

软体机械臂文献的鲁棒控制探究与思考

摘要：软体机械臂因其复杂的非线性动力学，对鲁棒控制提出了新挑战。本文旨在探究软体臂文献中的鲁棒控制策略。文中剖析了两种代表性方法：一种是针对刚柔耦合臂，采用基于动力学模型的自适应终端滑模控制；另一种是针对 SMA 驱动臂，采用基于传感模型和“状态机控制器”的逻辑补偿思想。本文总结认为，软体臂的鲁棒控制策略与其建模方法紧密相关，且融合自适应控制以应对时变特性是未来的重要研究方向。

关键词：鲁棒控制；软体机械臂；滑模控制；自适应控制

一、引言

机器人是融合了机械工程、人工智能、控制理论与计算机科学等领域技术，能够自主或半自主执行任务的智能机械设备。机器人在完成重复性、单调性的任务中表现尤为突出，可以在精度、可重复性、耐力与力量方面远超过人类^[1]，极大的提升了工作效率。机器人经过几十年的发展，现在被广泛的应用于各种领域中，如智能制造、医疗、特殊环境作业等场景^[2]。

机械臂作为机器人的一种，在近几十年来，针对机械臂的控制策略研究始终是控制领域的研究热点。机械臂本质上是复杂的非线性、多关节耦合动力学系统，尽管基于模型的经典控制策略在理论上已非常成熟，但是其在实际应用中往往难以达到预期的性能。导致这一现象的根本原因在于数学模型，任何控制率的设计都依赖于一个数学模型，而在建模的过程中又无法避免地存在模型误差和未建模动态。在机械臂系统中，不确定性因素无法避免而且来源多种多样，例如：未知或时变的负载、难以精确辨识的非线性摩擦力、因模型简化而忽略的动力学项等。因此，机械臂控制系统需要设计一个适宜的鲁棒控制策略，使得在抵抗这些不确定性因素的同时，又能保证系统具有良好的动态行为。在设计鲁棒控制策略时又面临着一个新的问题，那就是如何做到系统性能与鲁棒性的兼顾。高增益的控制器拥有较高的性能，对误差的反应极其灵敏且迅速，对不确定性因素的敏感导致系统极易产生振荡；低增益控制器则有高鲁棒性，对于误差和不确定性的反应较为迟钝，使其不会被轻微扰动激发，但会导致其在跟踪轨迹的时候反应缓慢，即

系统性能下降。鲁棒性控制理论正是为此提供了一个设计框架，为设计者在系统性能与鲁棒性之间的调整提供参考。

近几年来仿生学的快速发展进一步促使软体机器臂成为机器人领域的研究热点，自然界中各种各样的生物为研究人员提供了大量的灵感，如大象鼻腔^[3]、章鱼触手^[4]等，通过研究并简化软体生物结构的机理构造，进而获得具有柔顺特性机器臂的思路^[5]。同时，借助 3D 打印与新材料领域的技术，这些思路得以从理论转变为实体。软体机器臂是一种由软质或半硬质材料制成的机器人，能够通过自身的柔顺性和弹性来适应复杂多变的环境。

由于软体机械臂与传统刚性机械臂有本质上的不同，相应的建模与控制思路也将发生改变。本文将挖掘软体机械臂领域文献的控制策略，并思考其选择该策略的原因。

二、文献分析

1、刚柔耦合软体机械臂

在柔性臂中添加刚性元件，可以让机械臂拥有刚性元件建模简便的优点。浙江工业大学的鲍官军团队设计了具有刚性骨架的气动驱动柔性机械臂^[6]，如图 1 所示，该机械臂融合刚性与柔性结构优势，引入了十字铰链式刚性结构，柔性驱动器采用类似波纹管的扇形气囊，加压膨胀时实现弯曲运动。

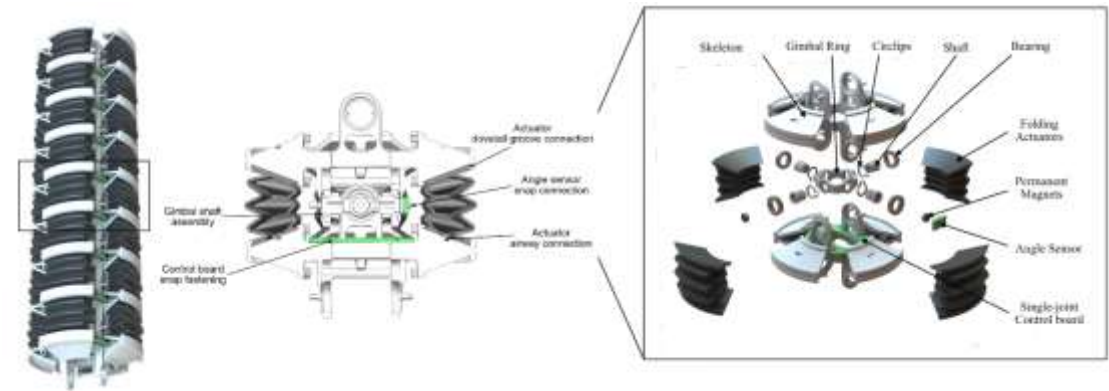


图 1 刚柔耦合机械臂结构

首先是建模部分，由于内部刚性连接，其运动性能更接近刚性机器人，该作者团队选择采用了机器人学中非常经典的 D-H 法，通过正向和逆向运动学分析，分别得到“从关节角度到末端位置”和“期望末端位置的关节角度组合”。随后，通过拉格朗日动力学模型来描述这个 n 自由度的柔性机械臂，如式 1 所示。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) + EF(\theta) - i = A(\theta)p \quad (1)$$

该式描述了控制输入气压 p 与系统运动的关节角度 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 之间的数学关系。其中 $M(\theta)\ddot{\theta}$ 是惯性项，代表了机械臂的惯性力矩； $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 代表哥氏力与离心力项； $g(\theta)$ 是重力项； $EF(\theta)$ 是致动器的弹性力，由于柔性致动器本身会产生弹力，故这一关键特性不可忽略； τ 是未知干扰； $A(\theta)p$ 是驱动项，控制气动致动器的气压来控制输入。由这些项的分析可知，弹性力 $EF(\theta)$ 与位置干扰 τ 是不确定的，无法精确建模，因此，需要引入鲁棒控制，使得系统在这些不确定性的情况干扰下，依然能精确控制系统。

该团队制定的鲁棒控制策略以让实际关节角度 θ 精确跟踪期望轨迹 θ_d 为核心目标，采用了自适应终端滑模控制来实现目标，整体控制策略可以拆分为四部分来完成。首先是完成终端滑模面的定义，不再直接控制二阶的跟踪误差 $e_\theta = \theta - \theta_d$ ，而是定义了一个新的一阶复合变量 s ，如式 2 所示。

$$s = \dot{\theta} - \dot{\theta}_r = \dot{e}_\theta + \Lambda \text{sign}^\beta(e_\theta) \quad (2)$$

一旦系统被驱动到 $s=0$ 的滑模面上， $\text{sign}^\beta(e_\theta)$ 这一项能保证 e_θ 在有限时间内精确收敛到 0，这对于需要高精度操作的机器人至关重要。

有了滑模面后，便需要设计一个控制律使得无论系统内部由什么不确定性或外部干扰都要强行使 s 趋向于 0，控制律如式 3 所示。

$$p = A^\dagger(\theta) \left(\psi(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_r, \ddot{\theta}_r) \hat{a} - K_d s - \hat{\zeta} \text{sign}(s) \right) \quad (3)$$

此控制律主要重点为右侧括号内的三项， $\psi(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_r, \ddot{\theta}_r) \hat{a}$ 是控制器的预估部分，利用对系统动力学的估计值 \hat{a} 来抵消掉已知的动力学， $-K_d s$ 是一个反馈项，像弹簧一样使得 s 越大，拉回 0 的力就越大， $-\hat{\zeta} \text{sign}(s)$ 是系统鲁棒性的来源，其作用为强力镇压所有不确定性因素与未知干扰。

但该控制律仍存在缺陷，当 $\hat{\zeta}$ 设置的过大，会引起机械臂的高频振动，反之又抵抗不住干扰。为解决这个问题，该团队还引入了自适应控制，使得鲁棒增益 $\hat{\zeta}$ 可以自动调节到既能保持鲁棒性又能抑制抖振的水平，自适应控制律如式 4 所示。

$$\dot{\hat{\zeta}} = \tau |s| \quad (4)$$

如果 $|s|$ 很大，意味着此时误差较大有较大干扰，则使 $\hat{\zeta}$ 自动增大来抵抗干扰，

反之则停止增长。

最后采用李雅普诺夫稳定性分析法来判断这套控制策略的有效性和稳定性，建立了一个李雅普诺夫能量函数，如式 5 所示。通过对 $V(t)$ 求导并代入上述公式，最终推得 $\dot{V} \leq -s^T K_d s$ ，又因 K_d 为正定矩阵，则导数不大于 0 恒成立，这在数学上严格证明了系统的总能量在不断耗散，系统是稳定的。它保证了滑模变量 s 必将收敛到 0，进而保证了 e_θ 必将在有限时间内收敛到 0，从而完美达成了鲁棒控制的目标。

文献中也展示了研究团队对鲁棒控制策略的验证过程与最终的效果结论。首先进行了抗干扰性实验，将关节重置于零位，用橡胶锤敲击关节末端以施加瞬时外部干扰，传感器数据显示，在受到敲击后，关节能够迅速返回到其初始位置附近，并最终稳定在原始位置。该实验证实了所设计的控制系统具有较强的抗干扰和振动抑制性能，这是鲁棒控制策略有效性的直接证明。随后，团队又进行了单关节闭环控制实验和多段机械臂的末端轨迹跟踪实验，在单关节控制中，实际角度与参考角度之间的误差被控制在 0.15° 以内，在末端圆形轨迹跟踪中，机械臂末端的轨迹误差小于 2mm，每个关节的误差同样保持在 0.15° ，这些数据展示了该控制算法具有较高精度并且有优秀的控制性能和稳定性。这证明了该鲁棒控制策略不仅能抵抗干扰，还能在复杂的动力学模型下实现高精度的跟踪。还进行了人机交互实验，以评估机械臂在运动中与人体或物体发生碰撞时的行为，实验中当机械臂的运动受到干扰时，它会因外力而偏离原始路径。重要的是，它能够以相对温和的方式与人互动，并在绕过障碍物后返回其预定的运动路径，该实验回归了软体机械臂领域的本质——安全性，并且验证了该鲁棒控制策略在面对不可预测的物理交互时，系统依然能保持稳定和安全。

2、形状记忆合金机械臂

纯柔性机械臂的建模较为复杂，没有刚性元件的支撑使其无法依据关节进行准确定位。清华大学的安欣等设计了一款由形状记忆合金驱动软体机械臂^[7]，该机械臂仅采用 3 根形状记忆合金即可实现机械臂的弯曲，如图 2 所示。

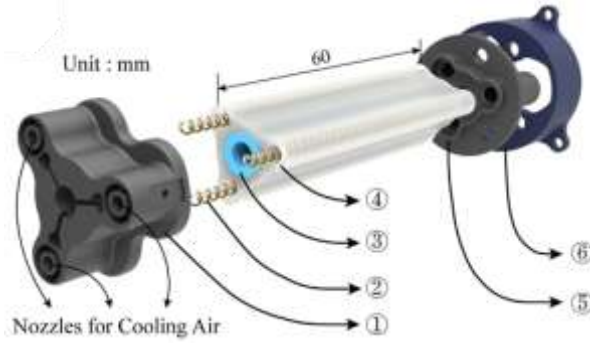


图 2 形状记忆合金机械臂

由于软体机械臂的物理模型过于复杂，因此作者在全文仅使用了两种模型，一种是传感模型用于控制，另一种用于解释形状记忆合金的热力学问题，因此本文只对传感模型进行介绍。传感模型不描述动力学，只用通过外部摄像头来解算出机器人末端的姿态，即利用末端的法向量 \mathbf{n} 来得到弯曲角度 θ 和摆动角度 φ 。

文章中的鲁棒控制策略是设计了一个双通道、多输入多输出控制器，该控制器直接将期望的姿态与传感系统反馈的实际姿态进行比较，计算出三个 SMA 弹簧的加热和冷却指令。通道 1 为控制弯曲角度，通道 2 为控制摆动角度，两个通道的输出 $u_{i\theta}$ 和 $u_{i\varphi}$ 相加，得到对第 i 个 SMA 弹簧的最终控制信号 u_i 。

在通道 1 的设计中，作者采用了经典的 PI 控制器。首先，PI 控制器根据弯曲角度误差 $e_\theta(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ ，计算出系统所需的总弯曲控制量 $u_\theta(t)$ ，如式 5 所示。

$$u_\theta(t) = Kp_\theta \cdot e_\theta(t) + K_{i\theta} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau \quad (5)$$

然后，一个由方向调节器将这个总控制量 $u_\theta(t)$ ，根据期望的摆动方向 φ_d ，通过线性映射分配给三个 SMA 弹簧，如式 6 所示。

$$\begin{cases} u_{1\theta}(t) = (\varphi_1 \cdot \varphi_d) u_\theta(t) \\ u_{2\theta}(t) = (\varphi_2 \cdot \varphi_d) u_\theta(t) \\ u_{3\theta}(t) = (\varphi_3 \cdot \varphi_d) u_\theta(t) \end{cases} \quad (6)$$

在通道 2 的设计中，由于三个 SMA 驱动器之间存在复杂的耦合和非线性效应，作者设计了一个状态机控制器，该控制器根据当前摆动角度 φ 和期望角度 φ_d 之间的相对位置，将系统分为五种情况，并采用不同策略使系统鲁棒地收敛到目标位置。

情况 1 是 φ 和 φ_d 位于同一对 SMA 弹簧之间，此时使用带前馈补偿的 P 控制器。如式 7 所示。

$$\begin{cases} u_+(t) = K_{P+} \cdot e_\varphi(t) + K_{f+} \cdot \dot{\varphi}_d \\ u_-(t) = K_{P-} \cdot e_\varphi(t) + K_{f-} \cdot \dot{\varphi}_d \\ u_{\text{far}}(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

情况 2 是 φ 和 φ_d 位于不同的 SMA 区间，但误差 $|e_\varphi(t)|$ 小于阈值 σ_i ，此时采用另一组 P 控制器和前馈增益，如式 8 所示。

$$\begin{cases} u_{\text{between}}(t) = K_{Pb} \cdot |e_\varphi(t)| + K_{f-b} \cdot \dot{\varphi}_d \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_d \cdot e_\varphi) \\ u_-(t) = K_{P-} \cdot |e_\varphi(t)| + K_{f-} \cdot \dot{\varphi}_d \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_d \cdot e_\varphi) \\ u_{\text{far}}(t) = K_{Pf} \cdot |e_\varphi(t)| + K_{f-f} \cdot \dot{\varphi}_d \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_d \cdot e_\varphi) \end{cases} \quad (8)$$

情况 3 是 φ 和 φ_d 位于不同的 SMA 区间，但误差处于 (σ_i, σ_s) 区间内，使用 P 控制器，并额外增加一个补偿项 Δu 来提高过渡速度，使快速过渡到情况 1 或 2，如式 9 所示。

$$\begin{cases} u_{\text{between}}(t) = K_{Pb} \cdot |e_\varphi(t)| + \Delta u_b \\ u_-(t) = K_{P-} \cdot |e_\varphi(t)| + \Delta u_- \\ u_{\text{far}}(t) = K_{Pf} \cdot |e_\varphi(t)| + \Delta u_f \end{cases} \quad (9)$$

情况 4 是误差处于 $(\sigma_s, 180^\circ)$ ，此时控制方法与情况 3 完全相同，但使用一组单独调整的参数以实现更快的响应。

情况 5 是误差极大的状态需要跨越多个 SMA 弹簧，此时不直接控制到 φ_d 。而是设置一个中间参考状态 φ_{Medium} 。控制器首先切换到情况 1 或 3 的策略，目标是先到达这个中间点 φ_{Medium} ，一旦脱离情况 5，控制器再切换回 φ_d 作为最终目标。

文章最后通过抗扰动能力实验来证明该策略的鲁棒性，持续干扰测试为在机器人保持 45° 弯曲时，向其末端杯中连续注入 70mL 水；冲击干扰测试为在保持姿态时，向杯中投入一个 50g 的重物。在持续注水时，系统表现出良好的鲁棒性；在遭受冲击时，系统虽然振荡，但能在 2 秒内稳定到目标姿态，验证了系统具有较高的鲁棒性。

三、总结和展望

在第一篇文献中，作者采用自适应终端滑模控制策略，以应对其新型气动刚柔臂所固有的非线性和不确定性。该策略的优势在于，它利用自适应律来实时估计系统的不确定动态系数并增强对未建模外部干扰的抗干扰能力，从而在保证快

速收敛的同时抑制了抖振。但是在面对更大操作范围或更多关节的复杂应用场景时，现有的控制方案可能会因计算负载的急剧增加而不再适用。

未来此鲁棒控制研究的重点将转向算法优化以提升系统响应速度，并利用高精度传感器数据，使机械臂从高精度的位置控制进化到具备力感知能力，从而实现更高级别的安全与智能交互。

第二篇文献提出了一种新颖的鲁棒控制策略，采用了一个双通道 MIMO 控制器，将姿态控制解耦为弯曲角度和摆动角度两个通道。其中，鲁棒控制的精髓在于摆动通道，它采用了一个“状态机控制器”，该控制器将复杂的非线性摆动问题根据当前角度与目标角度的相对位置划分为五种情况，并为每种工况应用了基于启发式规则的偏置补偿项，以主动克服 SMA 的迟滞和非线性，实现快速的状态过渡。但是弯曲和摆动通道之间仍存在耦合效应，尤其在状态机切换时会导致瞬态振荡。此外，控制器采用固定增益，缺乏对系统时变特性（如 SMA 非线性和不同负载）的自适应能力。

对于 SMA 这类高度非线性且难以建模的系统，基于逻辑划分和启发式补偿的控制思想是一种有效的鲁棒控制途径。未来的研究应着重于开发新的解耦算法，并引入自适应控制来应对时变动力学。同时，为了实现真正的实际应用，必须用集成式传感器来替代目前依赖的外部跟踪摄像头。

对于以上两篇文献的学习之后，我对未来关于软体机械臂控制的研究开拓了新的眼界，见识到了不同的鲁棒控制方法，此外，还知道了自适应控制对于鲁棒控制策略的完善有巨大的帮助，能够给系统提供对时变特性的自适应能力。有了研读这两篇文献的经历，在未来阅读其他文献也将更加得心应手。

参考文献

- [1] Chutima P. Assembly line balancing with cobots: An extensive review and critiques[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2023, 14(4): 785-804.
- [2] Day C P. Robotics in industry-their role in intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(4): 440-445.
- [3] Jiang H, Wang Z, Jin Y, et al. Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions[J]. The International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 411-434.
- [4] 夏侯遐迩, 田丰华, 李启明. 智能建造背景下人机协作安全研究综述[J]. Journal of Southeast University/Dongnan Daxue Xuebao, 2023, 53(6): 1053-1064.
- [5] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [6] Zhou X, Wu C, Cai S, et al. A Pneumatic-Actuated Flexible Robotic Arm With Rigid Backbone for High-Precision and Safe Manipulation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024: 1-12.
- [7] An X, Cui Y, Sun H, et al. Active-cooling-in-the-loop controller design and implementation for an SMA-driven soft robotic tentacle[J]. IEEE transactions on robotics, 2023, 39(3): 2325-2341.