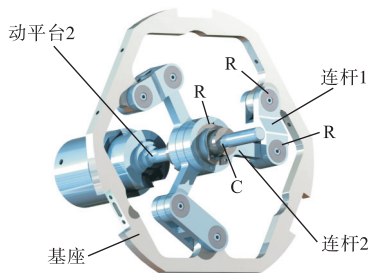
设计要求	指标值
自由度数目	≥3
工作空间	R10 mm 球体空间
绝对定位精度	< 1 mm

1.2 结构设计

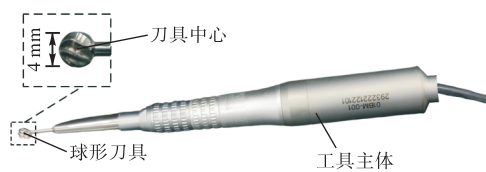
为满足椎板磨削手术中对高精度定位、适宜工作空间以及操作便捷性的综合要求, 本文基于三自由度平动并联机构设计了一种结构紧凑的手持式椎板磨削手术机器人, 其整体结构如图 2(a)所示, 主要包括 3-P[2-SS]并联机构、3-RRR + C 被动增强机构、基座、磨削工具及手持手柄等部分. 本文所采用的 3-P[2-SS] 并联机构结构如图 2(b)所示, 由静平台(基座)、动平台 1 及 3 条支链组成, 支链以 120°间隔均匀分布. 初



(b) 3-P[2-SS]并联机构



(c) 3-RRR+C 被动增强机构



(d) 磨削工具

图 2 手持式椎板磨削手术机器人

Fig.2 Handheld laminar grinding surgical robot

始结构参数设定如下:动平台半径为 23 mm,静平台半径为 40 mm,连杆长度为 50 mm. 每条支链包括 1 个移动副、4 个球面副和 1 根横向连杆. 移动副由高精度伺服电机驱动滚珠丝杠实现线性运动. 横向连杆用于消除球副间隙,提高末端定位精度与结构稳定性. 该机构提供 3 个线性移动自由度,可实现磨削工具在空间内的精细调控,同时约束其转动自由度,避免非期望姿态变化. 与传统基于转动副驱动的旋转型 Delta 机构相比,3-P[2-SS]机构不仅具备更大的有效工作空间,而且显著减小了基座的径向尺寸,从而提升了手持操作的灵活性与稳定性.

为进一步提升机器人整体刚度以及在操作过程中的稳定性,设计了如图 2(c)所示的 3-RRR+C 被动增强机构. 该机构由 3 条被动平面 RRR 支链、1 个圆柱副及动平台 2 构成,具有 3 个与 3-P[2-SS]机构相一致的移动自由度以及 1 个绕工具轴线的转动自由度. 被动增强机构通过对磨削工具姿态进行重复约束,增强了机器人整体的角刚度且不影响机器人的运动自由度.

机器人末端集成商用磨削工具(RJ-W-MZ-1,锐进医疗,中国),结构如图 2(d)所示. 磨削工具通过专用夹具分别与两级动平台实现可靠连接,确保磨削过程中的刚性传力与姿态稳定性. 手柄设计基于人机工程学参数,兼顾握持舒适性与操作灵活性,以适应手术场景下医生的自然操作习惯.

2 运动学分析与结构优化

2.1 机器人运动学模型

机器人运动学模型是结构优化和运动控制的基础,本文通过矢量法求解逆运动学模型. 建立的手持式椎板磨削手术机器人运动学模型如图 3 所示.

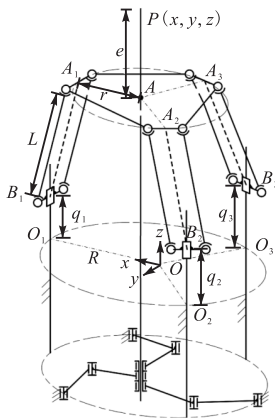


图 3 机器人运动学模型

Fig.3 Robot kinematic model

定义静平台坐标系 $O-xyz$ 设置其原点 O 位于 O_1 、 O_2 、 O_3 3 点所构成外接圆的圆心,其中 O_1 、 O_2 、 O_3 分别表示机器人处于初始状态(3 条支链移动副输入位移均为 0)时各滑块所处的位置. 静平台坐标系 x 轴沿 OO_1 方向, z 轴与移动副运动方向一致,且由动平台指向刀具中心, y 轴方向根据右手准则确定.

在静平台坐标系下,对末端执行器中球形刀具中心点 P 的位置进行描述,其位置向量可表示为

$$\mathbf{OP} = [x \ y \ z]^T \quad (1)$$

在第 i ($i=1, 2, 3$) 条支链中, B_i 为靠近静平台的两球铰中心的中点, \mathbf{OB}_i 可以表示为

$$\mathbf{OB}_i = [R \cos \alpha_i \ R \sin \alpha_i \ q_i]^T \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

式中: R 为 3-P[2-SS]机构静平台半径; q_i 为移动副中滑块的位移大小; α_i 表示机构中支链的分布角度,即

$$\alpha_i = \frac{2\pi}{3}(i-1) \quad (3)$$

A_i 为支链中靠近动平台的两球形关节的中心点, \mathbf{OA}_i 可以表示为

$$\mathbf{OA}_i = [x+r \cos \alpha_i \ y+r \sin \alpha_i \ z-e]^T \quad (4)$$

式中: r 为动平台半径; e 为刀具中心相对于动平台中心的偏置距离.

由于点 B_i 与点 A_i 之间的欧式距离始终等于连杆长度 L , 则有

$$\|\mathbf{OA}_i - \mathbf{OB}_i\| = L \quad (5)$$

对式(5)进行求解,并将移动副中滑块位置限制在动平台下方,可得

$$q_i = z - e - \sqrt{L^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta x = x + (r - R) \cos \alpha_i \\ \Delta y = y + (r - R) \sin \alpha_i \end{cases} \quad (7)$$

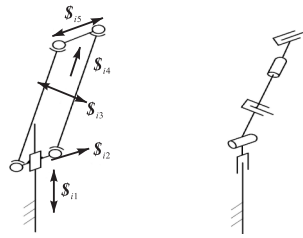
2.2 基于运动/力传递性能指标的优质工作空间

可达工作空间是衡量机器人性能的关键指标之一. 对于手持式椎板磨削手术机器人而言,其可达工作空间决定了机器人在术中对医生手部运动的最大补偿范围. 本文在可达工作空间基础上,定义优质工作空间为可达工作空间中运动/力传递性能指标值大于设定值的子区域. 借助这一量化标准,确保机器人末端工具始终在低风险条件下运行. 在优质工作空间中,机器人能够在补偿操作者非期望手部运动时避免对操作者手部施加过大的反作用力,从而提升椎板磨削操作的稳定性并降低手术风险.

通过搜索法对机器人优质工作空间进行求解,机器人运动/力传递性能评估准则采用基于旋量理论的

局部传递指标^[24]. 该指标反映了能量从驱动关节到末端执行器的传递效率, 不仅具有明确的物理意义, 而且与所选坐标系无关, 适用于并联机构性能分析.

根据旋量理论, 3-P[2-SS]机构支链中的 2-SS 闭环机构可以等效为一个 PRPR 广义运动副, 便于进行旋量建模分析, 支链 i 的等效支链及其运动旋量如图 4 所示.



(a) P[2-SS]支链 (b) P[2-SS]等效支链

图 4 P[2-SS]支链等效运动旋量

Fig.4 P[2-SS] branch chain equivalent motion spinor

等效后, 支链 i 的运动副旋量系可表示为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathcal{S}_{i2} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{ai}^T \\ \mathbf{OB}_i^T \times \mathbf{n}_{ai}^T \end{bmatrix} \\ \mathcal{S}_{i3} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{n}_{ai}^T \times \mathbf{n}_{bi}^T \end{bmatrix} \\ \mathcal{S}_{i4} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{bi}^T \\ \mathbf{OB}_i^T \times \mathbf{n}_{bi}^T \end{bmatrix} \\ \mathcal{S}_{i5} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{n}_{bi}^T \times (\mathbf{n}_{ai}^T \times \mathbf{n}_{bi}^T) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{n}_{ai} 为支链 i 中移动滑块上两球副中心连线的方向向量; \mathbf{n}_{bi} 为 $\mathbf{B}_i\mathbf{A}_i$ 的方向向量. 根据图 3 中建立的坐标系, \mathbf{n}_{ai} 可表示为

$$\mathbf{n}_{ai} = [\cos \beta_i \quad \sin \beta_i \quad 0]^T \quad (9)$$

式中 β_i 为 \mathbf{n}_{ai} 与静平台坐标系 x 轴正向的夹角, 其值为 $\beta_i = -\frac{\pi}{2} + (i-1)\frac{2\pi}{3}$.

支链 i 中的约束力旋量与运动副旋量系中所有运动副旋量均互为反旋量. 第 i 条支链的约束力旋量为

$$\mathcal{S}_{Ci} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{n}_{ai}^T \times \mathbf{n}_{bi}^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

输入运动旋量是指添加了主动驱动的运动副旋量. 支链 i 的输入运动旋量为

$$\mathcal{S}_{Ai} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

传递力旋量与输入运动旋量以外的运动副旋量

均互易, 且与约束力旋量线性无关. 支链 i 的传递力旋量为

$$\mathcal{S}_{Ti} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{bi}^T \\ \mathbf{OB}_i^T \times \mathbf{n}_{bi}^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

支链 i 的输入传递指标为

$$\lambda_{Ti} = \frac{|\mathcal{S}_{Ai} \circ \mathcal{S}_{Ti}|}{|\mathcal{S}_{Ai} \circ \mathcal{S}_{Ti}|_{\max}} \quad (13)$$

锁住除支链 i 外其余支链的所有驱动关节, 支链 j ($j = 1, 2, 3, j \neq i$)、支链 k ($k = 1, 2, 3, k \neq i, k \neq j$) 中的驱动力旋量转变为约束力旋量, 此时机构的约束力旋量系 \mathbf{U}_i 为

$$\mathbf{U}_i = [\mathcal{S}_{C1} \quad \mathcal{S}_{C2} \quad \mathcal{S}_{C3} \quad \mathcal{S}_{Tj} \quad \mathcal{S}_{Tk}] \quad (14)$$

支链 i 的输出运动旋量与约束力旋量系中旋量均互为反旋量, 即

$$\mathcal{S}_{Oi} \circ \mathbf{U}_i = \mathbf{0} \quad (15)$$

对式(15)进行求解, 可得支链 i 的输出运动旋量.

支链 i 的输出传递指标为

$$\lambda_{Oi} = \frac{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Oi}|}{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Oi}|_{\max}} \quad (16)$$

同时考虑 3 条支链的输入传递指标和输出传递指标, 机器人处于特定位置时机构的局部传递指标(local transmission index, LTI) I_{LT} 为

$$I_{LT} = \min\{\lambda_{Ti}, \lambda_{Oi}\} \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

局部传递指标的取值介于 0 ~ 1 之间, 其值越大, 并联机构在该位形下运动/力传递性能越好.

求解机器人优质工作空间时需要考虑球副转角限制、移动副中滑块行程限制以及局部传递指标限制, 即

$$\begin{cases} 0 \leq q_i \leq q_{\max} \\ 0 \leq \gamma_i \leq \gamma_{\max} \\ I_{LT} > 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

式中: q_{\max} 为滑块最大行程, 其值为 25 mm; γ_{\max} 为球铰最大转角, 其值为 15°. 通过蒙特卡罗法对机器人优质工作空间进行搜索求解并计算优质工作空间体积, 首先在预估空间区域 ($V_0 = 44 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) 内随机生成 $N_0 = 2 \times 10^5$ 个采样点, 然后对每个点通过逆运动学求解滑块行程 q_i 、球关节转角 γ_i , 并计算对应的局部传递指标值, 最后筛选满足所有约束条件的点以构成优质工作空间, 同时, 记录优质工作空间点的数量 N , 进而评估其体积 V_w , 即

$$V_w = \frac{N}{N_0} \times V_0 \quad (19)$$

图 5 展示了初始设计参数(动平台半径为 23 mm、静平台半径为 40 mm、连杆长度为 50 mm)下机

机器人的优质工作空间,优质工作空间的体积为 $1.62 \times 10^4 \text{ mm}^3$.

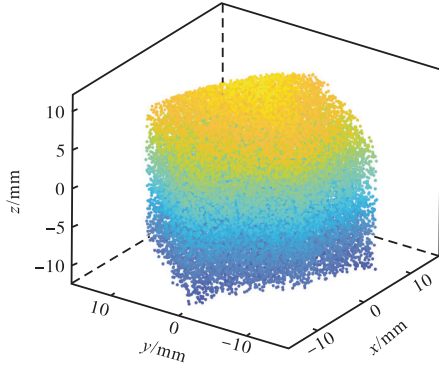


图5 机器人优质传递工作空间

Fig.5 Good transmission workspace for the robot

2.3 结构参数优化

在手持式椎板磨削手术机器人设计中,如何在提升工作空间性能的同时控制机器人尺寸,提升其在手术室空间受限环境中的适应性,是关键设计问题之一.以最大化工作空间为设计目标往往带来机器人体积的大幅增加,不利于机器人在临床操作中的便捷性与灵活性.因此,需引入更能反映机器人综合性能的优化指标.空间利用率^[25]指标是一种衡量机器人结构紧凑性与空间使用效率的有效参数,被定义为机器人可达工作空间体积与机器人物理占用空间的比值,已被广泛应用于喷涂、维修等空间受限任务的机器人设计中^[26].但常规空间利用率定义基于可达工作空间体积,未能体现机器人在实际运行过程中的运动学性能.因此,本文在第2.2节优质工作空间分析的基础上,提出一种结合运动/力传递性能的空间利用率指标,用以指导结构参数优化设计.

结合运动/力传递性能的空间利用率指标 η 被定义为机器人优质工作空间体积 V_w 与机器人占用空间 V_R 的比值,即

$$\eta = \frac{V_w}{V_R} \quad (20)$$

式中:优质工作空间体积 V_w 通过第2.2节中基于局部传递指标约束的搜索法计算获得;机器人占用空间 V_R 以机器人中3-P[2-SS]并联机构的包络圆台体积进行表示,其计算公式为

$$V_R = \frac{1}{3} \pi (R^2 + Rr + r^2) \sqrt{L^2 - (R-r)^2} \quad (21)$$

基于设计约束条件与工程可加工性要求,选取上述3个参数作为设计变量,建立结构参数优化模型为

$$z = \max[\eta(\mathbf{E})], \mathbf{E} = [r \quad R \quad L]^T$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 20 \text{ mm} \leq r \leq 30 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \leq R \leq 50 \text{ mm} \\ 40 \text{ mm} \leq L \leq 60 \text{ mm} \\ R - r < L \end{cases} \quad (22)$$

为求解该非线性多变量优化问题,采用遗传算法进行全局优化搜索.设置适应度函数为

$$f(\mathbf{E}) = 1 - \eta(\mathbf{E}) \quad (23)$$

算法参数设定为:种群规模为200,交叉概率为0.8,采用自适应变异函数,最大迭代次数为100,精英个体数为40.遗传算法流程如图6所示.

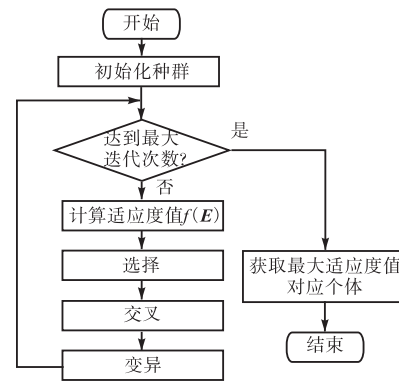


图6 遗传算法流程

Fig.6 Flow chart of genetic algorithm

使用遗传算法求解最优结构参数过程中的进化曲线如图7所示.

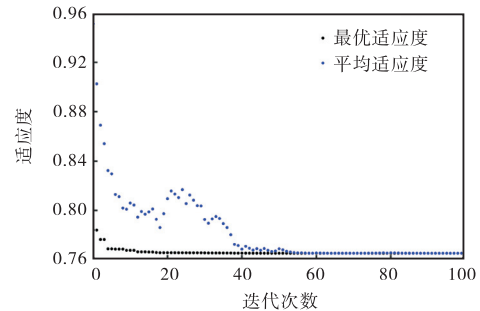


图7 遗传算法进化曲线

Fig.7 Evolution curves of the genetic algorithm

将最优适应度值对应的设计变量值进行圆整,最终取值如表2所示.

将优化后设计变量取值代入第2.2节优质工作空间求解模型以及机器人占用空间计算模型中,计算可得优化后机器人总体空间利用率提升22.17%,其中,机器人并联机构包络体积为 $1.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$,相较优化前 ($1.50 \times 10^5 \text{ mm}^3$) 减小9.33%.同时,优化后机器人优质工作空间体积提升至 $1.79 \times 10^4 \text{ mm}^3$,相较优化前 ($1.62 \times 10^4 \text{ mm}^3$) 提升10.49%,优化前后机器人优质工作空间体积对比如图8所示.优化后的机器

人在降低空间占用的同时提升了运动性能,提高了其在手术室环境中的适用性.

表 2 结构参数优化结果

Tab.2 Optimization results of the structural parameters

r/mm	R/mm	L/mm
20	38	53

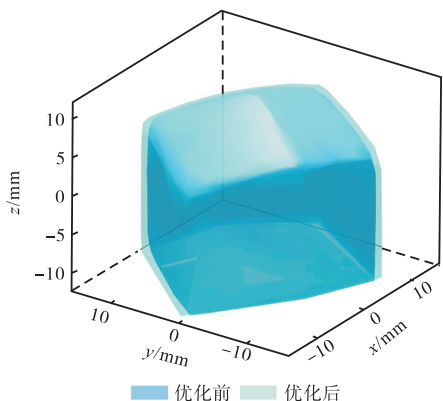


图 8 优化前后优质工作空间对比

Fig.8 Comparison of the good workspace before and after optimization

3 样机搭建与实验验证

3.1 手持式机器人样机搭建

根据第 2 节结构参数优化结果,搭建了手持式椎板磨削手术机器人样机. 样机主体结构的总长度为 360 mm,底座直径为 100 mm,质量为 1.07 kg. 相比于现有轻量化手持式手术机器人^[16](质量约 1.50 kg),本研究中设计的手持式机器人重量更小,有效降低在手术过程中的手部载荷.

机器人样机的硬件配置如图 9 所示,主要包括上位机、光学跟踪设备(Polaris VEGA ST, NDI, 加拿大)、嵌入式控制器(CX5130, Beckhoff, 德国)、3 个伺服驱动器(UF-48V01AEDR, 行动元智能科技, 中国)以及机器人样机. 机器人样机中集成了 3 台高性能无刷直流伺服电机(EC1630S, 唯川科技, 中国),并为每台电机配备了行星齿轮减速箱和高分辨率增量式编码器.

手持式椎板磨削手术机器人样机采用基于位置的虚拟夹具控制方法^[27]. 该方法中,操作者仅控制基座,机器人识别操作者的手部运动后精确定位刀具中心,对手部运动中偏离规划路径的分量进行补偿,从而使刀具中心沿规划路径准确运动. 机器人的位置控制策略可以表示为

$$P = M_o(V, P_N) \quad (24)$$

式中: P 为机器人末端的输出位置; V 为规划路径;

P_N 为定义的参考位置点; M_o 表示正交投影. 参考位置点 P_N 为机器人处于非致动状态时刀具中心的位置,该点可视为与基座固连,能够准确反映操作者的手部运动. 在椎板磨削过程中,为防止基座运动超出机器人补偿范围,需要为操作者提供反馈信息. 本文通过监测并计算 P_N 点相对于规划路径的位置偏差,并将此偏差信息通过上位机界面反馈给操作者,以辅助其对基座进行控制.

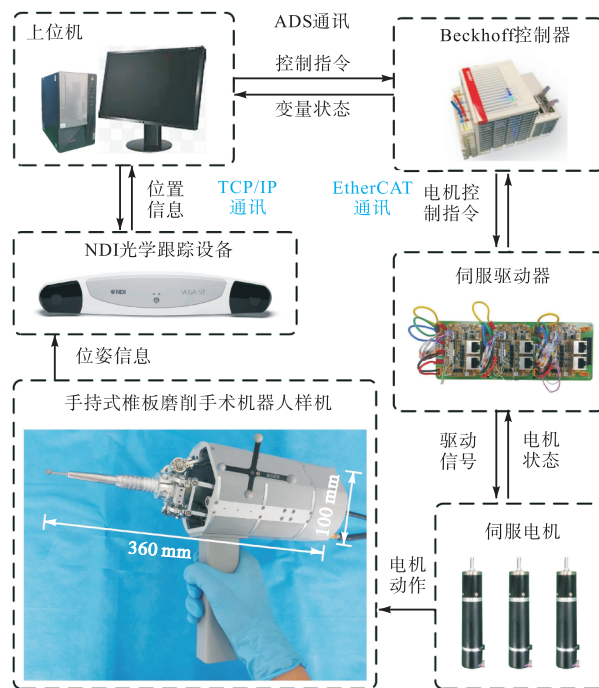


图 9 手持式椎板磨削手术机器人硬件配置

Fig.9 Configuration of the handheld laminar grinding surgical robot

进行手持式椎板磨削手术机器人位置控制时,首先,上位机通过光学跟踪设备实时获取机器人基座的运动信息和规划路径信息,进而计算出 P_N 位置,并根据虚拟夹具控制器生成机器人目标控制指令. 其中,光学跟踪设备采集位置信息的频率设置为 20 Hz. 然后,上位机通过 ADS 通信协议将控制指令下发至嵌入式控制器. 控制器根据接收的目标位置信息及逆运动学模型,生成各驱动电机的控制指令,并通过 EtherCAT 实时总线传输至各驱动器;最后,驱动器进一步完成对伺服电机的精准控制,从而实现机器人末端在空间内的灵活精确运动. 驱动器控制频率设置为 1000 Hz,以确保实时控制. 此外,系统具备良好的可拓展性,可集成外部传感模块(如触觉传感器、力传感器等)获取术中环境信息,实现基于感知反馈的动态路径修正,为后续智能化、自适应控制策略的构建奠定基础.

3.2 工作空间实验

通过光学跟踪设备对机器人的实际工作空间进行测试,实验装置如图 10 所示. 将单个光学标记球固定安装于磨削工具末端,用于记录机器人末端的实际位置.

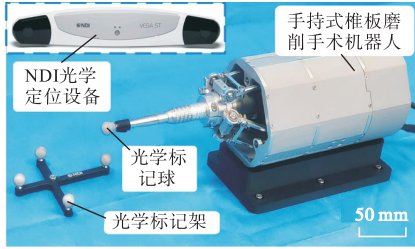
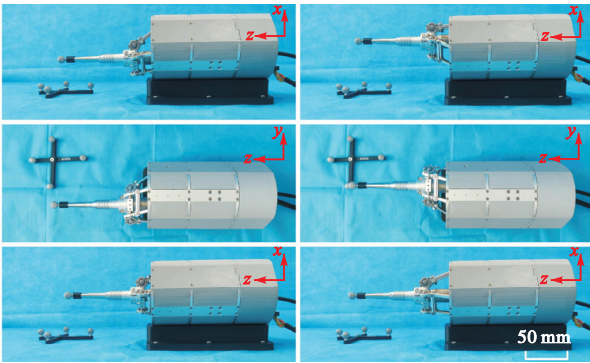


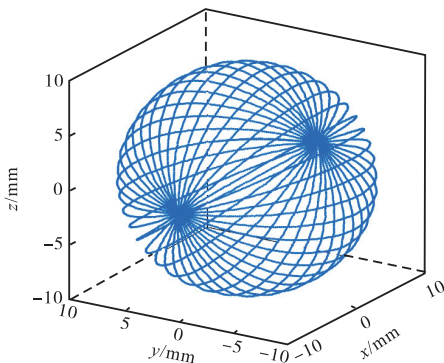
图 10 工作空间测试实验装置

Fig.10 Experimental setup for workspace testing

工作空间测量时,手动调整机器人沿各坐标轴方向运动至极限位置,如图 11(a)所示. 并通过光学跟踪设备记录机器人末端标记球的坐标,计算出的机器人沿 x 、 y 、 z 方向的极限平移范围分别为 28.5 mm、27.2 mm、24.9 mm,大于需求的运动范围. 控制三自由度机器人在半径为 10 mm 的球面上连续运动,结果图 11(b)所示,结果显示机器人末端能够在半径 10 mm 球面上稳定运动. 实验结果表明机器人实际工作空间满足设计要求.



(a) 机器人极限位置



(b) 球形工作空间验证

图 11 工作空间测试实验结果

Fig.11 Results of workspace testing experiment

3.3 定位精度实验

为验证手持式椎板磨削手术机器人在优化结构参数下的空间运动精度,本文搭建了定位精度测试实验平台,利用三坐标测量仪(Croma Classic 686, 思瑞测量技术,中国)对机器人在目标工作空间内的定位精度进行定量测试. 实验装置如图 12 所示.

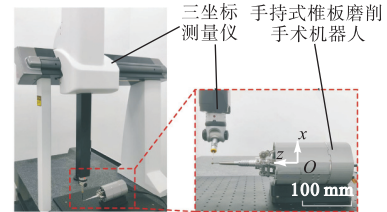


图 12 定位精度测试实验装置

Fig.12 Experimental setup for positioning accuracy testing

实验前,依据机器人底座结构特征建立三维空间下的机器人基坐标系,并调整三组主动滑块至零位,确保机器人位于初始参考姿态. 考虑到临床椎板磨削操作对末端精度的要求,在基坐标系中选取直径为 20 mm 的球体作为代表性工作空间区域,并在该区域边界及其内部均匀布设 8 个典型测量点 $P_1 \sim P_8$,各点坐标如表 3 所示.

表 3 绝对定位精度测试结果

Tab.3 Testing results of absolute positioning accuracy

测量点/mm	绝对定位精度 A_p /mm
$P_1(-4.494, 4.494, 178.192)$	0.166
$P_2(4.494, 4.494, 178.192)$	0.321
$P_3(0, -4.494, 173.698)$	0.413
$P_4(0, -4.494, 183.186)$	0.433
$P_5(0, 7.070, 171.122)$	0.128
$P_6(0, 7.070, 185.262)$	0.105
$P_7(-7.070, -7.070, 178.192)$	0.516
$P_8(7.070, -7.070, 178.192)$	0.492

测试过程中,依据机器人运动学模型计算得到各测量点对应的主动平移关节位移,随后控制机器人依次移动至各目标位置,并在每个测量点进行 5 次重复定位. 通过三坐标测量仪记录机器人末端球形磨削刀具几何中心的实际位置坐标,以评估其定位精度. 机器人绝对定位精度定义为末端刀具中心在目标位置处的实际测量位置与理论指令位置之间的欧几里得距离,其计算表达式为

$$A_p = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} \quad (25)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

式中: x 、 y 、 z 为指令位置坐标; x_j 、 y_j 、 z_j 为第 j 次测量时的实际位置坐标; n 为单个实验测量点的测量次

数; \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 为 n 次测量中实际位置坐标的平均值. 根据式(25)对测量数据进行计算, 得到机器人在各测量点的绝对定位精度结果如表 3 所示.

实验结果表明, 手持式机器人在所选 8 个代表性工作点中的绝对定位精度最大值为 0.516 mm, 最小值为 0.105 mm, 平均值为 0.322 mm, 优于手术操作所需的 1 mm 精度指标, 表明本研究所设计的小型化手持式机器人具有良好的绝对定位精度, 在保障手术安全性的同时, 进一步提升了环境适应性和操控灵活性, 显示出良好的工程应用潜力.

3.4 磨削精度实验

机器人辅助执行规划磨削路径的精度是衡量手持式椎板磨削手术机器人可行性和临床应用潜力的关键指标. 为此, 本文在已完成的样机基础上, 开展如图 13 所示的磨削精度测试实验.

实验前通过在视觉系统空间内直接采点的方式进行磨削路径规划. 使用光学探针在人造骨块表面选取两点 Q_1 与 Q_2 , 将采样点所确定的线段 Q_1Q_2 作为规划磨削路径. 为方便描述, 建立如图 13 所示的任务空间坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$.

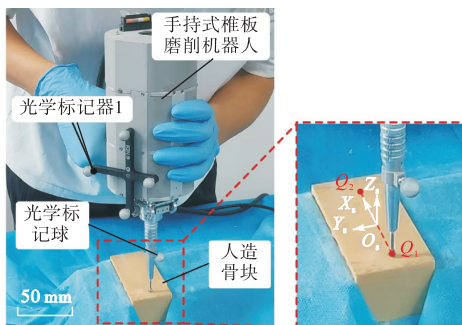


图 13 磨削精度测试实验

Fig.13 Test experiment for grinding accuracy

磨削实验由同一人完成, 分别分析在有机器人辅助和无机器人辅助(机器人不进行补偿且不提供视觉反馈信息)条件下的磨削精度, 实验重复 5 次. 实验样品为密度与力学性能接近松质骨的人工骨块(F1839-08 50 PCF, SAWBONES, 美国), 所有实验均在同一骨块上完成, 设定磨削转速为 15 000 r/min.

机器人辅助磨削实验中, 启用第 3.1 节中机器人控制算法, 握持机器人以约 2 mm/s 的速度沿 Q_1Q_2 进行磨削, 通过光学跟踪系统记录实验过程中机器人末端刀具中心的运动轨迹. 无机器人辅助的磨削实验中, 将机器人调整至零位并关闭机器人控制算法, 并在骨块表面绘制的规划磨削路径, 同样以约 2 mm/s 的速度进行磨削, 并通过光学跟踪系统记录实验过程中刀具中心的运动轨迹.

选取 5 次重复实验中的一次实验进行分析, 将记录的刀具中心运动轨迹分别投影在 $X_sO_sZ_s$ 平面(深度方向)和 $X_sO_sY_s$ 平面(水平方向), 结果如图 14 和图 15 所示. 从图中可以看出, 机器人辅助磨削时刀具中心在深度方向和水平方向的运动轨迹均更接近规划路径, 表明机器人辅助时具有更好的磨削效果. 图 16 展示了有机器人辅助和无机器人辅助的磨削效果对比.

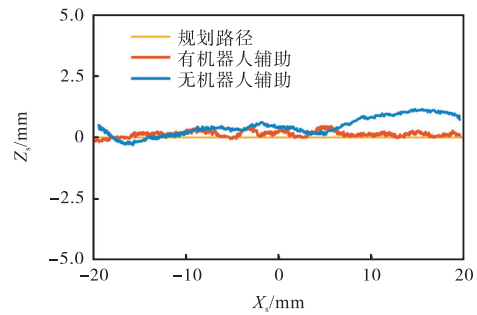


图 14 深度方向刀具中心轨迹

Fig.14 Depth direction trajectories of the tool center

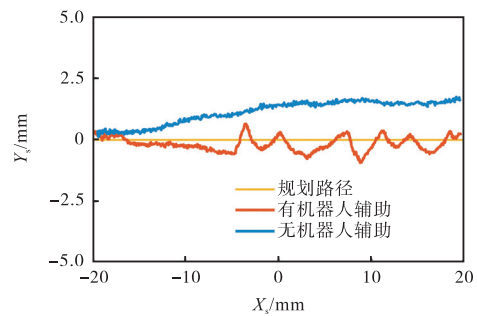
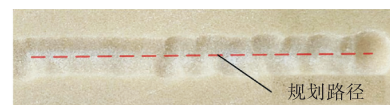
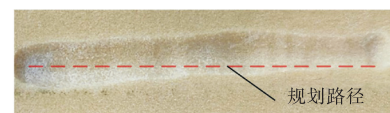


图 15 水平方向刀具中心轨迹

Fig.15 Horizontal direction trajectories of the tool center



(a) 有机器人辅助



(b) 无机器人辅助

图 16 磨削效果对比

Fig.16 Comparison of the grinding results

以刀具中心实际运动轨迹与规划路径间平均距离误差作为磨削精度评价指标, 5 次重复实验的误差对比如图 17 所示. 在机器人辅助磨削实验中, 深度方向和水平方向的误差分别为 (0.31 ± 0.14) mm, (0.41 ± 0.16) mm; 在无机器人辅助的磨削实验中, 深度方向和水平方向的误差分别为 (0.77 ± 0.29) mm,

(1.08 ± 0.41) mm. 实验结果表明,手持式椎板磨削手术机器人通过实施实时位置补偿控制,显著降低了两个方向上刀具中心的轨迹偏差,提升了铣削路径的执行精度,尤其在手术关键的深度方向表现出更为稳定的补偿效果。

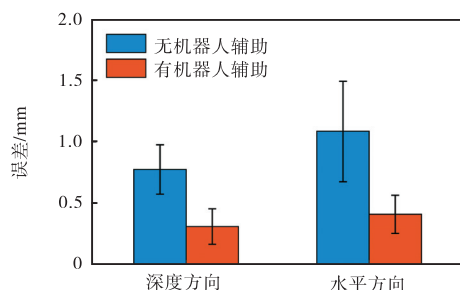


图 17 不同操作方式下磨削精度对比统计结果

Fig.17 Comparison of the statistical results of grinding accuracy under different control strategies

本文所设计的手持式椎板磨削手术机器人的路径跟随误差为 0.560 mm(综合深度方向和水平方向误差),低于无机器人辅助时 1.380 mm 的跟随误差.同时,现有手持式手术机器人的路径跟随误差约 1.50 mm^[17],相比之下,本研究设计的机器人跟踪误差更小,表明该手持式机器人在辅助椎板磨削方面具有可行性.另外,该机器人具有结构紧凑、空间占用小、不易干涉以及低成本的优势,展现出良好的高精度磨削能力和潜在的临床推广价值.实验中影响机器人辅助磨削精度的主要因素是采用了较易实现但精度有限的位置控制算法.采用第 3.1 节中所述的反馈控制算法对手持式椎板磨削机器人进行位置控制时,光学定位传感器的测量延迟、执行器延迟等会导致路径跟踪误差并造成操作的“跟手性”下降,在后续的工作中,将引入速度/加速度前馈控制,进行超前补偿以减小跟踪误差。

4 结 论

针对现有接地式椎板磨削手术机器人存在的空间占用大、手术灵活性不足及成本较高等问题,本文提出并设计了一种具备三自由度的手持式椎板磨削手术机器人.该系统在保持机器人高精度控制能力的同时,兼顾了医生操作的灵活性与手术现场环境的适应性,有效提升了临床使用的可行性与经济性.主要研究结论如下。

(1) 提出了一种基于并联机构的手持式椎板磨削手术机器人结构方案.基于高精度并联机构,结合光学跟踪系统补偿手部运动,在无需大型接地式平台

的前提下保障磨削精度,具备良好的小型化潜力。

(2) 建立了机器人运动学模型并以结合了运动学性能的空间利用率为性能指标对结构参数进行优化设计.优化后机器人优质工作空间体积提升 10.49% 的同时,占用空间体积减小 9.33%,有效兼顾了运动性能与操作简便性,为空间受限条件下机器人的性能优化设计提供了理论依据。

(3) 完成了样机研制与实验验证.实验结果表明机器人末端定位精度为 0.516 mm;机器人辅助磨削精度为 0.560 mm,优于无机器人辅助时的磨削精度,验证了所提手持式椎板磨削手术机器人的可行性。

综上所述,本文所提出的手术机器人在实现结构紧凑设计的同时,兼顾操作灵活性与路径控制精度,体现出较优的系统集成性能与临床可操作性.针对实际手术场景中可能出现的视觉遮挡问题,未来将融合惯性传感器以增强定位鲁棒性,并集成力反馈机制以调控磨削过程,提升安全性和组织保护能力.同时,结合术中导航与多模态感知,将进一步提升系统在复杂脊柱手术中的环境适应性与智能化水平。

参考文献:

- [1] Nagoshi N, Tsuji O, Okada E, et al. Clinical indicators of surgical outcomes after cervical single open-door laminoplasty assessed by the Japanese Orthopaedic Association Cervical Myelopathy Evaluation Questionnaire[J]. Spinal Cord, 2019, 57(8): 644-651.
- [2] Agabegi S S, McClung H L. Open lumbar laminectomy: Indications, surgical techniques, and outcomes [J]. Seminars in Spine Surgery, 2013, 25(4): 246-250.
- [3] Lee Y S, Cho D C, Kim K T. Navigation-guided/robot-assisted spinal surgery: A review article [J]. Neurospine, 2024, 21(1): 8-17.
- [4] Joseph J R, Smith B W, Liu X, et al. Current applications of robotics in spine surgery: A systematic review of the literature [J]. Neurosurgical Focus, 2017, 42(5): 1-18.
- [5] Li Z, Yu G, Jiang S, et al. Robot-assisted laminectomy in spinal surgery: A systematic review [J]. Annals of Translational Medicine, 2021, 9(8): 715.
- [6] Deng Z, Zhang H, Guo B, et al. Hilbert-Huang transform based state recognition of bone milling with force sensing [C]//IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Yinchuan, China, 2013: 937-942.
- [7] Jin H, Hu Y, Tian W, et al. Kinematics and

- cooperative control of a robotic spinal surgery system[J]. *Robotica*, 2016, 34(1): 226-242.
- [8] Li S, Du Z, Yu H. A robot-assisted spine surgery system based on intraoperative 2D fluoroscopy navigation[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 51786-51802.
- [9] Li Q, Du Z, Liu F, et al. Tactile perception for surgical status recognition in robot-assisted laminectomy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11425-11435.
- [10] Bhagvath P V, Mercier P, Hall A F. Design and accuracy assessment of an automated image-guided robotic osteotomy system[J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2024, 6(1): 96-109.
- [11] Vossel M, Theisgen L, Wickel N, et al. MINARO DRS: Usability study of a robotic-assisted laminectomy [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2025, 20(2): 357-367.
- [12] 樊路平. 基于力反馈的小型椎板磨削手术机器人设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Fan Luping. Design and Analysis of a Compact Robotic Surgical System for Vertebral Lamina Grinding Task Based on Force Feedback Place[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [13] Wu L, Du Z, Yu H, et al. Design and analysis of a drive and perception integration manipulator for spinal surgery[C]//7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering(ICMRE). Budapest, Hungary, 2021: 131-136.
- [14] Payne C J, Yang G-Z. Hand-held medical robots[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2014, 42(8): 1594-1605.
- [15] Schwarz M L, Wagner A, El-Shenawy A, et al. A handheld robot for orthopedic surgery-ITD[C]//Proceeding of the 11th International Congress of the IUPESM/World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. Munich, Germany, 2009: 99-102.
- [16] Hung S S, Hsu A S F, Ho T H, et al. A robotized handheld smart tool for orthopedic surgery[J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2021, 17(5): e2289.
- [17] Yen P L, Ho T H. Shared control for a handheld orthopedic surgical robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8394-8400.
- [18] Lonner J H, Smith J R, Picard F, et al. High degree of accuracy of a novel image-free handheld robot for unicondylar knee arthroplasty in a cadaveric study[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2015, 473(1): 206-212.
- [19] Vossel M, Muller M, Niesche A, et al. MINARO HD: Control and evaluation of a handheld, highly dynamic surgical robot[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2021, 16(3): 467-474.
- [20] Sun Y, Jiang Z, Qi X, et al. Robot-assisted decompressive laminectomy planning based on 3D medical image[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 22557-22569.
- [21] 夏光明, 王 瑞, 张丽娜, 等. 基于振动信号融合的手术机器人椎板磨削剩余厚度识别[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(10): 1016-1025.
Xia Guangming, Wang Rui, Zhang Lina, et al. Recognition of remaining thickness of lamina milling via a surgical robot based on vibration signal fusion[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2022, 55(10): 1016-1025(in Chinese).
- [22] Winter F, Hasslinger S, Frueh A, et al. Incidence, risk factors, and treatment of incidental durotomy during decompression in degenerative lumbar spine conditions [J]. *Journal of Neurosurgical Sciences*, 2023, 67(4): 507-511.
- [23] Liu Y, Zeng C, Fan M, et al. Assessment of respiration-induced vertebral motion in prone-positioned patients during general anaesthesia[J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2016, 12(2): 214-218.
- [24] Wang J, Wu C, Liu X J. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [25] Stock M, Miller K. Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: Application to linear delta robot[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(2): 292-301.
- [26] Wu J, Wang X, Zhang B, et al. Multi-objective optimal design of a novel 6-DOF spray-painting robot[J]. *Robotica*, 2021, 39(12): 2268-2282.
- [27] Becker B C, MacLachlan R A, Lobes L A, et al. Vision-based control of a handheld surgical micromanipulator with virtual fixtures[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(3): 674-683.

(责任编辑: 王晓燕)