文章编号:1671-4598(2026)10-0152-09 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.10.020 中图分类号:TP242 文献标识码:A

基于辅助约束与变阶分数阶导纳的医疗串联机械臂柔顺交互控制

孙 旭, 王榜捷, 王 俊
(喀什地区第一人民医院 医学装备科, 新疆 喀什 844000)

摘要: 为解决医疗串联机械臂在狭窄敏感空间接触任务中存在的安全边界受限、接触力波动及柔顺性不足问题, 提出一种融合辅助约束、变阶分数阶导纳与控制障碍函数 (CBF) 的柔顺交互控制方法; 该方法依据医学影像构建个体化辅助约束, 并以符号距离场表征安全裕度; 设计了基于接触状态估计的变阶分数阶导纳控制器, 在线调节导纳阶次以生成柔顺位姿修正; 构建了融合几何、力及关节平滑性约束的 CBF-QP 安全滤波器, 对名义运动进行最小化修正以确保安全; 半实验结果表明, 在曲面边缘划动任务中, 所提方法的平均轨迹误差为 0.23 mm, 接触力均方根误差为 0.71 N, 最大力超调为 8.59%, 相较于传统导纳控制方法, 在轨迹精度和接触力稳定性方面均表现出显著优势, 满足了医疗接触任务对高安全与高柔顺性的应用需求。

关键词: 医疗串联机械臂; 辅助约束; 控制障碍函数; 变阶分数阶导纳; 柔顺交互控制

A Compliant Interaction Control Method for Medical Serial Manipulators Based on Auxiliary Constraints and Variable-order Fractional Admittance

SUN Xu, WANG Bangjie, WANG Jun
(Medical Equipment Department, First People's Hospital of Kashgar Region Kashgar, Kashgar 844000, China)

Abstract: To solve the problems of limited safety boundaries, fluctuating contact force, and insufficient compliance in the contact task of a medical serial manipulator in narrow and sensitive spaces, a compliant interactive control method is proposed, which integrates auxiliary constraint, variable-order fractional admittance, and control barrier functions (CBF). This method constructs individualized auxiliary constraints based on medical images, with a symbolic distance field representing a safety margin, designs a variable-order fractional admittance controller based on a contact state estimation, adjusts the admittance order online to generate compliant posture corrections, and presents a control barrier function-based quadratic programming (CBF-QP) safety filter integrating geometric, force, and joint smoothness constraints, thus achieving a minimizing nominal motion correction to ensure safety. Semi-experimental results show that in the sliding on the edge of a curved surface, the average trajectory error of the proposed method is 0.23 mm, the root mean square error of contact force is 0.71 N, and the overshoot of maximum force is 8.59%. This method has significant advantages over the traditional admittance control method in both trajectory accuracy and contact force stability, meeting the application requirements of high safety and high compliance for medical contact tasks.

Keywords: medical serial manipulator; auxiliary constraints; control barrier function; variable-order fractional admittance; compliant interaction control

0 引言

医疗串联机械臂在内窥镜检查、超声扫描等精密操作中应用日益广泛, 这类任务要求机械臂在人体狭窄敏感空间内运动, 不仅需保证高精度轨迹跟踪, 还需满足严苛的安全边界约束并与柔软组织进行柔顺交互[1-3]。传统位置控制在面对非结构化生物组织时易导致接触力突变, 而整数阶导纳控制虽能改善柔顺性, 但其基于质量-阻尼-刚度二阶模型, 对生物组织复杂黏弹特性的描述能力有限, 难以兼顾响应速度、稳定性和接触力平

收稿日期:2026-07-07; **修回日期**:2026-08-17。
作者简介:孙 旭(1985-),男,大学本科,工程师。
引用格式:孙 旭,王榜捷,王 俊. 基于辅助约束与变阶分数阶导纳的医疗串联机械臂柔顺交互控制[J]. 计算机测量与控制, 2026,34(10):152-160.

稳性[4-5]。针对柔性及柔顺机械臂在与环境交互时面临的模型不确定性、外部时变干扰等挑战，现有研究已取得显著进展。为提升系统的鲁棒性与稳定性，一种主流方法是设计观测器对未知动态和外部扰动进行估计与补偿，如蒋一鸣等人[6]采用广义比例积分观测器进行机械臂控制分析，以抑制扰动对轨迹精度的影响。在处理物理接触任务方面，阻抗控制是实现柔顺交互的关键技术。毕梦莹等人[7]通过设计动态阻抗参数、构建双环控制架构以及利用粒子群等智能算法优化力控参数，致力于平衡接触力与末端位置的跟踪精度。此外，为提升特定场景下的控制性能，也有学者融合了视觉反馈或采用B样条曲线进行轨迹规划，并通过改进的元启发式算法在线整定控制器增益，以实现更优的稳态控制效果[8-9]。然而多数研究大多依赖于传统的整数阶控制器，其在描述和模拟与人体软组织等复杂对象交互时的粘弹性动态特性方面存在局限，难以在更宽的频域范围内灵活调节系统的柔顺性能。同时，在强调安全性的医疗应用中，部分柔顺控制策略在统一处理个体化安全边界、复杂接触动力学和多重约束实时优化方面仍存在挑战。

因此。针对上述问题，研究围绕医疗串联机械臂在狭窄敏感空间中的安全柔顺操作需求，提出融合辅助约束、变阶分数阶导纳和控制障碍函数（CBF）安全滤波的柔顺交互控制方法。通过提出变阶分数阶导纳（V-FAC）控制器来实现柔顺生成，并借助点、线、面形式的辅助约束，将医学影像或任务规划中的安全边界转化为约束逆运动学目标函数中的显式约束项，并构建二次规划（QP）安全滤波器对 V-FAC 生成的名义运动指令进行审查和最小化修正。

1　辅助约束与分数阶导纳的融合柔顺交互控制方法

图 1 为融合辅助约束、变阶分数阶导纳与 CBF-QP 安全滤波的柔顺交互控制框架，分为四层：感知估计层、输入层、名义柔顺运动生成层、安全滤波与指令执行层。感知层采集机器人位姿与外力，在线估算接触刚度、力变化率，得到接触状态因子 ξ。柔顺运动层依据 ξ 动态调整分数阶导纳阶次，结合力误差求解位置修正量，叠加期望轨迹生成名义末端速度 v_{nom}。安全滤波层以 v_{nom} 为优化目标，将几何、接触力、关节平滑约束转化为 CBF 不等式约束，求解 QP 对名义速度小幅修正，输出安全关节速度指令，积分后下发至机器人底层执行。

1.1　医学影像驱动的个体化辅助约束生成与表达

医疗串联机械臂在口腔检测、超声扫描和靶向触诊等接触式任务中，通常需要在狭窄、非结构化且个体差异明显的解剖空间内运动[10]。传统辅助约束多采用人工设定的点、线、面几何图元，难以准确描述由患者个体影像得到的复杂禁入区域、曲面边界和安全通道[11]。研究将医学影像分割结果转化为患者个体化安全场，并在此基础上构建面向串联机械臂末端工具和关键连杆的辅助约束集合。

研究通过术前标定获得医学影像坐标系到机器人基坐标系的变换后，将影像中的几何信息映射到机器人工作空间。考虑图像分割误差、配准误差和机械臂控制误差，对风险组织区域进行安全膨胀，得到扩展禁入区域：

$$\Omega_{\mathrm{forbid}} = \Omega_{\mathrm{risk}} \oplus B(\rho) \tag{1}$$

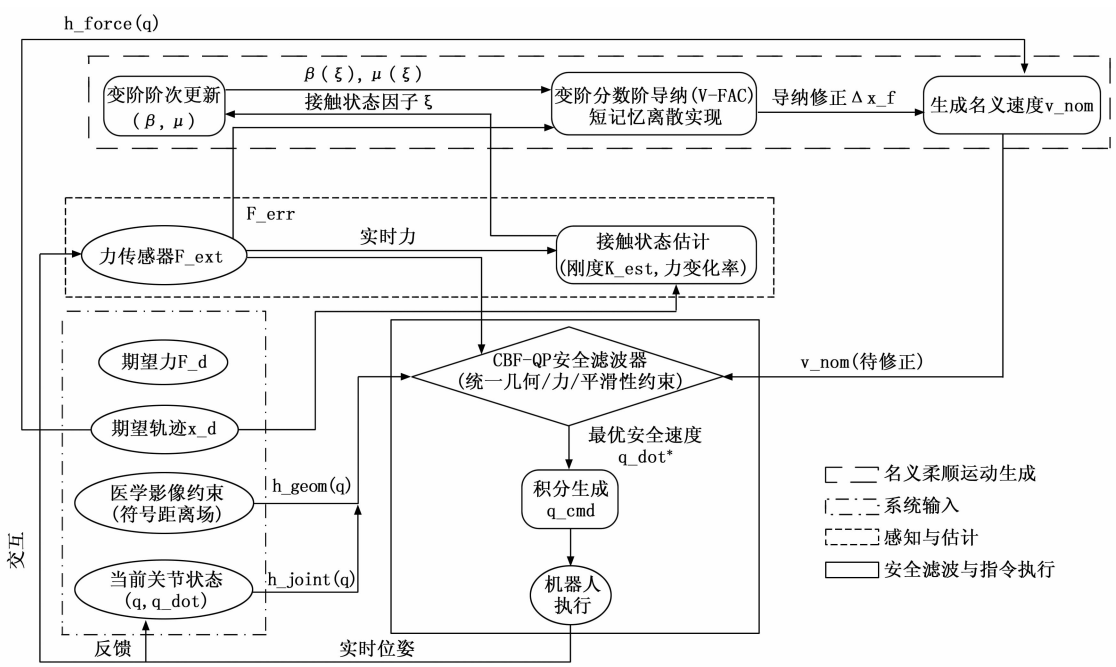


图 1　融合柔顺交互控制框架

式中，⊕为 Minkowski 和，$B(\rho)$ 为半径为 ρ 的球形安全裕度。为便于实时控制器调用，将扩展禁入区域 Ω_{forbid} 转化为符号距离场 $D(p)$。对于任意空间点 p，$D(p)$ 定义为该点到禁入区域边界的最短距离，可依据值确定点与区域位置的关系。设机械臂关节变量为：

$$q = [q_1, q_2, \cdots, q_n]^T \tag{2}$$

机械臂第 i 个连杆上的第 m 个安全监测点在局部坐标系下为 $r_{i,m}$，则该点在机器人基坐标系下的位置为：

$$p_{i,m}(q) = {}^B\boldsymbol{T}_i(q) r_{i,m} \tag{3}$$

式中，${}^B\boldsymbol{T}_i(q)$ 为由正运动学得到的第 i 个连杆坐标系相对于机器人基坐标系的变换矩阵。为保证末端工具和关键连杆均不进入风险区域，对每个安全监测点建立不等式约束：

$$h_{i,m}(q) = D[p_{i,m}(q)] - \rho_{\text{add}} \geqslant 0 \tag{4}$$

式中，ρ_{add} 为额外保守安全距离。由此可得到医学影像驱动的辅助约束集合：

$$\boldsymbol{C}_{\text{img}} = \{q \mid h_{i,m}(q) \geqslant 0, i \in \boldsymbol{J}_c, m = 1,2,\cdots,M_i\} \tag{5}$$

其中：$\boldsymbol{J}_c$ 为需要进行约束监测的关键连杆集合，M_i 为第 i 个连杆上的安全监测点数量。关键连杆不应任意选取，而应根据其对末端位姿的影响程度和与风险组织的空间接近程度确定。根据连杆与风险组织的空间接近度和运动影响，选取关键连杆并设置安全监测点。

1.2 基于控制障碍函数的辅助约束安全滤波器

实际接触式医疗操作中，仅以辅助约束作为逆运动学优化目标或惩罚项存在明显不足[12]。因此，研究在辅助约束集合的基础上进一步引入控制障碍函数(CBF，control barrier function)，构建面向几何边界和接触力边界的实时安全滤波器。

设由分数阶导纳控制器生成的名义末端速度为：

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{\text{nom}} = \frac{x_t - x_c}{T} \tag{6}$$

式中，x_t 为叠加导纳修正后的目标位姿，x_c 为当前末端位姿，T 为控制周期。为避免名义指令对安全约束的破坏，研究将 $\dot{x}_{\text{nom}}$ 视为待修正的名义运动意图，并通过 CBF-QP 安全滤波器求得最终关节速度指令 $\dot{q}^*$。

根据符号距离场约束，对机械臂第 i 个关键连杆上的第 m 个安全监测点，有：

$$h_{i,m}(q) = D[p_{i,m}(q)] - \rho_{\text{add}} \tag{7}$$

其中：$D[p_{i,m}(q)]$ 为监测点到禁入区域边界的符号距离，ρ_{add} 为额外安全裕度。为保证系统状态不离开安全集合，引入一阶控制障碍函数约束：

$$\dot{h}_{i,m}(q,\dot{q}) + \gamma_{i,m} h_{i,m}(q) \geqslant 0 \tag{8}$$

式中，$\gamma_{i,m} > 0$ 为安全恢复系数。由于：

$$\dot{h}_{i,m}(q,\dot{q}) = \nabla D(p_{i,m})^T \boldsymbol{J}_{i,m}(q)\dot{q} \tag{9}$$

其中：$\boldsymbol{J}_{i,m}(q)$ 为安全监测点 $p_{i,m}(q)$ 对应的几何雅可比矩阵，因此式(9)可写成对关节速度 $\dot{q}$ 的线性不等式约束：

$$\nabla D(p_{i,m})^T \boldsymbol{J}_{i,m}(q)\dot{q} + \gamma_{i,m}^{\{D[p_{i,m}(q)] - \rho_{\text{add}}\}} \geqslant 0 \tag{10}$$

除几何约束外，医疗接触任务还必须限制末端接触力[13]。设末端力传感器测得的滤波后交互力为 F_f，接触法向单位向量为 $\boldsymbol{n}_c$，则法向接触力为：

$$F_n = \boldsymbol{n}_c^T F_f \tag{11}$$

定义力安全函数：

$$h_F = F_{\max} - F_n \tag{12}$$

式中，$F_{\max}$ 为任务允许的最大安全接触力。为避免接触力继续增大并超过安全阈值，引入力约束 CBF[14-15]。同时考虑在实际控制中，组织环境刚度未知且随接触位置变化，因此研究采用局部刚度估计，则此时的力约束 CBF 在当末端沿接触法向继续压入组织时的公式可表示为：

$$-\hat{K}_{\text{env}} n_c^T \boldsymbol{J}_e(q)\dot{q} + \gamma_F(F_{\max} - F_n) \geqslant 0 \tag{13}$$

当实时接触力接近 $F_{\max}$ 时，安全滤波器将抑制末端沿法向继续压入组织的速度；当接触力远低于阈值时，该约束对名义导纳运动的影响较小。

综合几何安全、力安全、关节限位和速度限位，研究构建如下 CBF-QP 安全滤波器：

$$\begin{aligned}
\dot{q}^* = \arg\min_{\dot{q},s} & \left\|\boldsymbol{J}_e(q)\dot{q} - \dot{x}_{\text{nom}}\right\|_{W_x}^2 + \lambda_q \left\|\dot{q} - \dot{q}_{\text{prev}}\right\|^2 + \lambda_s \|s\|^2 \\
\text{s.t. } & \nabla D(p_{i,m})^T \boldsymbol{J}_{i,m}(q)\dot{q} + \gamma_{i,m} h_{i,m}(q) \geqslant 0 \\
& \dot{h}_a(q,\dot{q}) + \gamma_a h_a(q) \geqslant -s_a \\
& \hat{K}_{\text{env}} n_c^T \boldsymbol{J}_e(q)\dot{q} + \gamma_F(F_{\max} - F_n) \geqslant 0 \\
& q_{\min} \leqslant q + T\dot{q} \leqslant q_{\max} \\
& \dot{q}_{\min} \leqslant \dot{q} \leqslant \dot{q}_{\max} \\
& s_a \geqslant 0
\end{aligned} \tag{14}$$

式中，第一项用于保持末端运动尽可能接近分数阶导纳生成的名义速度；第二项用于限制关节速度突变，提高控制指令平滑性；第三项为松弛变量惩罚项。$\boldsymbol{W}_x$ 为任务空间权重矩阵，λ_q 和 λ_s 分别为速度平滑项和松弛变量的权重系数。

在构建的 CBF-QP 安全滤波器中，多约束冲突的优先级处理机制通过硬约束与软约束的设定，以及松弛变量的引入得以实现。几何安全约束($h_{\text{geom}} \geqslant 0$)和接触力安全约束($h_{\text{force}} \geqslant 0$)被定义为硬约束，具有最高优先级。这意味着在任何情况下，QP 求解器都必须找到一个满足这些不等式的解，以保证绝对安全。当多个硬约束(例如，机械臂被夹在两个禁入区域之间)或硬约束与任务目标(最小化 $\|v - v_{\text{nom}}\|$)发生冲突，导致 QP 问题无解时，传统的 QP 会失败。为避免这种情况，研究为非安全关键型约束或可能冲突的硬约束引入松弛变量 ζ。松弛变量主要用于处理极端情况，确保 QP 问题始终有解。松弛变量 ζ 在常规操作中应为零，只有当所有硬约束无法同时满足时，QP 求解器为了找到可行

解，才会被迫使 ζ 取非零值。优化目标函数中的惩罚项 $p\|\zeta\|^2$（其中 p 是一个非常大的正数）确保了系统会以最小的代价（即最小程度地违反约束）来化解冲突。

1.3　接触状态估计与变阶分数阶导纳控制

1.3.1　末端接触状态估计

设六维力传感器采集到的原始交互力为 F_e，经低通滤波后得到 F_f。对于超声扫描、口腔触诊和曲面边缘划动等任务，主要控制目标通常为接触法向力。为描述接触环境的软硬程度，利用相邻采样周期内法向接触力和法向位移变化估计局部环境刚度：

$$\hat{K}_{\mathrm{env},k}=\frac{F_{n,k}-F_{n,k-1}}{n_c^T(x_{e,k}-x_{e,k-1})+\varepsilon} \tag{15}$$

式中，$x_{e,k}$ 为第 k 个采样周期的末端位置，ε 为防止分母为零的小正数[16]。为刻画接触力突变程度，定义法向力变化率，并根据接触力、环境刚度和力变化率，构造接触状态因子：

$$\sigma_{c,k}=w_K\,\mathrm{sat}\left(\frac{\hat{K}_{\mathrm{env},k}^{f}-K_{\mathrm{soft}}}{K_{\mathrm{hard}}-K_{\mathrm{soft}}},0,1\right)+w_F\,\mathrm{sat}\left(\frac{|\dot{F}_{n,k}|}{\dot{F}_{\max}},0,1\right) \tag{16}$$

其中：K_{soft} 和 K_{hard} 分别为软接触和硬接触的刚度阈值，$\dot{F}_{\max}$ 为允许的最大力变化率，w_K 和 w_F 为权重系数，满足 $w_K+w_F=1$。

1.3.2　变阶分数阶导纳模型

分数阶黏弹模型能够用较少参数描述具有蠕变、应力松弛和记忆效应的生物组织动力学，分数阶阶次与其他参数之间存在频率相关耦合，参数选择并不直观[17-18]。因此研究将分数阶阶次设计为随接触状态在线变化的参数，构建变阶分数阶导纳模型：

$$M_dD_t^{\beta_k}\Delta x_e+D_dD_t^{\mu_k}\Delta x_e+K_d\Delta x_e=e_F \tag{17}$$

式中，$D_t^{\beta_k}$ 和 $D_t^{\mu_k}$ 分别为 β_k 阶和 μ_k 阶分数阶微分算子，β_k 为惯性项阶次，μ_k 为阻尼项阶次，Δx_e 为由导纳控制器生成的末端位置修正量，M_d、D_d 和 K_d 分别为期望虚拟质量、虚拟阻尼和虚拟刚度。其中 β_k 和 μ_k 不再取固定常数，而是根据接触状态因子 $\sigma_{c,k}$ 在线调整：

$$\beta_k=\beta_{\min}+(\beta_{\max}-\beta_{\min})\sigma_{c,k} \tag{18}$$

$$\mu_k=\mu_{\min}+(\mu_{\max}-\mu_{\min})\sigma_{c,k} \tag{19}$$

式中，$\beta_{\min}$、$\beta_{\max}$、$\mu_{\min}$ 和 $\mu_{\max}$ 分别为分数阶阶次的上下限。为保证系统具有稳定、可解释的黏弹响应，研究取：

$$1<\beta_{\min}\leqslant\beta_k\leqslant\beta_{\max}<2 \tag{20}$$

$$0<\mu_{\min}\leqslant\mu_k\leqslant\mu_{\max}\leqslant1 \tag{21}$$

当机械臂接触软组织且力变化平稳时，$\sigma_{c,k}$ 较小，β_k 和 μ_k 取较低值，系统表现出较强柔顺性和长记忆平滑特性，有利于降低探头或触诊工具对组织的瞬时冲击。当接触区域刚度升高或接触力快速变化时，$\sigma_{c,k}$ 增大，β_k 和 μ_k 随之提高，使系统具备更强的等效惯性和阻尼能力，从而抑制力超调和高频振荡。

1.3.3　法向柔顺修正与切向轨迹保持

在医疗扫描和触诊任务中，末端工具通常需要沿切向轨迹运动，同时在法向方向维持稳定接触力[19]。为避免导纳控制破坏原始任务轨迹，研究仅在接触法向方向施加分数阶导纳修正，设由变阶分数阶导纳控制器得到的法向位置修正量为 $\Delta x_{n,k}$，则末端三维位置修正量为：

$$\Delta x_{e,k}=\Delta x_{n,k}n_c \tag{22}$$

修正后的目标位置为：

$$x_{t,k}=x_{d,k}+\Delta x_{e,k} \tag{23}$$

式中，$x_{d,k}$ 为任务规划器给出的期望轨迹点。对于曲面边缘划动和超声扫描任务，$x_{d,k}$ 主要决定末端沿组织表面的切向运动，$\Delta x_{e,k}$ 主要用于调节法向接触力。

1.3.4　变阶导纳参数约束与安全耦合

变阶分数阶导纳控制器输出的是名义柔顺修正量，为保证导纳输出不会破坏医学影像安全约束，研究采用“先柔顺修正、后安全滤波”的串联结构。即首先生成柔顺位置修正量 $\Delta x_{e,k}$，得到修正目标 $x_{t,k}$；随后将由 $x_{t,k}$ 计算得到的名义末端速度输入 CBF-QP 安全滤波器，由安全滤波器生成最终关节速度指令。

为保证导纳控制器本身的基本稳定性，参数需满足：

$$M_d>0,D_d>0,K_d>0 \tag{24}$$

$$1<\bar{\beta}_k<2,0<\bar{\mu}_k\leqslant1 \tag{25}$$

同时，为防止导纳修正量过大导致末端快速压入组织，设置位置修正幅值限制：

$$\|\Delta x_{e,k}\|\leqslant\Delta x_{\max} \tag{26}$$

以及法向修正速度限制：

$$\left\|\frac{\Delta x_{e,k}-\Delta x_{e,k-1}}{T}\right\|\leqslant v_{\mathrm{adm},\max} \tag{27}$$

其中：$\Delta x_{\max}$ 为最大允许导纳位移，$v_{\mathrm{adm},\max}$ 为最大允许导纳修正速度。

1.4　短记忆分数阶离散实现与指令平滑约束

1.4.1　变阶分数阶算子的短记忆离散

研究采用短记忆 Grünwald-Letnikov 离散方法实现变阶分数阶导纳模型，以满足医疗机械臂毫秒级控制周期要求对于第 k 个控制周期，设采样周期为 T，分数阶阶次为 α_k，其中 α_k 可取 2.3 节中的 $\bar{\beta}_k$ 或 $\bar{\mu}_k$。根据 Grünwald-Letnikov 定义，信号 $y(t)$ 的 α_k 阶分数阶导数可离散近似为：

$$D_t^{\alpha_k}y_k\approx\frac{1}{T^{\alpha_k}}\sum_{j=0}^{L_k}c_j^{\alpha_k}y_{k-j} \tag{28}$$

式中，L_k 为短记忆窗口长度，$c_j^{\alpha_k}$ 为分数阶二项式系数[20]。为避免每个周期重复计算组合数，系数采用递推方式得到：

$$c_0^{\alpha_k}=1 \tag{29}$$

$$c_j^{\alpha_k}=\left(1-\frac{\alpha_k+1}{j}\right)c_{j-1}^{\alpha_k},j=1,2,\cdots,L_k \tag{30}$$

α_k会随接触状态在线变化，为降低计算量，设置阶次更新阈值 $\Delta\alpha_{th}$。短记忆窗口长度 L_k 的选择需要在低频精度和实时性之间折中，考虑到软组织稳定接触更依赖历史记忆，而硬接触或力突变更需要快速响应，研究根据接触状态因子 $\sigma_{c,k}$设置自适应记忆窗口：

$$L_k = [L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min})(1-\xi)] \tag{31}$$

式中，$L_{\min}$和 $L_{\max}$分别为最小和最大记忆窗口长度。对于研究 4 ms 控制周期的系统，可取 $L_{\min}=50$、$L_{\max}=120$，在保证分数阶近似精度的同时满足实时计算需求。

1.4.2 变阶分数阶导纳递推求解

由 2.3 节可知，变阶分数阶导纳模型为：

$$M_d D_t^{\beta_k}\Delta x_e + D_d D_t^{\mu_k}\Delta x_e + K_d\Delta x_e = e_F \tag{32}$$

将式（28）代入式（32），可得：

$$\frac{M_d}{T^{\beta_k}}\sum_{j=0}^{L_{\beta,k}} c_j^{\beta_k}\Delta x_{e,k-j} + \frac{D_d}{T^{\mu_k}}\sum_{j=0}^{L_{\mu,k}} c_j^{\mu_k}\Delta x_{e,k-j} + K_d\Delta x_{e,k} = e_{F,k} \tag{33}$$

由于 $c_0^{\beta_k}=c_0^{\mu_k}=1$，可将当前项 $\Delta x_{e,k}$与历史项分离，得到递推求解形式：

$$A_k\Delta x_{e,k} = e_{F,k} - \frac{M_d}{T^{\beta_k}}\sum_{j=1}^{L_{\beta_k}} c_j^{\beta_k}\Delta x_{e,k-j} - \frac{D_d}{T^{\mu_k}}\sum_{j=1}^{L_{\mu_k}} c_j^{\mu_k}\Delta x_{e,k-j} \tag{34}$$

因此，当前周期的导纳修正量可表示为：

$$\Delta x_{e,k} = \frac{e_{F,k} - \frac{M_d}{T^{\beta_k}}\sum_{j=1}^{L_{\beta_k}} c_j^{(\beta_k)}\Delta x_{e,k-j} - \frac{D_d}{T^{\mu_k}}\sum_{j=1}^{L_{\mu_k}} c_j^{(\mu_k)}\Delta x_{e,k-j}}{\frac{M_d}{T^{\beta_k}} + \frac{D_d}{T^{\mu_k}} + K_d} \tag{35}$$

对于六自由度串联机械臂的医疗接触任务，导纳修正通常只作用于接触法向方向，因此实际递推只需计算一维法向修正量，再通过接触法向量映射到三维任务空间：

$$\Delta x_{\text{adm},k} = \Delta x_{n,k}\boldsymbol{n}_c \tag{36}$$

其中：$\Delta x_{n,k}$为得到的法向导纳修正量，$\boldsymbol{n}_c$ 为接触表面法向单位向量。该处理能够降低计算复杂度，并避免导纳控制对切向轨迹造成不必要扰动。

1.4.3 导纳修正量的限幅与平滑处理

分数阶导纳控制器直接根据力误差生成位置修正量。当力传感器噪声较大、接触刚度估计异常或组织边界突变时，导纳输出可能出现瞬时跳变[21]。为避免末端工具快速压入组织，研究对导纳修正量设置幅值、速度、加速度和 jerk 约束。

首先，对导纳修正量设置幅值限制：

$$\|\Delta x_{\text{adm},k}\| \leqslant \Delta x_{\max} \tag{37}$$

其次，对导纳修正速度进行限制：

$$\|\Delta x_{\text{adm},k} - \Delta x_{\text{adm},k-1}\| \leqslant v_{\text{adm},\max}T \tag{38}$$

进一步地，对导纳修正加速度进行限制：

$$\|\Delta x_{\text{adm},k} - 2\Delta x_{\text{adm},k-1} + \Delta x_{\text{adm},k-2}\| \leqslant a_{\text{adm},\max}T^2 \tag{39}$$

最后，对导纳修正 jerk 进行限制：

$$\|\Delta x_{\text{adm},k} - 3\Delta x_{\text{adm},k-1} + 3\Delta x_{\text{adm},k-2} - \Delta x_{\text{adm},k-3}\| \leqslant j_{\text{adm},\max}T^3 \tag{40}$$

式中，$\Delta x_{\max}$，$v_{\text{adm},\max}$和 $j_{\text{adm},\max}$分别为导纳修正量、修正速度、修正加速度和修正 jerk 的上限。经过限幅和平滑后的导纳修正量记为：

$$\Delta x_{\text{adm},k}^{s} = \boldsymbol{J}(\Delta x_{\text{adm},k}) \tag{41}$$

其中：$\boldsymbol{J}(\cdot)$ 为 jerk 受限平滑算子。最终目标位姿更新为：

$$\boldsymbol{x}_{t,k} = \boldsymbol{x}_{d,k} + \Delta x_{\text{adm},k}^{s} \tag{42}$$

式中，$x_{d,k}$为任务规划器给出的期望位姿，$x_{t,k}$为输入 2.2 节 CBF-QP 安全滤波器的名义目标位姿。

1.4.4 关节指令的速度－加速度-jerk 约束

CBF-QP 安全滤波器能够保证几何安全和力安全，但若仅对关节速度进行限制，仍可能在相邻控制周期内产生较大的关节加速度或 jerk，进而造成末端抖动和接触力波动。因此，研究在求解最终关节速度 $\dot{q}_k^*$ 时，进一步加入关节加速度和 jerk 约束。

关节速度约束为：

$$\dot{q}_{\min} \leqslant \dot{q}_k^* \leqslant \dot{q}_{\max} \tag{43}$$

关节加速度约束为：

$$-\ddot{q}_{\max}T \leqslant \dot{q}*_k - \dot{q}_{k-1}^* \leqslant \ddot{q}_{\max}T \tag{44}$$

关节 jerk 约束为：

$$-\dddot{Q}_{\max}T^2 \leqslant \dot{q}*_k - 2\dot{q}_{k-1}^* + \dot{q}_{k-2}^* \leqslant \dddot{Q}_{\max}T^2 \tag{45}$$

其中：$\dot{q}_{\max}$、$\ddot{q}_{\max}$和 $\dddot{Q}_{\max}$分别为关节速度、加速度和 jerk 上限。将式（43）～（45）加入 CBF-QP 后，可得到增强型安全滤波器。同时研究将安全约束显式嵌入优化控制框架，即将 CBF 安全约束和 jerk 受限指令生成统一到同一 QP 中，求得最终关节速度后，更新关节位置指令。

为避免积分误差累积，实际实现中还需对 $q_{\text{cmd},k+1}$进行关节限位投影：

$$q_{\text{cmd},k+1} = \text{Proj}_{[q_{\min},q_{\max}]}(q_{\text{cmd},k+1}) \tag{46}$$

由此，短记忆分数阶离散、导纳修正量平滑及关节指令 jerk 约束共同构成变阶分数阶导纳控制的实时实现基础。

1.5 融合控制算法与在线求解流程

基于前述内容，研究构建辅助约束－变阶分数阶导纳融合控制算法。该算法采用“任务规划生成期望轨迹、变阶分数阶导纳生成柔顺修正、CBF-QP 安全滤波修正危险指令、底层位置控制器执行关节命令”的分层结构。在第 k 个控制周期内，控制器输入为：

$$U_k = \{x_{d,k}, q_k, q_k^*, \dot{q}_{k-1}^*, F_{f,k}, F_{\text{des}}, C_{\text{img}}, D(p), \boldsymbol{n}_c\} \tag{47}$$

输出为：

$$Y_k = \{q_{\mathrm{cmd},k+1}\} \tag{48}$$

其中：q_k 为当前关节角，q_k^*，$_{k-1}^*$ 为上一周期最优关节速度，F_{des} 为期望接触力，$D(p)$ 为医学影像生成的符号距离场，$\boldsymbol{n}_c$ 为接触表面法向量。

控制器首先计算关键连杆采样点的安全余量，之后估计接触状态因子，更新分数阶阶次，并计算短记忆分数阶导纳修正量，添加幅值、速度、加速度和 jerk 限制，得到名义目标位姿与名义末端速度。最终，将名义末端速度、医学影像安全约束、接触力安全约束和关节平滑约束统一输入 CBF-QP 安全滤波器，求解最终关节速度：

$$\begin{aligned}
\dot{q}_k^* = \arg\min_{\dot{q},s} & \left\| \boldsymbol{J}_e(q_k)\dot{q} - \dot{x}_{\mathrm{nom},k} \right\|_{W_r}^2 + \lambda_q \left\| \dot{q} - \dot{q}_{k-1}^* \right\|^2 + \\
& \lambda_s \left\| s \right\|^2 \\
\text{s.t.} \quad & \nabla D(p_{i,m,k})^T \boldsymbol{J}_{i,m}(q_k)\dot{q} + \gamma_{i,m} h_{i,m,k} \geqslant 0 \\
& -\hat{K}_{\mathrm{env},k} n_c^T \boldsymbol{J}_e(q_k)\dot{q} + \gamma_F (F_{\max} - F_{n,k}) \geqslant 0 \\
& q_{\min} \leqslant q_k + T\dot{q} \leqslant \dot{q}_{\max} \\
& \dot{q}_{\min} \leqslant \dot{q} \leqslant \dot{q}_{\max} \\
& -\ddot{q}_{\max} T \leqslant \dot{q} - \dot{q}_{k-1}^* \leqslant \ddot{q}_{\max} T \\
& -\ddot{Q}q_{\max} T^2 \leqslant \dot{q} - 2\dot{q}_{k-1}^* + \dot{q}_{k-2}^* \leqslant \ddot{Q}_{\max} T^2 \\
& s \geqslant 0
\end{aligned} \tag{49}$$

式中，第一项用于使末端速度尽量接近导纳修正后的名义速度；第二项用于抑制关节速度突变；第三项用于惩罚松弛变量。禁入区域约束和接触力安全约束作为硬约束处理，保证工具和关键连杆不主动进入风险区域，且末端法向接触力不超过安全阈值。对于点、线、面等任务辅助约束，可根据实际需求设置松弛变量，避免多任务冲突时导致优化问题不可行。求得最优关节速度后，生成满足关节限位的关节位置指令，并发送至底层位置控制器。为增强接触状态切换过程的鲁棒性，设置自由空间、稳定接触和安全干预三种运行模式：

$$M_k = \begin{cases} M_{\mathrm{free}}, & F_{n,k} < F_{\mathrm{th}} \\ M_{\mathrm{contact}}, & F_{\mathrm{th}} \leqslant F_{n,k} < F_{\mathrm{safe}} \text{ and } h_{\min,k} > h_{\mathrm{safe}} \\ M_{\mathrm{safe}}, & F_{n,k} \geqslant F_{\mathrm{safe}} \text{ orh}_{\min,k} \leqslant h_{\mathrm{safe}} \end{cases} \tag{50}$$

其中：F_{th} 为接触判定阈值，F_{safe} 为安全干预力阈值，$h_{\min,k}$ 为所有安全监测点中的最小安全余量，h_{safe} 为安全干预距离阈值。在自由空间模式下，导纳修正量逐渐衰减为零，机械臂主要执行位置跟踪；在稳定接触模式下，变阶分数阶导纳根据力误差生成柔顺修正量；在安全干预模式下，CBF-QP 安全滤波器优先限制接触力和几何边界，必要时牺牲部分轨迹跟踪精度。

1.6　参数整定原则与稳定性分析

1.6.1　参数敏感性与整定原则

接触状态因子 ξ 的计算涉及权重系数（w_k，w_r）和刚度阈值（k_{soft}，k_{hard}），其取值对系统性能有直接影响。刚度阈值（k_{soft}，k_{hard}）的这两个参数用于界定接触环境的软硬。k_{soft} 应根据目标交互组织（如皮肤、肌肉）的典型刚度下限设定，k_{hard} 则可根据可能接触到的骨骼或硬质结节的刚度设定。在术前可通过对目标组织的生物力学特性研究或初步探测试验来获取参考值。阈值区间过窄会导致阶次频繁跳变，过宽则会降低系统对刚度变化的敏感性。w_k 和 w_r（满足 $w_k + w_r = 1$）决定了系统对刚度变化和力变化率的侧重程度。在需要平稳接触、避免冲击的场景（如大面积超声扫描），应增大 w_k，使系统更关注环境刚度的稳定变化。在需要快速响应力突变、防止过大超调的场景（如探寻组织边界），应增大 w_r。一般情况下，可取 $w_k = w_r = 0.5$ 作为初始值，再根据具体任务需求进行微调。

1.6.2　系统稳定性分析

融合控制系统的稳定性由变阶分数阶导纳控制器（V-FAC）的内在稳定性和 CBF-QP 安全滤波器的监督保障共同构成。对于分数阶系统，其稳定性与分数阶阶次密切相关。研究通过式（20）和（21）将惯性项阶次 β 和阻尼项阶次 μ 限定在（1，2）和（0，1）的范围内。根据分数阶系统稳定性理论，这一参数设定确保了导纳模型 $Md * D^{\beta}(x) + Dd * D^{\mu}(x) + Kd * x = F_{\mathrm{err}}$ 的特征方程根均位于稳定区域，从而保证了 V-FAC 控制器本身是 BIBO 稳定的，即对于有界的力误差输入 F_{err}，其产生的位移修正量 x 也是有界的。

CBF 的核心作用是定义一个安全状态集，并确保系统状态永远不会离开这个集合。式（10）和（13）定义的几何与力安全约束，确保了无论名义控制器 v_{nom} 如何生成，最终执行的关节速度 q_{dot} 都将满足 $h(x) \geqslant 0$ 的条件（或使其导数 $L_f h(x) + L_g h(x) u \geqslant -\gamma h(x)$。这意味着，即使在接触状态切换、导纳阶次突变导致名义指令出现振荡的极端情况下，CBF 也会通过修正指令来强制系统保持在安全边界内，从而保证了整个闭环系统的安全性和实际稳定性。

2　实验分析

2.1　实验环境及参数设置

为验证所提融合控制方法的有效性，搭建基于物理样机的半实物实验平台。控制系统开发与仿真在 MATLAB/Simulink R2022a 环境下完成，机器人运动学模型、约束逆运动学求解器、变阶分数阶导纳控制器及 CBF-QP 安全滤波器均在 Simulink 中实现。系统通过 ROS 中间件将控制指令实时发送至国产 RM65-B 六自由度串联机械臂底层控制器，控制周期为 4 ms；机器人末端法兰盘安装 ATI Nano17 六维力/力矩传感器，其力测量分辨率为 0.025 N。整个控制系统的上位机搭

载 Ubuntu 18.04 操作系统及 PREEMPT _ RT 实时内核，并通过 EtherCAT 总线与机器人控制器进行高速、确定性通信，具体参数如表 1 所示。

表 1 机械臂 DH 参数

关节	连杆偏距	关节轴夹角/(°)	连杆长度
1	271	90	0
2	0	0	278.46
3	0	−90	77.5
4	341.3	90	0
5	0	−90	76
6	97	0	0

参数设置遵循第 2 章提出的控制结构：在线调节对象为分数阶阶次 β 和 μ，虚拟质量 Md、虚拟阻尼 Dd 和虚拟刚度 Kd 按表 2 固定设置，CBF-QP 几何安全、接触力安全及关节平滑约束参数在各组实验中保持一致，以保证不同控制方法之间具有可比性。

表 2 辅助约束与分数阶导纳控制参数

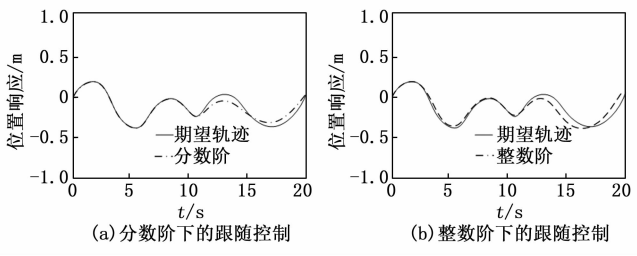
参数	取值
期望虚拟质量 Md	5 kg
虚拟阻尼 Dd	150 Ns/m
虚拟刚度 Kd	3 000 N/m
分数阶阶次 β	1.2～1.8
分数阶阶次 μ	0.4～0.9
期望接触力	5 N
导纳刚度系数	300
惯性系数	1
控制周期	4 ms

实验评价指标包括轨迹跟踪平均误差、接触力均方根误差和最大力超调。其中，轨迹跟踪平均误差为各采样点实际末端位置与期望位置偏差的平均值；接触力 *RMSE* 为法向接触力与期望接触力偏差的均方根值；最大力超调为最大接触力超过期望接触力的相对百分比。

2.2 约束位置控制与导纳跟随结果

为验证约束条件下的柔顺跟随效果，设置“沿曲面边缘划动”任务。该任务要求机械臂末端在与刚性曲面保持恒定接触力的同时沿预定轨迹运动。实验参数采用表 2，其中虚拟刚度 Kd 为 3 000 N/m，归一化导纳刚度系数为 300，惯性系数为 1。为突出分数阶算子对柔顺跟随性能的影响，分别采用分数阶导纳控制和整数阶导纳控制进行对比。

图 2 中，20 s 内分数阶导纳轨迹在初期更接近期望轨迹，轨迹跟踪 *RMSE* 为 0.18 mm；整数阶导纳轨迹存在更明显偏差，*RMSE* 为 0.35 mm。结果表明，分数阶导纳控制能够更有效地抑制接触力波动，并生成更平滑、稳定的操作轨迹。



(a)分数阶下的跟随控制 (b)整数阶下的跟随控制

图 2 分数阶导纳与整数阶导纳的机械臂跟随控制效果

2.3 模拟超声扫描任务结果

为验证融合控制策略在典型医疗接触任务中的综合性能，以超声扫描中常见的曲面边缘划动为应用场景开展对比实验。对比方法包括：位置控制（PCO，仅执行期望轨迹跟踪）、固定阶次分数阶导纳控制（FAC，分数阶阶次固定且不含 CBF 安全滤波）、变阶分数阶导纳控制（V-FAC，仅根据接触状态在线调整阶次）和研究方法（V-FAC 与辅助约束及 CBF-QP 安全滤波融合）。所有方法均在相同实验平台、相同任务轨迹、相同期望接触力和相同采样周期条件下进行，每组实验重复 5 次，均值结果如表 3 所示。

表 3 “沿曲面边缘划动”任务下的控制效果

（n=5 次实验均值）

控制方法	轨迹跟踪平均误差/mm	接触力 *RMSE*/N	最大力超调/%	约束违反率/%	最小安全裕度/mm	关节平均加加速度/(rad/s)	单步平均耗时/ms
PCO	0.92	7.51	83.42	15.62	−2.81	15.2	0.52
FAC	0.45	2.23	56.21	8.24	−1.15	9.81	1.20
V-FAC	0.31	1.15	24.53	5.13	−0.43	7.52	1.53
研究方法	0.23	0.71	8.59	0	1.24	4.61	2.14

表 3 中，PCO 的轨迹跟踪平均误差和接触力 *RMSE* 均较大，说明单纯位置控制难以适应接触式医疗任务。FAC 引入导纳柔顺后降低了轨迹误差和力误差，V-FAC 通过在线调节分数阶阶次进一步改善了接触力稳定性。研究方法在 V-FAC 基础上融合辅助约束和 CBF-QP 安全滤波，使轨迹跟踪平均误差降至 0.23 mm，接触力 *RMSE* 降至 0.71 N，最大力超调降至 8.59%，表现出更好的柔顺性和安全性。研究方法的约束违反率为 0，且最小安全裕度为正值（1.24 mm），表明 CBF 安全滤波器有效保证了全程无碰撞。而其他方法均出现了不同程度的约束违反（安全裕度为负值）。研究方法的关节平均加加速度指标最低（4.6 rad/s），说明其生成的关节指令更加平滑，有利于减少机械臂振动和提高接触稳定性。所有方法的单步平均耗时均远小于 4 ms 的控制周期，研究方法由于需要求解 QP 问题，耗时相对最长（2.1 ms），但仍在安全范围内，完全满足实时控制要求。

2.4　局部任务空间检测结果

将所提约束控制方法应用到舌癌口腔检测任务中，借助舌癌分期方法设定机械臂辅助检测轨迹。在 3D 打印的 3 cm×4 cm 口腔模型中设置半径 20 mm 的空间球体作为任务检测区域，模型内部包含模拟硬质结节。实验中选择关节 2 作为辅助点约束关节，以保证检测探针始终沿安全解剖路径移动。

图 3（a）中，单点检测时末端受力 x 轴在 1～2 s 内约有 0.2 N 波动，y 轴稳定在－0.1 N 附近，位置误差趋于稳定且不超过±1 mm，表明系统能够稳定施加轻微探测力。图 3（b）中，模拟轨迹检测时末端 x 轴力峰值接近 0.4 N，y 轴力在 0.2 N 左右波动，位置误差峰值在 3 s 后回归 0，显示系统对复杂轮廓具有较好的跟踪能力。图 3（c）中，位置和姿态重复性误差随约束关节序列数量增加而降低，说明辅助约束能够提升局部任务空间内的重复检测稳定性。

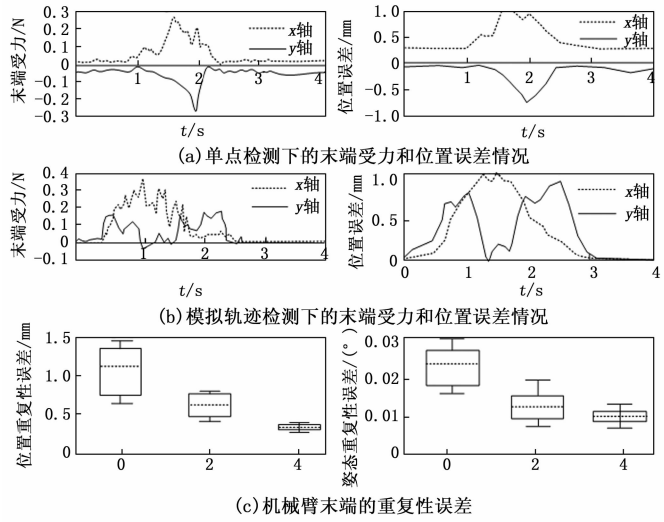


图 3　舌癌模型在研究方法下的检测效果

表 4　机械臂在不同实际工况下的控制结果

工况	轨迹跟踪最大位置误差/mm	接触力控制位置误差 *RMSE*/mm	最大末端加速度/(m/s)
基准工况低速 5 mm/s，无负载，平滑曲线	0.28	0.11	1.5
速度提升中速 10 mm/s，无负载，平滑曲线	0.35	0.15	2.5
高速工况高速 20 mm/s，无负载，平滑曲线	0.42	0.19	4.0
中度负载高速 20 mm/s，0.5 kg 负载，平滑曲线	0.48	0.23	5.5
重度负载高速 20 mm/s，1.0 kg 负载，平滑曲线	0.65	0.31	7.0

由表 4 可见，随着运动速度从 5 mm/s 提升至 20 mm/s、末端负载增加至 1.0 kg，研究方法的最大位置误差仍控制在 0.65 mm，接触力控制位置误差 *RMSE* 不超过 0.31 mm，说明所提控制策略在速度变化和负载扰动下具有较好的鲁棒性。

为量化所提方法中各核心模块的独立贡献与协同增益，研究设计消融实验，均在“沿曲面边缘划动”任务下进行。实验结果见表 5。

表 5　消融实验结果（n=5 次实验均值）

实验方法	轨迹跟踪平均误差/mm	接触力 *RMSE*/N	最大力超调/%	最小安全裕度/mm
固定阶次导纳控制（FAC）	0.45	2.23	56.21	－1.15
FAC＋变阶机制	0.31	1.15	24.53	－0.43
FAC＋CBF 安全滤波	0.48	2.15	9.52	1.18
FAC＋辅助约束	0.46	2.20	55.80	1.21
研究方法	0.23	0.71	8.59	1.24

表 5 结果中，单独加入变阶机制后，接触力 *RMSE* 从 2.23 N 显著降低到 1.15 N，最大力超调也大幅减小，证明了变阶导纳在适应环境变化、提升接触力稳定性方面的作用。加入完整的 CBF（含力约束）后，最大力超调被严格限制在 9.52%，安全性得到极大提升，但对力 *RMSE* 和轨迹误差改善不明显。对比“FAC＋辅助约束”与“固定阶次导纳控制”，仅加入几何 CBF 后，最小安全裕度从负值变为正值，有效避免了碰撞，但对力控制性能几乎没有影响。研究方法融合了 CBF，可以看到，在保证了安全裕度（1.24 mm）和低超调（8.59%）的同时，轨迹误差和力 *RMSE* 也达到了最优，有效实现了安全、精确、稳定的柔顺交互。

3　结束语

为提升医疗串联机械臂在狭窄敏感空间内接触操作的安全性与柔顺性，研究提出了融合辅助约束、变阶分数阶导纳与 CBF-QP 安全滤波的柔顺交互控制方法。该方法通过引入医学影像驱动的辅助约束实现了对个体化安全边界的精确管理；利用变阶分数阶导纳控制器，依据接触状态自适应调整系统柔顺特性，有效抑制了接触力波动；构建的 CBF-QP 安全滤波器将几何、力及关节平滑性等多重约束统一在优化框架内，实现了对危险指令的最小化修正。半实物实验结果表明，在曲面边缘划动任务中，研究方法优于位置控制、固定阶次导纳控制和变阶导纳控制。在舌癌口腔检测模拟任务及不同速度、负载工况下，所提方法仍能保持较好的轨迹跟踪精度和接触稳定性，该方法可为医疗串联机械臂在狭窄敏感空间内实现安全、稳定、柔顺的接触操作提供参考。

参考文献：

[1] 耿 鹏，何彦霖，杨 溢，等. 软体机械臂控制方法研究现状及展望 [J]. 仪器仪表学报，2023，44 (11)：85 - 98.

[2] 方虹斌，郑 立，张琦炜，等. 柔性机械臂动力学建模研究进展 [J]. 动力学与控制学报，2023，21 (12)：5 - 21.

[3] 杨 妍，刘运鹏，韩江涛，等. 软体机械臂的建模与神经网络控制 [J]. 工程科学学报，2023，45 (3)：454 - 464.

[4] SUN J，KRAMER E H，ROSEN J. A safety-focused admittance control approach for physical human-robot interaction with rigid multi-arm serial link exoskeletons [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2025，30 (1)：414 - 425.

[5] 高 箴，韩栋明，王奕儒，等. 基于导纳控制与虚拟力控制的运动员康复按摩机器人 [J]. 制造业自动化，2023，45 (11)：212 - 216.

[6] 蒋一鸣，王军晓. 基于广义比例积分观测器的机械臂末端力/位置控制 [J]. 计算机测量与控制，2026，34 (5)：187 - 196.

[7] 毕梦莹. 柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2026，34 (6)：89 - 96.

[8] 高 强. 混合多策略改进蜣螂算法的空间柔性机械臂视觉反馈稳态控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2025，33 (10)：127 - 134.

[9] 卢南方，谢真强，龙光涛，等. 单连杆柔性机械臂连续转动控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2025，33 (5)：176 - 184.

[10] 李国琪，胡 陟，陈籽聿，等. 基于干扰观测器的双臂手术机器人自适应阻抗控制 [J]. 中国医学物理学杂志，2023，40 (6)：714 - 719.

[11] 周俊杰，张凌钰，于 洋，等. 遥操作软体机械臂的末端力反馈系统分析 [J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2022，50 (10)：132 - 139.

[12] 欧劲松，李 蓉，尹 辉，等. 基于奇异摄动的柔性关节机械臂约束跟随控制研究 [J]. 应用数学和力学，2023，44 (5)：513 - 524.

[13] 朱峰刚. 关节速度约束下六轴机械臂空间运动轨迹规划方法 [J]. 机械与电子，2023，41 (3)：44 - 49.

[14] 赵业和，刘达新，刘振宇，等. 基于多种群竞争松鼠搜索算法的机械臂时间最优轨迹规划 [J]. 浙江大学学报：工学版，2022，56 (12)：2321 - 2329.

[15] 郭华伟，吴广磊. 基于 SolidWorks-MATLAB-CoppeliaSim 的机械臂轨迹规划研究 [J]. 机械设计与制造工程，2025，54 (4)：93 - 98.

[16] 丁张帆，马中凯，朱桂全，等. 内镜模拟器及机械臂在口腔颌面外科住院医师临床前技能培训中的应用 [J]. 肿瘤预防与治疗，2023，36 (11)：970 - 976.

[17] YUSOFF Z M，NORDIN S A，MARKOM A M，et al. Wireless hand motion controlled robotic arm using flex sensors [J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science，2023，29 (1)：133 - 140.

[18] SELEEM I A，EL-HUSSIENY H，ISHII H. Recent developments of actuation mechanisms for continuum robots：a review [J]. International Journal of Control，Automation and Systems，2023，21 (5)：1592 - 1609.

[19] 王 博，段 竹，汪德忠，等. 基于融合深度神经网络的刚柔耦合机械臂优化控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2026，34 (6)：114 - 121.

[20] 宋高顺. 分拣机器人柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2026，34 (7)：123 - 132.

[21] CHENCHIREDDY K，DORA R，MULLA G B，et al. Development of robotic arm control using Arduino controller [J]. IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)，2024，13 (3)：264.

(上接第 87 页)

[22] WANG C Y，YEH I H，LIAO H Y M. Yolov9：Learning what you want to learn using programmable gradient information [C] // European Conference on Computer Vision. Cham：Springer Nature Switzerland，2024：1 - 21.

[23] LIN T Y，DOLLáR P，GIRSHICK R，et al. Feature pyramid networks for object detection [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，2017：2117 - 2125.

[24] LIU S，QI L，QIN H，et al. Path aggregation network for instance segmentation [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，2018：8759 - 8768.

[25] TAN M，PANG R，LE Q V. EfficientDet：Scalable and efficient object detection [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，2020：10781 - 10790.

[26] 邱永峰，黄 萱，袁鑫攀，等. 复杂背景下钢材表面缺陷检测算法 [J]. 机械设计与制造，2025 (10)：292 - 297.

[27] 钱俊磊，黄庆尧，曾 凯，等. 基于 YOLO11n-SRA 的带钢表面缺陷检测 [J]. 河北科技大学学报，2025，46 (5)：521 - 532.

[28] CHEN S，JIANG S，WANG X，et al. An efficient detector for detecting surface defects on cold-rolled steel strips [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2024，138：1093.