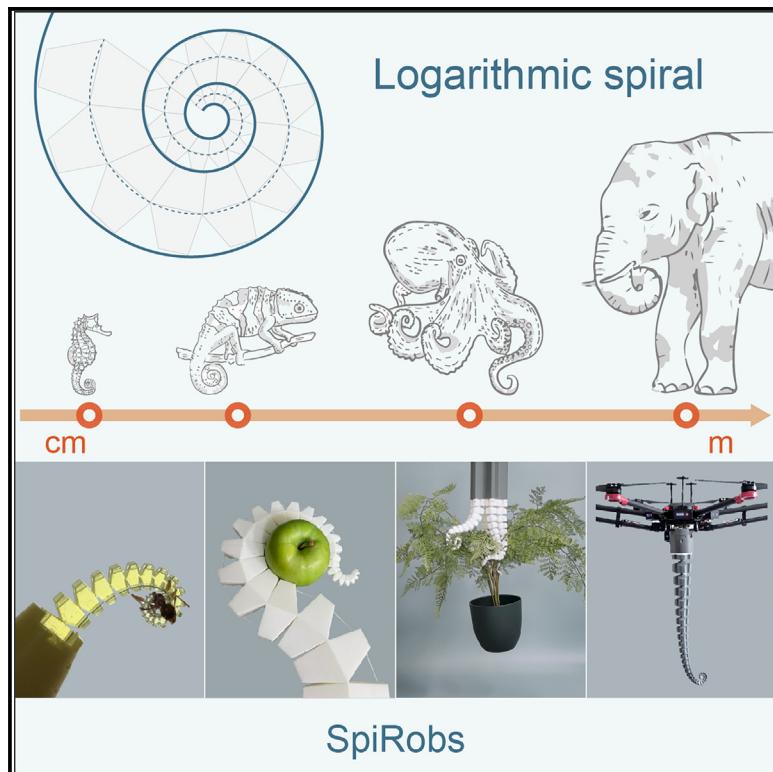


SpiRobs：适用于多尺度通用抓取的对数螺旋形机器人

图形摘要



作者

王战赤, Nikolaos M. Freris, 魏曦

对应关系

nfr@ustc.edu.cn (N.M.F.), w
xi@ustc.edu.cn (X.W.)

简而言之

SpiRobs在形态上复现了自然界生物中普遍存在的对数螺旋结构。它们通过3D打印技术可轻松快速地跨尺度制造，由线缆驱动实现迅捷逼真的运动。此外，单个机器人能抓取尺寸、形状和重量各异的多种物体，其关键在于借鉴了章鱼的仿生抓取策略。本研究最终展示了多种原型机，包括微型夹持器、无人机搭载的机械臂，以及能像卷须般协同抓取的多机器人阵列。

亮点

基于对数螺旋 $\{v^*\}$ 的生物启发通用设计原理

基于TPU的3D打印实现快速低成本制造

一种由两根或三根电缆驱动的简单传动机构

d 众多原型（长度从厘米到米不等）以及多机器人阵列



Develop

Prototype with demonstrated applications
in relevant environment

Wang et al., 2025, Device 3, 100646
April 18, 2025 © 2024 The Authors. Published by
Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100646>

文章

SpiRobs：适用于多尺度通用抓取的对数螺旋形机器人

詹驰王,¹尼古拉奥斯·M·弗雷里斯,^{1,3,*}和魏曦^{2,*}¹中国科学技术大学计算机科学与技术学院,安徽合肥230027²中国科学技术大学化学与材料科学学院,安徽合肥230027³通讯作者 *联系方式: nfr@ustc.edu.cn (N.M.F.), wxi@ustc.edu.cn (X.W.) <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100646>

宏观视角 如何以最小的努力和成本,设计并制造出尽可能复现章鱼触手灵活性的机器人?本文介绍了一类新型软体机器人,它们模仿了自然界中观察到的模式——对数螺线 $\{v^*\}$ 。通过简单的缆线驱动,所提出的设计实现了逼真的运动与稳定抓取。我们还通过大量原型(尺寸从厘米级到米级不等)及多机器人阵列,进一步展示了卓越的可扩展性。

摘要

尽管结构和生活环境存在差异,多种动物附属器官(如章鱼触手、象鼻等)都遵循着共同的模式——对数螺旋。本文报道了一类新型软体机器人,它们基于跨尺度的通用设计原理,在形态上复现了这种螺旋结构。这种设计不仅实现了快速低成本制造,还通过缆线提供了简单高效的控制机制。我们进一步提出了一种受章鱼启发的抓取策略,能自动适应目标物体的形状。通过大量实验,我们展示了SpiRobs的灵巧性,以及抓取尺寸跨越两个数量级、重量达自身260倍物体的能力。最后,我们通过三个衍生版本验证了其可扩展性:微型夹爪、搭载于无人机的1米长机械臂,以及能缠绕多种物体的SpiRobs阵列。

引言

动物拥有高度灵活的附肢,尺度各异;例如,从海马和变色龙那仅几厘米长的卷曲尾巴^{1,2},到章鱼长达一米的手臂和大象的象鼻^{3,4}。这些附肢能实现多种运动,服务于捕食、移动、操控及防御等不同目的。生物启发一直是构建软体机器人的关键驱动力⁵⁻⁷。然而,尽管已有设计能成功处理精细或不规则物体⁸,确保人机交互任务的安全性^{9,10},并在医疗领域得到应用^{11,12},现有解决方案在灵巧性和敏捷性上仍无法与自然生物比肩。例如,大象的象鼻既能轻柔卷起3厘米的胡萝卜,又能举起300公斤的原木¹³;而章鱼可在亚秒级时间内触及并捕获猎物¹⁴。

试图弥合这一差距面临三大主要挑战。首先是对高度可变形性的需求。以章鱼触手为例,其触手几乎能实现连续变形(例如,在任何位置¹⁵弯曲近180°)。目前已提出多种软体机械臂设计方案

不同的驱动方法,包括气动¹⁶⁻¹⁸和缆线驱动¹⁹⁻²¹。然而,这些原型大多只能在末端产生曲率有限的弧形弯曲:这限制了它们适应各种物体,尤其是小型物体的能力。使用软材料(如硅胶)可以增加弯曲范围并提高灵活性^{22,23}。然而,这可能导致在大驱动力下出现褶皱和屈曲,进而意味着无法保持稳固的抓握。总之,仅使用软材料是不够的:灵巧性需要柔软,但过于柔软则无法承受合理的负载。

其次,开发能充分利用机器人灵活性的抓取策略至关重要。为此,利用与物体互动时产生的被动变形将大有裨益。²⁴已有个实例证明,软体机器人无需复杂传感与控制即可抓取各类物体,无论是通过环绕包裹²⁵⁻²⁸还是利用柔软“手指”进行围合^{29,30}。然而,这类机器人通常只能执行单一重复动作(如弯曲-释放)。Grissom等人设计了一种多节段气动驱动臂,能够抓取并移动物体³¹。总之,目前仍缺乏普适性的伸展策略,

抓取和运输不同形状、来自不同位置的物体（与刚性机器人相比，尽管以规划和控制的复杂性为代价）。开发此类技术是朝着（尽可能）接近章鱼触手卓越功能多样性的关键一步。

第三也是最后一点，理想的做法是设计出能够（在规模上）适应多样化目标应用的可扩展解决方案。然而，绝大多数现有原型都是针对特定案例的，依赖于大量模拟以及反复试错。 $\{v^*\}$

我们观察到，尽管在尺寸（如从厘米到米不等）、解剖结构（如纯肌肉或骨骼与肌肉的协同）以及生存环境（如陆地或水中）方面存在巨大差异，但多种动物附肢在形态上有一个共同点：它们紧密盘绕的形状符合对数螺旋（图1A和S1）。³³⁻³⁵此外，螺旋的卷曲/展开对其功能至关重要；例如，大象从尖端卷曲鼻子以拾取地面上的物体，而章鱼则通过展开触手来触及目标。因此，本研究的目标是超越具体的动物实例，从几何角度（对数螺旋）描述一类软体机器人的设计、制造与操作。

我们提出了两项原则，以实现人工系统中对数螺旋形卷曲/展开的再现。首先，我们引入了一种跨尺度的通用设计，基于对数螺旋的离散化与展开（图1和图2）。这使得能够轻松制造出多样化的机器人（图1D）。其次，受章鱼启发，我们开发了一种抓取策略，通过控制线缆实现螺旋形身体的卷曲/展开运动，使其能够触及并环绕物体（图3）。该策略特别利用了接触时的被动形变，以适应不同形状和大小的物体（如杯子、笔、鸡蛋、草莓、菠萝等；图S7；视频S6），并在狭小空间内操作（视频S7），无需精确反馈或复杂的规划与控制。此外，我们通过三个应用展示了其可扩展性：微型SpiRob用于处理微小生物样本（如蚂蚁，如图4和视频S14所示），附着于无人机上的1米长SpiRob执行动态抓取任务（图5；视频S19），以及一组通过缠绕拾取多种物体的SpiRob阵列（图6；视频S20）。

结果

SpiRobs的设计

对数螺旋（又称生长螺旋）在极坐标 (r, q) 下由方程 $r = ae^{b\theta}$ 表示，其中 $a > 0$ 与 b 为比例参数。我们的设计基于对数螺旋的离散化与展开过程（图1B）。首先构建中心螺线——该曲线由相位差为 2π 的螺旋线上两点间连线中点构成： $r_c(q) = \frac{\rho(\theta) + \rho(\theta + 2\pi)}{2}$ 。随后以固定角度间隔(Δq)从原点引出射线，连接这些射线与原始螺线及中心螺线的交点，形成一系列四边形。最后通过将这些四边形关于中心螺线镜像对称，构建出机器人躯体的离散单元。

（图1B）。需要注意的是，一旦螺旋参数（ a 和 b ）和离散化步长（ Dq ）确定，单元的形状和尺寸便完全确定（实验步骤；SpiRob设计）；实际上，相邻单元之间保持固定比例（SpiRobs制造），这使得我们只需设计单个单元并通过等比缩放即可获得任意尺寸的SpiRob。这些单元展开后自然形成锥形主体。在穿过机器人内部线缆的拉力作用下——线缆一端通过绳结固定于尖端，另一端连接电机（图1C；视频S1）——该主体可重新卷曲缠绕。

在连接离散单元的中心轴上添加了一层弹性层，这为机器人在电缆松弛时提供了恢复伸直的回弹力。通过挤出二维设计图案生成三维实体后，我们切割出六边形横截面（图2A）。这一设计既保持了机器人各侧在三维空间中的渐缩形态，又降低了惯性，从而为末端运动提供了更高的灵活性。随后，我们在最终计算机辅助设计（CAD）图纸上冲压出适宜尺寸的线缆过孔，并采用3D打印技术（Bambu Lab X1C打印机，热塑性聚氨酯[TPU]@95A材料，具体打印与组装规范参见图S2、注释S1及补充实验流程）完成机器人制造。

SpiRobs的单元尺寸从基部到尖端逐渐减小（按固定比例；参见Jiang等人的研究及公式9）。这是因为我们应用的是角度域（ Dq ）上的均匀离散化，这是机器人卷曲成对数螺旋的关键。曲率半径（在收纳状态下）从基部向尖端递减（与机器人尖端到该点的长度呈仿射关系；参见Hauser和Hughes的研究、公式7及表S1）。这表明靠近尖端处具有更高的柔韧性，这对SpiRobs缠绕抓取各种物体（尤其是小型物体）的能力至关重要。这与现有设计形成关键差异——后者大多以恒定曲率方式变形。³⁶为直观展示这一点，我们在图2B中绘制了可抓取空间（定义为能抓取最小可抓取物体的位置集合）。与两种替代设计的对比验证了我们方案的优势（图S3）。

弹性层的厚度（图2A中的 $s\delta qP$ ）影响机器人的运动。我们设计了弹性层厚度从2.5%到12.5%以2.5%为增量变化的一系列原型（百分比表示 $s\delta qP/d\delta qP$ 的值）。较薄的弹性层容易导致与基底的碰撞（图2C，情况①和②），而较厚的层则需要更大的力来弯曲（图S3C；视频S2）。为了在作用力与卷曲成功率之间取得平衡，我们为双缆SpiRobs选择了5%的弹性层厚度。

选择锥角构成了另一个关键的设计决策。我们设计了三种不同锥角（5°、10°和15°）但长度和尖端直径相同的SpiRobs（图2D）。研究发现，工作空间的包络同样呈现螺旋形态（图2E与S4；注S2）。此外，MuJoCo³⁷中的仿真验证了所有内部点均可到达（图2E与S5；注S3）。另外，我们还能通过解析方法描述可抓取物体尺寸与重量之间的关系（注S2）。

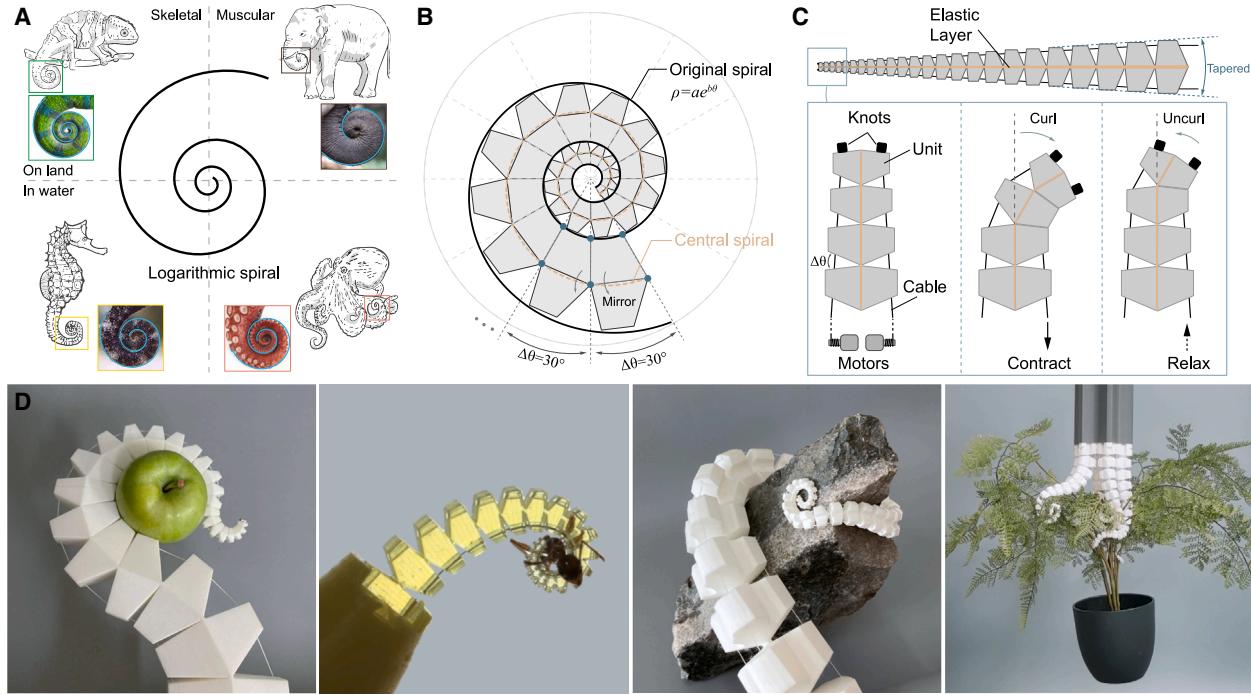


图1.螺旋机器人的生物灵感与设计原理 (A) 遵循对数螺旋的动物部位示例。蓝色线条为拟合的螺旋轨迹。(B) SpiRob的设计方案。对数螺旋($r = ae^{b\theta}$)以固定步长($D\phi$)离散化，生成的四边形沿中心螺旋镜像对称排列构成机器人单元。(C) 中轴线上添加弹性层。机器人外壳轮廓(顶部虚线)形成固定锥角的圆锥体。缆线连接电机并通过绳结固定于顶端单元，缆线收缩与舒张驱动机器人卷曲与舒展。(D) 多款SpiRob应用场景：双缆机器人抓握苹果、微型机器人钳制蚂蚁、三缆机器人缠绕岩石，以及阵列式SpiRob纠缠植物。所有机器人都采用3D打印技术制造。

结论针对固定长度和尖端直径得出。锥角越小，工作空间越大（图2E）。同时，锥角越大，可抓取的最小物体直径越小，最大负载能力也越大；此外，在直径固定的情况下，重量越大（对于大尺寸物体差异更为显著；图2F和补充说明S2）。以锥角为15°的机器人为例，它能抓取直径跨越两个数量级的物体（从5.6毫米到115毫米），承载重量约为机器人自重（38.4克）的260倍（负载能力达10公斤；理论依据见图2G和补充说明S2）。

仿生抓取策略

我们的策略通过控制机器人的卷曲/舒展运动，实现了对不同物体的触及、包裹、抓取和运输。这种运动模式在章鱼^{3,38}中有记载：它逐步舒展并伸直卷曲的触手以触及目标。与物体接触后，触手继续在物体表面舒展，使吸盘对齐（图3A；视频S3）。对于双缆SpiRob而言，这是通过控制缆线力实现的：当仅拉伸左侧或右侧缆线时，机器人会向左/右卷曲，紧密盘绕成螺旋状。通过协同控制施加在两条缆线上的力（以拮抗方式），机器人得以伸展、接触

物体，并沿着物体表面展开身体，环绕并抓握它（图3A；视频S3和S6）。我们将这种在物体表面的展开运动称为“攀爬”，类似于植物（如常春藤）在墙上的攀爬。类似的抓握策略在³⁹多关节刚性机器人中已有报道；然而，我们的设计实现了更为简化的方法，无需刻意设计滑轮系统。

我们在真实机器人（共24个单元，总长45厘米；图3B、S6和S7；注释S4和S5）以及仿真环境中（采用基于串联弹性关节的模型；视频S8）验证了该抓取与操作原理的有效性。与基于指尖的抓取方式⁴⁰不同，所提出的策略利用机器人全身与物体接触并环绕包裹。这种方式的优势在于更大的接触面积意味着更高的负载能力和抓取稳定性。需要特别指出的是，尽管我们的设计未像章鱼那样配备吸盘，但通过在物体表面展开卷曲的躯体就足以实现包裹抓取。此外，在攀爬过程中，机器人躯体不会相对于接触面滑动，这是自动适应不同形状与粗糙度物体的关键所在。同时，这一特性也使机器人能够轻松穿越狭窄空间（图3B和S8的最后两行；视频S7）。我们进一步通过定量实验评估了该策略对不同形状物体的可抓取空间范围。

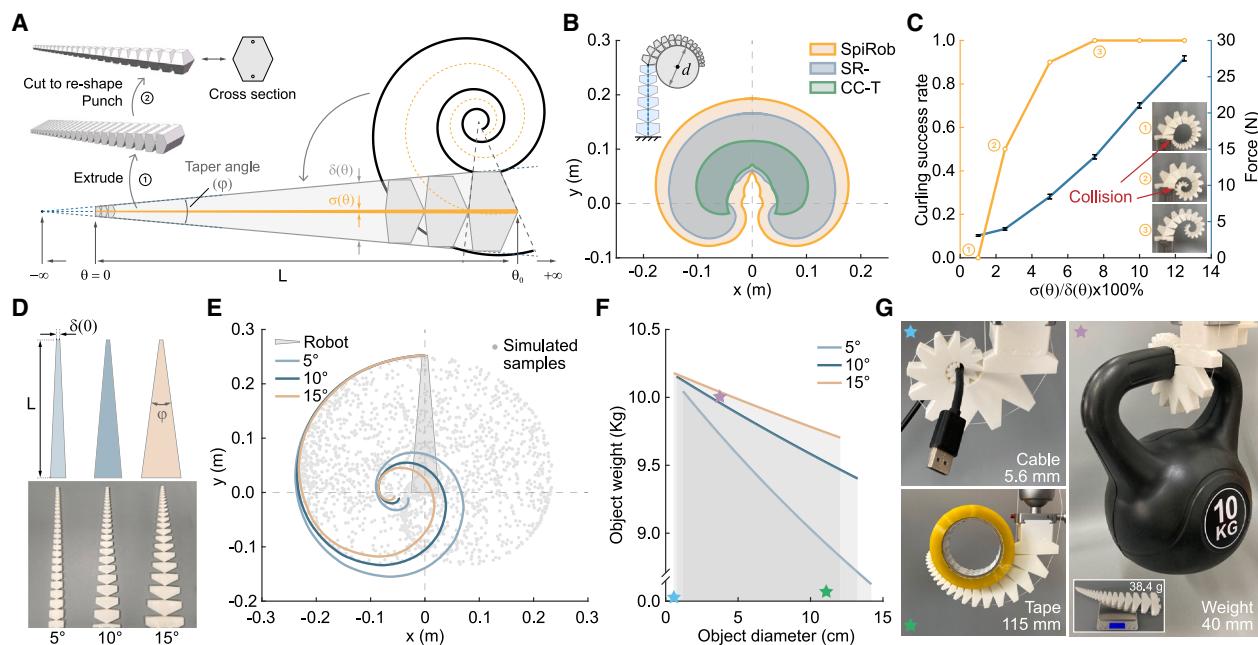


图2. 设计参数

(A) 一个由两根缆线驱动的25厘米长SpiRob的计算机辅助设计 (CAD) 模型。首先，将二维离散化图案拉伸形成三维实体（步骤①），随后切割成锥形，并预留两个孔供缆线穿过（步骤②）。(B) 不同设计在抓取最小可握持物体时的工作空间对比：SR-为变形能力较低的SpiRob（通过固定单元长度同时减小间隙获得）；CC-T为锥形恒定曲率机器人。(C) 弹性层厚度对卷曲效果的影响。若使用薄层，机器人会与底座发生碰撞。增加厚度可解决此问题，但也意味着需要更大的力才能将机器人卷曲成螺旋状。(D) 不同锥角的SpiRob：5°、10°和15°；L代表机器人长度，d(0)为其尖端宽度（本例中L=25厘米，d(0)=5.5毫米）。(E) 工作空间：锥角越小，工作空间越大。工作空间包络线计算方法见注S2。灰色点表示基于关节-连杆模型（注S3）在仿真中随机采样缆线力生成的10°机器人可达点。(F) 理论预测（注S2）在最大驱动力100N时可抓取的物体尺寸与重量：固定直径下，锥角越大意味着可抓取重量越大。(G) SpiRob (15°) 抓取5.6毫米直径缆线、115毫米直径胶带及10公斤重物的实物图。(F)与(G)中的星号用于将实验数据与重量-直径图表对应。

不同尺寸。我们将工作空间的右半部分划分为 $5 \times 3 \times 5$ 厘米的网格单元，选取了三种不同直径（25、50和100毫米）的物体，并在每个网格点上进行了抓取测试（图3C）。研究发现，直径越小，可抓取的最远点越接近工作空间的边界。特别是，同一物体若放置过远或过近，可能无法被抓取。

为了实现抓取的自动化，我们提出了一种检测与物体接触的方法，以及一种简单的控制规则（分段线性驱动；图3A），通过将电缆力直接关联到物体位置来进行调控。关于前者，我们注意到当机器人接触物体时，电机电流会增大（因为电机试图维持恒定的运动速度）。这一现象可被用于接触感知。通过多次实验设定了检测阈值，这种简单机制甚至能检测到最轻微的接触，例如与羽毛的接触（图3D；视频S4）。关于后者，我们首先指出，在伸展阶段初期左侧电缆所受的力(F^0)反映了机器人打包的紧密程度。这会影响机器人在右侧电缆被拉动时的展开难易程度，

反过来，这决定了SpiRob在伸展时所遵循的轨迹。基于这一观察，我们采用了一个简单的通用规则，将 F^0 定义为目标物体在极坐标中的位置($p; a$)的函数。具体而言，我们考虑一个线性关系 $F^0 = -c_1 p + c_2 a + c_0$ ，其中 $c_{0,1,2} > 0$ 为常数（通过实验确定为 $c_0 = 14$ ； $c_1 = 13$ ；以及 $c_2 = 5$ ）。这一选择背后的直觉如下：较小的力允许机器人伸展得更远（因此使用了 $-c_1 < 0$ ）。此外，物体的偏航角越大，所需的力也越大，以避免过早展开。这种方法仅需物体的近似位置（例如，通过摄像头获取；Kinect V2, Windows），从而避免了高频反馈或精确运动规划的需求。结合接触检测机制，我们在抓取不同形状物体时实现了持续的高成功率（图3E实验中的~95%成功率；视频S5）。

可扩展性

小型SpiRobs

我们将图3中展示的双缆机器人按比例缩小70倍，使其长度约为1厘米，共包含29个单元，尖端直径为

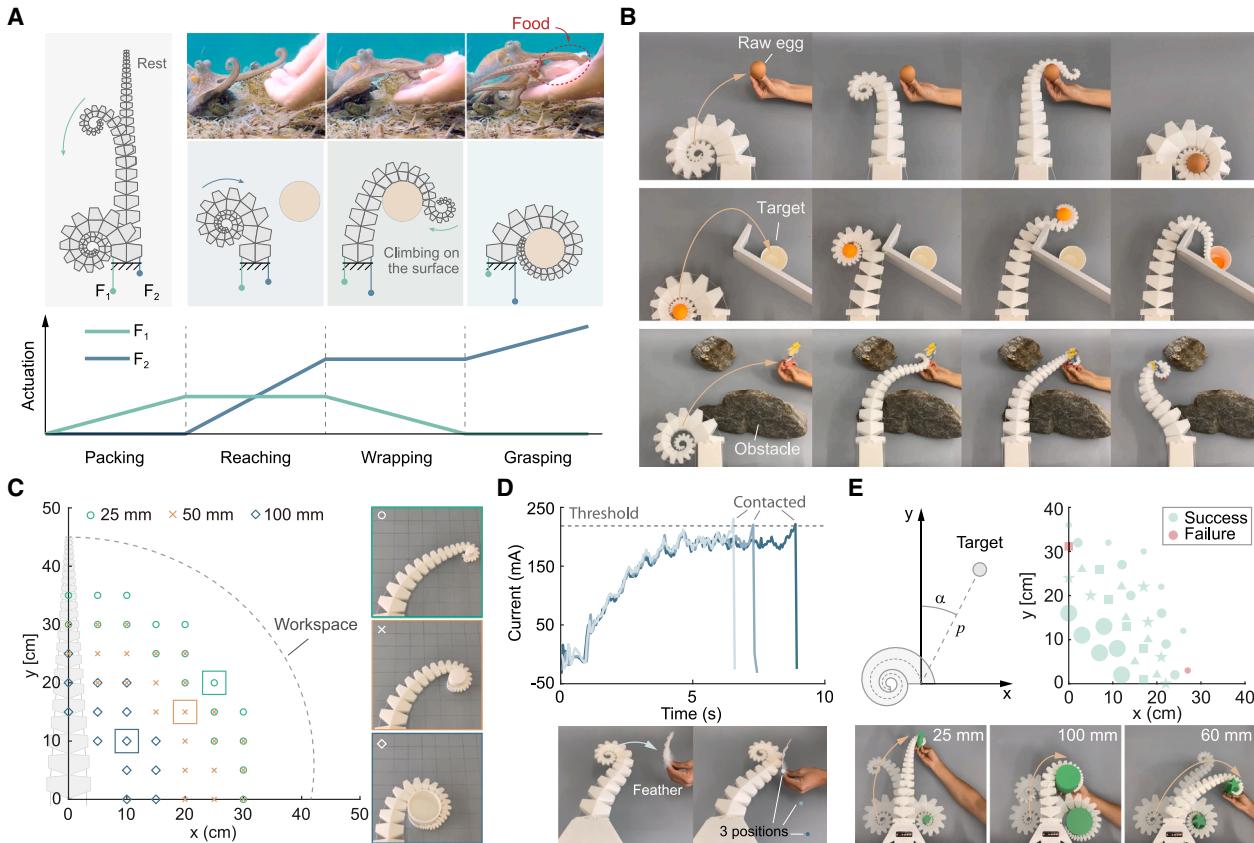


图3. 抓取

(A) 章鱼逐步舒展触手以接近、缠绕并抓取食物的连续画面（原视频来源：<https://www.youtube.com/watch?v=GdCOYToDqfM>）。受此启发，我们开发了一种通过控制两根缆线上的力来复现这一运动的策略。从静止状态（无外力）开始，我们增加左侧缆线的拉力，使机器人从末端卷曲成螺旋状（收拢阶段）。接着，在保持左侧缆线力(F_1)不变的同时增加右侧缆线的力(F_2)，机器人从基部开始舒展并伸向目标物体（伸展阶段）。当与物体接触后，我们在维持右侧缆线力的同时缓慢减小左侧缆线的力，使机器人能沿物体表面攀附并缠绕（缠绕阶段）。最后，我们增加右侧缆线的力以实现稳固抓握（抓取阶段）。

(B) SpiRobs抓取并移动各种物体：抓取生鸡蛋、将乒乓球运送至墙后的目标位置，以及穿过缝隙进行伸展操作

抓取并检索目标物体（更多测试见图S7和图S8）。

(C) 采用所提策略时不同尺寸物体的可抓取空间。彩色点代表物体（以不同 $\{v^*\}$ 表示）所处的位置。

标记物可以被成功抓取。工作空间的包络线以灰色虚线绘制。

(D) 机器人通过检测电流变化感知与羽毛的接触。通过在三个试验（不同位置）中重复这一过程，我们确定可以在整个工作空间内使用相同的阈值进行接触检测，同时保持高灵敏度。该检测机制可用于启动我们策略中的接触与包裹阶段。

(E) 机器人仅通过摄像头获取物体位置的最小信息($p; \alpha$)，即可自动抓取不同几何形状的物体。不同几何形尺寸被放置在(C)中标识的近似区域内。

0.14毫米（图4A）。我们采用树脂材料(ST1400, BMF)通过立体光刻3D打印技术(Microarch S130, BMF)制造该机器人。两根直径为20毫米的电缆穿过机器人主体，并在尖端与树脂粘合（图4C）。它们由笔形手柄上的两个滑块控制（图4B）。实验证明，此设计能够在不损伤蚂蚁的情况下对其进行操作（图4D；视频S14）。

三缆线SpiRobs

我们还制作了一个1米长的机器人（由42个单元组成，顶端/基部直径为5毫米/12厘米；逐步构建指南详见补充实验步骤），该机器人由三根均匀分布在环绕横截面的圆周上的电缆驱动。

我们首先通过将螺旋线离散化（如图1所示）获得一系列部件，然后通过旋转生成3D实体（替代双缆机器人中使用的镜像操作）。弹性轴（厚度10%）连接这些离散单元。我们进一步切割以重塑横截面（图5A），目的有二：(1)降低整体惯性；(2)增加机器人抓取物体时的接触面积。由于该机器人长度超出3D打印机工作区域，我们将其分为四段打印，并使用燕尾连接器进行组装（图5E）。

我们手动操作这三根电缆，采用与之前描述类似的策略：机器人展开其卷曲的身体

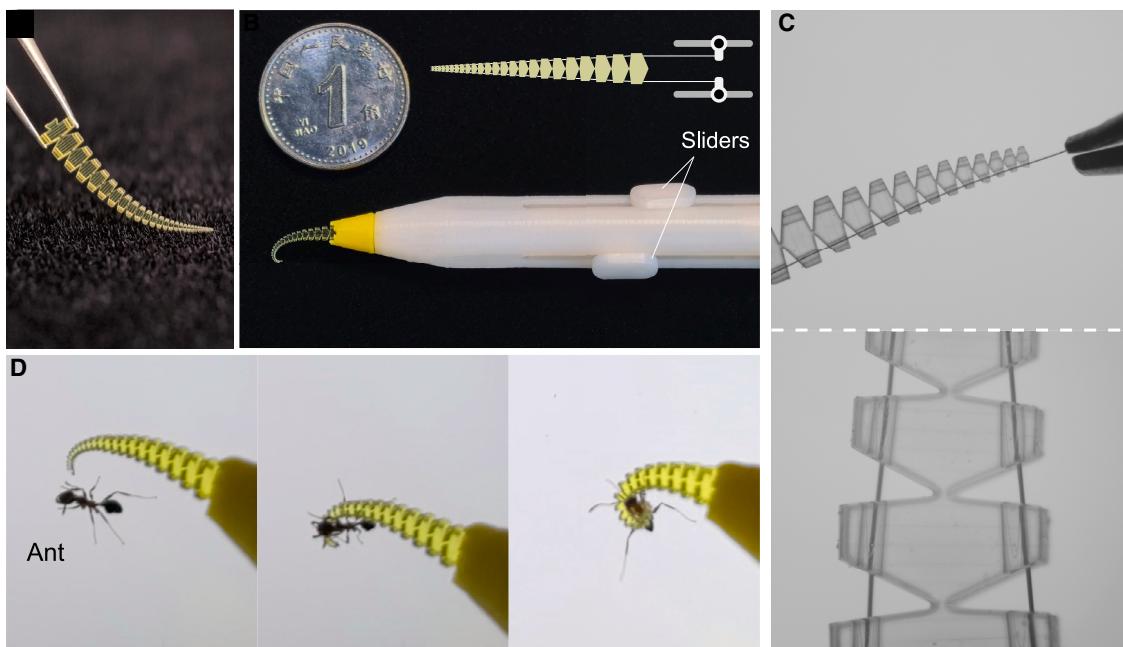


图4. SpiRob用于非侵入性抓取小型生物体 (A) 一款3D打印的微型 (毫米级) SpiRob。 (B) 系统组装示意图。两根缆线分别连接两个滑块，通过移动滑块可实现机器人的双向弯曲。 (C) 缆线与机器人的实物照片。 (D) 微型SpiRob精准抓取蚂蚁的演示。

在物体表面缠绕并抓握（图5B和S14；视频S15和S16）。对于三维空间中的动态操作，由于机身固有的惯性和刚度以及重力效应，可以实现更高的灵活性。通过对其中一根电缆施加简单的锯齿形驱动，机器人机身会卷曲并到达特定位置，随后展开产生鞭打动作（图5C和S13；视频S17）。此外，还可通过额外的“卷曲”指令（拉动另外两根电缆）实现抓取，例如在1秒内抓取并抬起耳机（图5D；视频S18）。

此外，我们将机器人及其配备三个电机的控制终端（图S2C；注S6）安装至无人机上，通过遥控进行了抓取测试（图5B）。控制无人机悬停于一个水桶（内置1千克负载）附近，并指令SpiRob朝桶把手方向甩动以实施抓取（图5F；视频S19；利用机载摄像头提供视觉反馈）。

多SpiRob阵列

我们还构建了一种由多个SpiRob组成的夹持器（每个SpiRob由3根缆线构成，长度25厘米，顶端/基部直径分别为5/30毫米），这些SpiRob均匀排列在一个圆周上（图6A）。我们将该夹持器固定于刚性臂上（图6B），通过缠绕方式实现抓取；实验表明，该设计无需任何感知或反馈控制，即可对10种尺寸和形状完全不同的物体实现有效抓取（视频S20）。我们还评估了臂数对抓取成功率的影响（图6C）；当使用六个SpiRob组成的阵列时，夹持器可实现超过90%的成功率。增加臂数并未显著

提高成功率（因为需要更大直径的圆环来分布抓臂，这使得抓取较小物体如网球的失败率更高）。我们还利用力传感器测量了负载能力（定义为将物体从抓握中拉出所需的力）。我们3D打印了五种不同分支数量（2、4、8和16，如图6D所示）的树状目标物。研究发现，物体形状越复杂，由于更高程度的缠绕，抓握就越稳固。需要指出的是，Becker等人^{v*}曾提出过类似概念。更多可视化内容可参见图6E和视频S20。

讨论

基于对数螺旋的设计原理构成了本研究的主要创新点。与软体机器人领域先设计硬件、后开发模型的常规流程不同，在我们的系统中，建模（对数螺旋）先行，而设计/制造则是模型的直接产物。这使得SpiRobs能够针对多样化的应用场景（如抓取尺寸与负载能力方面；表S1）进行精准设计，无需采用试错法或依赖大量仿真实验。公式标记^{v*}保持不变。

螺旋结构已被应用于多种机器人设计中。张等人和Zournatzi等构建了螺旋形模具，用于制造气压驱动的软体机器人，这些机器人在加压时会展开^{30,42}。然而，恒定宽度的横截面限制了螺旋变形（图S15A和S15B）。Taylor等人设计了一种电缆驱动的蛇形结构²⁸，而王等人则...

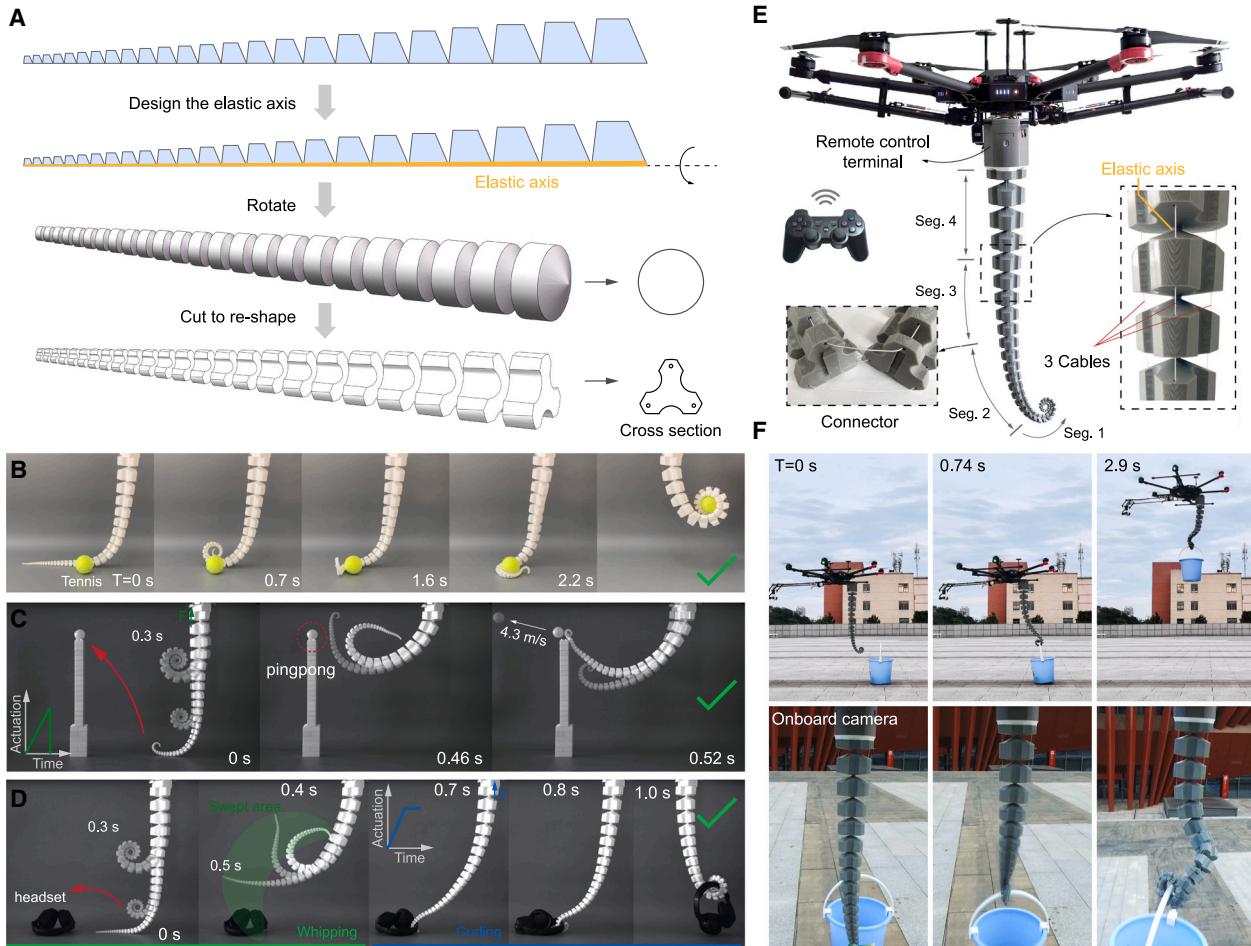


图5. 大规模三缆线SpiRobs

(A) 可变形三维SpiRob的设计。我们首先将部件围绕中心轴旋转形成锥形主体，随后进行切割以获得横截面，该设计在缠绕物体时增大了接触面积（同时降低了整体惯性）。(B) SpiRob从桌面拾取小球的连续图像序列；机器人长度为1米，由四个通过燕尾接头组装的部件构成，圆柱形中心轴作为弹性层（参见E）。(C) 鞭打动作。机器人以亚秒级时间动态抵达某点，通过简单锯齿状驱动弹跳乒乓球。(D) 机器人在1秒内抓取并抬起耳机。(E) 无人机搭载装置。(F) 抓取水桶的连续图像序列；机器人与无人机均通过遥控操作。

制造了一种热驱动的卷须状夹持器⁴³。这两种装置都能在一定程度上实现螺旋形变（见图S15E和S15G，前者通过体内可变刚度实现，后者则得益于构成其主体的两种材料的不同伸长率）。然而，它们的螺旋运动只能遵循制造过程中设定的单一重复模式。这与SpiRobs形成鲜明对比——后者能在身体任意部位以可控方式实现螺旋运动（这是实现多样化操控的关键特性）。即便是刚性机器人也曾利用过螺旋原理：Edmark采用激光切割胶合板制作出多节段机器人，通过牵拉缆绳可使其卷曲成螺旋状⁴⁴（图S15I）；杉浦等人则开发了一种能从螺旋形态展开为直线形态的机器人，用以辅助行动不便者⁴⁵（图S15J）。但在这两个案例中，螺旋运动都是预先设定的，而...

也没有展示物体抓取的能力。本研究的一个独特贡献在于，据我们所知，首次提出了一种设计，不仅在形状上，而且在身体各点的变形上都复制了对数螺旋(v^*)的特性。最终成果是快速制造（采用低成本3D打印技术）出具有仿生速度与多功能的机器人，尽管其驱动机制极为简单。

仿生抓取策略实现了高度的适应性和抓取稳定性。例如，与直接弯曲相比，它显著增大了抓取空间（图S6）。然而值得注意的是，当SpiRob在物体表面攀爬时，它会施加一个可能将物体推开的力（我们在图S9中对此进行了测量）。不过，我们注意到这并非严重问题；例如，在抓取未固定的草莓（图S7）或放置在桌上未被撞开的球时，情况便是如此。

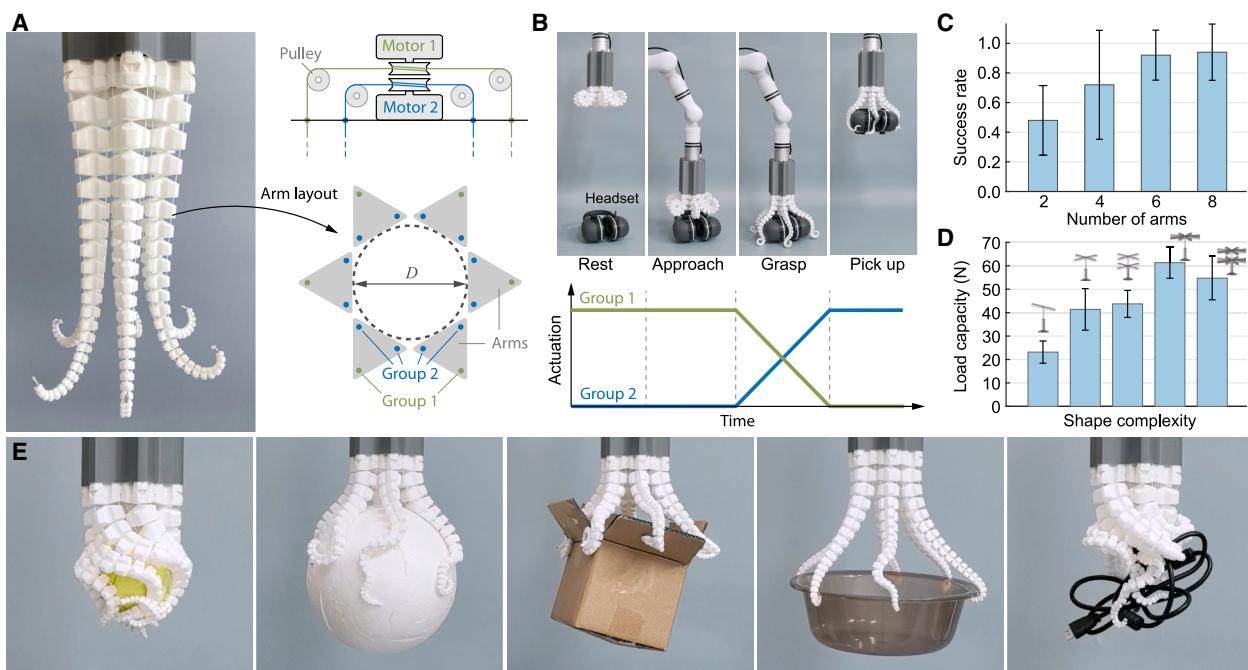


图6. 作为抓取器使用的SpiRob阵列 (A) 由6个SpiRob臂组成的多臂抓取器。右图：臂的布局及其驱动方式。缆线分为两组：外侧（组1）和内侧（组2），每组由一台（共用）电机控制。拉动外侧缆线会使所有臂卷曲，而拉动内侧缆线则使其展开。(B) 阵列连接至刚性机械臂时的抓取动作序列。下方绘制了不同阶段缆线的驱动模式。(C) 使用不同数量臂进行抓取的成功率。测试使用了十个不同大小和形状的物体，其中五个如(E)所示（更多细节见表S2）。(D) 通过逐步增加形状复杂度（即分支数量）的树状物体测试，测量了6臂抓取器的负载能力。(E) 由最大60N力驱动的6个SpiRob阵列缠绕各类物体的照片。

(图5B)。多SpiRob夹爪不存在此类问题，因为它是通过包裹物体来实现抓取的。此外，机器人的速度也起到了积极作用；通过快速移动线缆，机器人能够在不移位的情况下从塑料盒中取出组织（图S7G）。最后同样重要的是，我们还展示了如何通过类似的操作策略将机器人末端引导至目标位置和姿态（图S10；视频S9）。

类似的策略已在刚性机器人上展示过，即通过展开机器人来抓取物体。Hirose和Umetani展示了一种由多个串联关节（类似于自行车链条）组成的机器人，能够从紧凑状态展开并环绕物体³⁹（图S15K）。然而，采用线缆驱动的欠驱动方式无法实现稳固抓握。为解决这一问题，Glick等人在机器人身体上增加了粘附部件⁴⁶，但代价是牺牲了灵活性（例如，机器人身体无法自接触；图S15L）。在本研究中，我们通过对两条线缆施加力的简单分段线性控制序列，成功实现了这一抓取策略。这一选择的理论依据可在我们先前的工作中找到⁴⁷。

我们最后指出当前这项工作的主要局限，即缺乏一个逆运动学和动力学模型，该模型本可用于推断达到目标构型所需的最优缆绳驱动，同时还需兼顾

反馈。这对于开发比我们所提出的、仅需最小反馈（接触检测）即可实现仿生抓取策略的控制器更为通用的控制器至关重要。因此，构建此类模型与控制器将成为我们未来工作的首要任务。

结论

SpiRobs在形态和操作上均受到生物启发。其设计原理的一个显著特点是可扩展性（已通过厘米至米尺度的机器人验证）。它们能够执行复杂运动，并以极少的驱动（2-3根缆线）展现出处理不同尺寸和形状物体的强大适应能力。我们进一步展示了三种应用：(1) 可处理脆弱样本的微型机器人，(2) 便携平台（无人机）上的遥操作，以及(3) 通过缠绕实现功能的多臂抓取器。

实验步骤

SpiRobs的设计

一个SpiRob由三个主要部分组成：机器人主体、缆绳和电机。每根缆绳的两端分别连接至最末端的单元和电机，缆绳的收缩/松弛驱动相应地转化为机器人的卷曲/展开运动。接下来，我们将阐述设计流程并确定机器人主体的关键参数。

我们以一款配备两根缆绳的SpiRob为例；它可以在平面上朝两个方向缠绕。回顾对数螺旋的表达式 ($\{v^*\}\delta\theta; q\{v^*\}$) 为极坐标)：

$$\rho(\theta) = ae^{b\theta}, b = \cot \psi \quad (\text{Equation 1})$$

其中， $a>0$ 为比例因子， b 为恒定极角切线角 ψ 的余切，该角度定义为螺旋线上某点切线与连接该点至原点的线段之间的夹角。(1)式可改写为 $r(\theta)=eb(\theta+\frac{b}{a})$ ，因此 a 可解释为角度域的平移， b 则为缩放因子。在设计时，我们将关注范围限定于 $\theta \geq 0$ 。尖端对应 $\theta=0$ ，而 $\theta<0$ 的范围表示从尖端延伸至机器人外缘交汇点($\theta=-N$ ；图2A)。我们通过以下方式定义表征机器人中心轴线的“中心”螺旋(图1B)：

$$\rho_c(\theta) = \frac{1}{2}(ae^{b(\theta+2\pi)} + ae^{b\theta}) = \frac{a}{2}(e^{2\pi b} + 1)e^{b\theta} \quad (\text{Equation 2})$$

从原点出发并以固定角度间隔(默认情况下，除非另有明确说明，我们的机器人选用 $Dq = 30^\circ$)的射线与原始螺旋和中心螺旋上的点相交，连接这些点形成四边形。这一过程构建了机器人一部分结构，我们在其上附加了一层提供弹性的弹性层，这对机器人的灵活性至关重要。另一部分结构则通过相对于中心轴的镜像获得。在我们的设计中，弹性层厚度选为2缆线机器人单位宽度的5%，3缆线机器人则为10%。

机器人的锥角(f)与螺旋参数的关系如下：

$$\phi = 2 \arctan\left(\frac{\frac{1}{2}\delta(\theta)}{L(-\infty, \theta)}\right) = 2 \arctan\left(\frac{b(e^{2\pi b} - 1)}{\sqrt{b^2 + 1}(e^{2\pi b} + 1)}\right) \quad (\text{Equation 3})$$

其中 $d\delta\theta = ae^{b(\theta+2\pi)} - ae^{b\theta}$ 表示机器人在角度 q 处的宽度，且

$$L(-\infty, \theta) = \int_{-\infty}^{\theta} \sqrt{\rho_c^2 + \dot{\rho}_c^2} d\theta = \frac{\rho_c(\theta)}{\cos \psi} \quad (\text{Equation 4})$$

捕捉了从“虚拟”尖端($q=-N$)到给定点(角度 q)的中心螺旋长度(图2A)。(3)式中 f 与 q 无关的事实表明，螺旋在展开时呈锥形。

机器人的中心轴长度与螺旋参数存在以下关系：

$$L(0, \theta_0) = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\rho_c^2 + \dot{\rho}_c^2} d\theta = \frac{\rho_c(\theta_0) - \rho_c(0)}{\cos \psi} = \frac{\sqrt{b^2 + 1} a_1}{b} (e^{b\theta_0} - 1) \quad (\text{方程5})$$

这里的积分下限($q=0$)对应机器人的尖端，而上限(q_0)对应根部(图2A)。当机器人被卷曲成对数螺旋形态时，其曲率 $k\delta\theta$ 可通过中心螺旋的表达式计算得出

$$\kappa(\theta) = \frac{\sin \psi}{\rho_c(\theta)} = \frac{2}{a(e^{2\pi b} + 1)\sqrt{b^2 + 1}} e^{-b\theta} \quad (\text{Equation 6})$$

特别是，曲率随 q 呈指数变化。我们进一步将曲率半径表达为各点与虚拟尖端距离的函数(下文记作 $shL\delta-N; q\theta$)。利用式(4)、(6)和(1)，我们得到

$$r(s) = \frac{1}{\kappa(s)} = bs \quad (\text{Equation 7})$$

这表明中心轴的曲率半径随着与(虚拟)尖端距离的增加而线性变化。此外，变形比(g)定义为机器人移动时其表面长度之比

从左侧的包装状态到右侧的包装状态(反之亦然)，可以计算为

$$\gamma = \frac{\int_{2\pi}^{\theta+2\pi} \sqrt{\rho^2 + \dot{\rho}^2} d\theta}{\int_0^{\theta} \sqrt{\rho^2 + \dot{\rho}^2} d\theta} = e^{2\pi b} \quad (\text{Equation 8})$$

机器人身体上所有点(由角度 q 参数化)的变形比率相同，这意味着机器人的任何部分都以相同比例变形。举例来说，当 $b=0.22$ (即锥角 $f=15^\circ$)时， $g=3.98$ 。这对于一个连续均匀体而言，要在不随时间劣化或甚至因反复拉伸/缩短而断裂的情况下承受如此大的变形是相当困难的。我们基于螺旋离散化的多单元设计是解决这一问题的关键。这一现象也解释了象鼻表面皱纹与褶皱的存在，为大幅变形提供了可行性和可持续性。⁴⁸

螺旋机器人的制造

机器人采用桌面级3D打印机(X1CC, Bambu Lab)配合1.75毫米TPU线材(eTPU-95A, eSUN；图S2A)制造而成。需注意，机器相邻单元之间保持固定比例 $\{v^*\}$ 。

$$\beta = \frac{\delta(\theta + \Delta\theta)}{\delta(\theta)} = e^{b\Delta\theta} \quad (\text{Equation 9})$$

其中 Dq 为离散化步长。因此，我们只需设计一个单元，随后按比例因子 b 进行放大或缩小即可获得相邻单元。其次，较长机器人可采用燕尾连接器分段制造(图S2A)。图3所示双缆机器人由两段组成，图5所示三缆机器人则由四段构成。我们在每个单元上设计了供缆线穿过的小孔，并采用超高分子量聚乙烯缆线作为驱动介质。此类缆线兼具耐磨性与顺滑特性，能有效降低其在机器人体内移动时的摩擦阻力。此外，缆线末端采用渔人结固定于尖端单元，确保驱动力传递时不会打滑。

执行动态任务的SpiRobs

我们展示了SpiRobs展现出与生物体相似的优异能力：高速动态运动、抗冲击以及稳健抓取。在亚秒或秒级时间尺度上，章鱼能迅速捕捉游动的鱼类，而大象则能用长鼻将水喷洒全身。通过简单的开环或手动控制(视频S10)，我们实现了类似的特性。抓取动作最快可在60毫秒内完成(图S11A；视频S1)。此外，被动变形机制使其能捕获高速运动的不同尺寸物体(图S11B；视频S11)。该机器人还表现出卓越的抓取稳定性，可抵抗平面外扭转和动态冲击(图S11C；视频S12)。

此外，我们还进行了多次“象鼻抛掷”和“鞭打”动作的实例演示。在前者中，高速展开能以10.5米/秒的速度抛掷物体(图S12；视频S13)。后者则利用身体固有刚度和重力效应，使卷曲的身体“弹射”至特定位置(图5C与S13；视频S17)或抓取物体(图5D；视频S18)。通过朝不同方向抛掷物体及在不同位置实施鞭打动作，我们验证了SpiRobs运动的可重复性与可控性。

控制端子

我们构建了三种用于驱动不同机器人的电机控制终端。首先，用于双缆机器人操作的终端由两台电机(GM6020，大疆；图S2B)、一个嵌入式控制器(大疆Robomaster开发板A型)和24V电池组成。这些电机采用无齿轮箱直驱无刷设计，可实现扭矩、速度及位置控制，这为基于电流的接触检测提供了基础。其次，应用于无人机场景的三缆SpiRob终端(图S2C)配备三台电机(M2006，大疆)及嵌入式控制器(大疆Robomaster开发板C型)，该终端支持2.4GHz无线通信。

连接至遥控操纵杆的模块。无人机为系统供电以减轻重量。最后，多SpiRob夹爪的终端由两个电机（M2006，大疆；图6B）、一个微控制器（Robomaster开发板，C型，大疆）以及安装在刚性臂基座内的电源组成。

数据分析

电机电流、转速及位置数据通过STM32Cube监控器采集。电缆长度由MATLAB根据记录的电机转子位置换算得出。针对动态任务（如图5及图S11–S13所示），采用高速摄像机（ACS-3，NAC Image Technology）拍摄视频并截取画面。

资源可用性

主要联系人

如需获取更多信息和资源，请联系主要负责人Nikolaos M. Freris（nfr@ustc.edu.cn），他将负责处理相关请求。

材料可用性

有关设计和制造的材料已共享。

数据和代码可用性

本文无任何代码可供报告。●如需重新分析本文报告数据所需的额外信息，请根据要求联系主要联系人。

致谢

作者谨向王娟博士和张一元先生致以谢意，感谢他们富有洞见的讨论与实验建议，同时感谢陶野博士（Bambu Lab Inc.）提供3D打印机。此外，我们还要感谢创新实践基地、中国科学技术大学信息科学中心、纪建民教授以及龚伟教授对实验工作的大力支持。

作者贡献

概念化，Z.W.与N.M.F.；方法论，Z.W.与N.M.F.；调研，Z.W.、N.M.F.及X.W.；文稿撰写——初稿，Z.W.与N.M.F.；文稿撰写——修订与编辑，Z.W.、N.M.F.及X.W.；监督指导，N.M.F.与X.W.。

利益声明

Z.W.和N.M.F.作为一项中国专利（CN114770585B）的发明人，该专利涵盖了SpiRobs的基本原理与设计。

补充信息

补充信息可在<https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100646>在线查阅。

收稿日期：2024年9月30日 修回日期：2024年11月5日 录用日期：2024年11月18日 出版日期：2025年12月6日

参考文献

1. Porter, M.M., Adriaens, D., Hatton, R.L., Meyers, M.A., 与 McKittrick, J. (2015). 为何海马尾巴呈方形。科学 349, aaa6683. <https://doi.org/10.1126/science.aaa6683>.
2. Luger, A.M., Ollevier, A., De Kegel, B., Herrel, A., 与 Adriaens, D. (2020). 变色龙尾部椎体形态的变异是否与栖息地利用相关？《形态学杂志》281, 229–239. <https://doi.org/10.1002/jmor.21093>.
3. Kier, W.M., 和 Stella, M.P. (2007). 章鱼臂肌肉与结缔组织的排列与功能。形态学杂志 268, 831–843. <https://doi.org/10.1002/jmor.10548>.
4. Dagenais, P., Hensman, S., Haechler, V., 和 Milinkovitch, M.C. (2021). 大象进化出降低其象鼻生物力学复杂性的策略。当代生物学 31, 4727–4737.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.029>.
5. Kim, S., Laschi, C., 与 Trimmer, B. (2013). 软体机器人：机器人大学中受生物启发的进化。《生物技术趋势》31, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>.
6. Rus, D., 和 Tolley, M.T. (2015). 软体机器人的设计、制造与控制。《自然》521, 467–475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>.
7. Hauser, H., 与 Hughes, J. (2024). 形态计算——过去、现在与未来。Device 2, 100439. <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100439>.
8. Ilievski, F., Mazzeo, A.D., Shepherd, R.F., Chen, X., 和 Whitesides, G.M. (2011). 面向化学家的软体机器人技术。《德国应用化学》国际版 50, 1890–1895. <https://doi.org/10.1002/anie.201006464>.
9. Jiang, H., Wang, Z., Jin, Y., Chen, X., Li, P., Gan, Y., Lin, S., 与 Chen, X. (2021). 面向非结构化交互的软体机械臂分层控制。国际机器人研究杂志 40, 411–434. <https://doi.org/10.1177/0278364920979367>.
10. 关强, 斯特拉·F、德拉桑蒂纳·C、冷杰与休斯·J (2023)。修剪螺旋体：一种架构化软结构，可实现高精度、大工作空间及顺应性交互的软体机器人。《npj机器人学》1, 4. <https://doi.org/10.1038/s44182-023-00004-7>.
11. Burgner-Kahrs, J., Rucker, D.C., 与 Choset, H. (2015). 医疗应用中的连续体机器人：综述。IEEE 机器人汇刊 31, 1261–1280. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2489500>.
12. Gaeta, L.T., Albayrak, M.D., Kinnicutt, L., Aufrechtig, S., Sultania, P., Schlegel, H., Ellis, T.D., 与 Ranzani, T. (2024). 一种用于手部康复的磁控软体机器人手套。Device 2, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100512>.
13. Wilson, J.F., Mahajan, U., Wainwright, S.A., 与 Croner, L.J. (1991). 大象鼻子的连续介质模型。生物医学工程杂志 113, 79–84. <https://doi.org/10.1111/1.2894088>.
14. Gutfreund, Y., Flash, T., Yarom, Y., Fiorito, G., Segev, I., 和 Hochner, B. (1996). 章鱼臂运动的组织：研究柔性臂控制的模型系统。《神经科学杂志》16, 7297–7307. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.16-22-07297.1996>.
15. Kier, W.M., 和 Smith, K.K. (1985). 舌、触手与象鼻：肌肉静水骨骼运动的生物力学。林奈学会动物学杂志 83, 307–324. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1985.tb01178.x>.
16. Grzesiak, A., Becker, R., 与 Verl, A. (2011). 仿生操作助手：增材制造的成功案例。《装配自动化》31卷, 329–333页. <https://doi.org/10.1108/01445151111172907>.
17. Nguyen, P.H., Sparks, C., Nuthi, S.G., Vale, N.M., 与 Polygerinos, P. (2019). 软体多肢系统：迈向日常生活任务移动操作的新范式。《软体机器人》6, 38–53. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0065>.
18. 谢, Z., 袁, F., 刘, J., 田, L., 陈, B., 付, Z., 毛, S., 金, T., 王, Y., 何, X., 等 (2023)。受章鱼启发的传感化软臂用于环境交互。《科学机器人》8, eadh7852. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adh7852>.
19. Coevoet, E., Escande, A., 和 Duriez, C. (2017). 基于优化的软体机器人逆模型及接触处理。IEEE 机器人与自动化快报 2, 1413–1419. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2669367>.
20. Morales Bieze, T., Kruszewski, A., Carrez, B., 和 Duriez, C. (2020). 基于柔性脊柱的可变形机械臂机器人设计、实现与控制。《国际机器人研究杂志》39, 1604–1619. <https://doi.org/10.1177/0278364920910487>.
21. Amanov, E., Nguyen, T.-D., 和 Burgner-Kahrs, J. (2021)。具有可伸展段的肌腱驱动连续体机器人——基于模型的 $\{v^*\}$ 评估

路径跟踪运动。《国际机器人研究杂志》40卷, 7-23页。<https://doi.org/10.1177/0278364919886047>。 22. Calisti, M., Giorelli, M., Levy, G., Mazzolai, B., Hochen, B., Laschi, C., 和 Dario, P. (2011)。受章鱼启发的软体机器人运动与操作解决方案。《生物灵感与仿生学》6卷, 036002。<https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/3/036002>。 23. Cianchetti, M., Arienti, A., Follador, M., Mazzolai, B., Dario, P., 和 Laschi, C. (2011)。受章鱼启发的机械臂设计理念与验证。《材料科学与工程: C》31卷, 1230-1239页。<https://doi.org/10.1016/j.msec.2010.12.004>。 24. Sheperd, R.F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S.A., Stokes, A.A., Mazzeo, A.D., Chen, X., Wang, M., 和 Whitesides, G.M. (2011)。多步态软体机器人。《美国国家科学院院刊》108卷, 20400-20403页。<https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108>。 25. Pak, J., Cho, I., 和 Kim, J. (2015)。基于形状工程弹性微管的螺旋弯曲能力微型触手机器人。《科学报告》5卷, 10768。<https://doi.org/10.1038/srep10768>。 26. Xie, Z., Domel, A.G., An, N., Green, C., Gong, Z., Wang, T., Knubben, E.M., Weaver, J.C., Bertoldi, K., 和 Wen, L. (2020)。受章鱼臂启发的锥形软体致动器及其吸盘改进抓取能力。《软体机器人》7卷, 639-648页。<https://doi.org/10.1089/soro.2019.0082>。 27. Zhang, J., Hu, Y., Li, Y., Ma, K., Wei, Y., Yang, J., Wu, Z., Rajabi, H., Peng, H., 和 Wu, J. (2022)。如海马尾般多功能: 一种仿生可编程连续体机器人用于贴合抓取。《先进智能系统》4卷, 2200263。<https://doi.org/10.1002/aisy.202200263>。 28. Taylor, I.H., Bawa, M., 和 Rodriguez, A. (2023)。通过尺度不变设计实现强力包络抓取的触觉混合刚性-软体连续体机械手。《IEEE机器人与自动化国际会议 (ICRA)》, 10331-10337页。<https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10161121>。 29. Rothemund, P., Ainla, A., Belding, L., Preston, D.J., Kurihara, S., Suo, Z., 和 Whitesides, G.M. (2018)。用于软体致动器自主控制的双稳态软阀。《科学机器人》3卷, eaar7986。<https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7986>。 30. Zhang, Z., Wang, X., Meng, D., 和 Liang, B. (2021)。仿生螺旋软体气动致动器及其特性表征。《仿生工程学报》18卷, 1101-1116页。<https://doi.org/10.1007/s42235-021-00075-y>。 31. Grissom, M.D., Chitrakaran, V., Dienna, D., Csenitis, M., Pritts, M., Jones, B., McMahan, W., Dawson, D., Rahn, C., 和 Walker, I. (2006)。OctArm软体机械手的设计与实验测试。《SPIE无人系统技术VIII》, 491-500页。<https://doi.org/10.1117/12.665321>。 32. Jiang, H., Liu, X., Chen, X., Wang, Z., Jin, Y., 和 Chen, X. (2016)。基于蜂窝气动网络的软体机械手设计与仿真分析。《IEEE机器人与仿生学国际会议 (ROBIO)》, 350-356页。<https://doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866347>。 33. Thompson, D.W. (1992)。《论生长与形态》第一版, J.T. Bonner 编 (剑桥大学出版社)。<https://doi.org/10.1017/CBO9781107325852>。 34. Porter, M.M., Novitskaya, E., Castro-Cesen{v*} a, A.B., Meyers, M. A., 和 McKittrick, J. (2013)。高度可变形骨骼: 异常变形

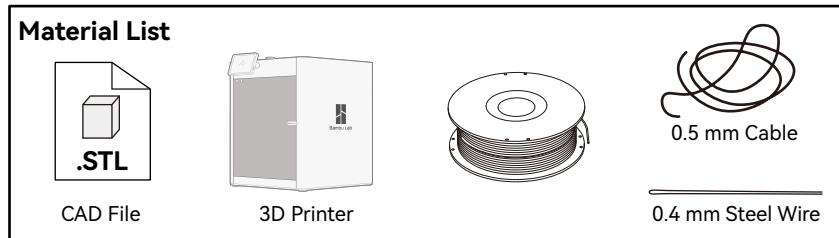
- 海马盔甲的机制。《生物材料学报》9, 6763-6770。<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.02.045>。
35. 汉默尔, Ø. (2016)。《完美形态》(Springer国际出版)。<https://doi.org/10.1007/978-3-319-47373-4>。
36. Webster, R.J., 和 Jones, B.A. (2010)。恒定曲率连续体机器人的设计与运动学建模: 综述。《国际机器人研究杂志》29, 1661-1683。<https://doi.org/10.1177/0278364910368147>。
37. 托多罗夫, E., 埃雷兹, T., 和塔萨, Y. (2012)。MuJoCo: 基于模型控制的物理引擎。发表于《IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》, 第5026-5033页。<https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386109>。
38. Packard, A., 和 Sanders, G.D. (1971)。普通章鱼的体表模式及对干扰反应成熟度的研究。《Anim. Behav.》19, 780-790。[https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(71\)80181-1](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(71)80181-1)。
39. 广瀬茂男, 梅谷阳一 (1978)。多功能机器人手用软抓手的开发。《机械与机器理论》, 13卷, 351-359页。[https://doi.org/10.1016/0094-114X\(78\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0094-114X(78)90059-9)。
40. Ruotolo, W., Brouwer, D., 和 Cutkosky, M.R. (2021)。从抓取到操作: 多指夹持器上的仿壁虎粘附技术。《科学·机器人学》6, eabi9773。<https://doi.org/10.1126/scirobotics.abi9773>。
41. Becker, K., Teeple, C., Charles, N., Jung, Y., Baum, D., Weaver, J.C., Mahadevan, L., 和 Wood, R. (2022)。主动纠缠实现随机拓扑抓取。《美国国家科学院院刊》119, e2209819119。<https://doi.org/10.1073/pnas.2209819119>。
42. Zournatzis, I., Kalaitzakis, S., 和 Polygerinos, P. (2023)。SoftER: 一种用于分拣应用的螺旋形软体机器人弹射器。《IEEE机器人与自动化快报》8, 7098-7105。<https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3315206>。
43. 王伟、李超、Cho M. 与 Ahn S.-H. (2018)。软卷须启发的抓取器: 可编程聚合物-纸双层复合材料的形状变形。《ACS应用材料与界面》10卷, 10419-10427页。<https://doi.org/10.1021/acsami.7b18079>。 44. Henrich A. (2021)。John Edmark: 运动中的艺术。《数学万象》94期, 65-68页。<https://doi.org/10.1080/0025570X.2021.1843890>。 45. 杉浦翔、Unde J.、朱宇与长谷川洋 (2023)。高强度柔性体重支撑机构。《机器人力学杂志》10卷, 16页。<https://doi.org/10.1186/s40648-023-00255-x>。 46. Glick P.E.、Van Crey N.、Tolley M.T. 与 Ruffatto D. (2020)。欠驱动抓取器对未知物体的鲁棒捕获。载于《IEEE机器人与自动化国际会议 (ICRA)》, 3996-4002页。<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197100>。 47. 王哲与 Freris N.M. (2024)。利用摩擦效应实现电缆驱动螺旋机器人的章鱼式伸展运动。载于《IEEE软体机器人国际会议 (RoboSoft)》, 537-542页。<https://doi.org/10.1109/RoboSoft60065.2024.10522036>。 48. Schulz A.K.、Boyle M.、Boyle C.、Sordilla S.、Rincon C.、Hooper S.、Aubuchon C.、Reidenberg J.S.、Higgins C. 与胡立德 (2022)。皮肤褶皱使象鼻实现不对称伸展。《美国国家科学院院刊》119卷, e2122563119。<https://doi.org/10.1073/pnas.2122563119>。

DEVICE, Volume 3

补充信息

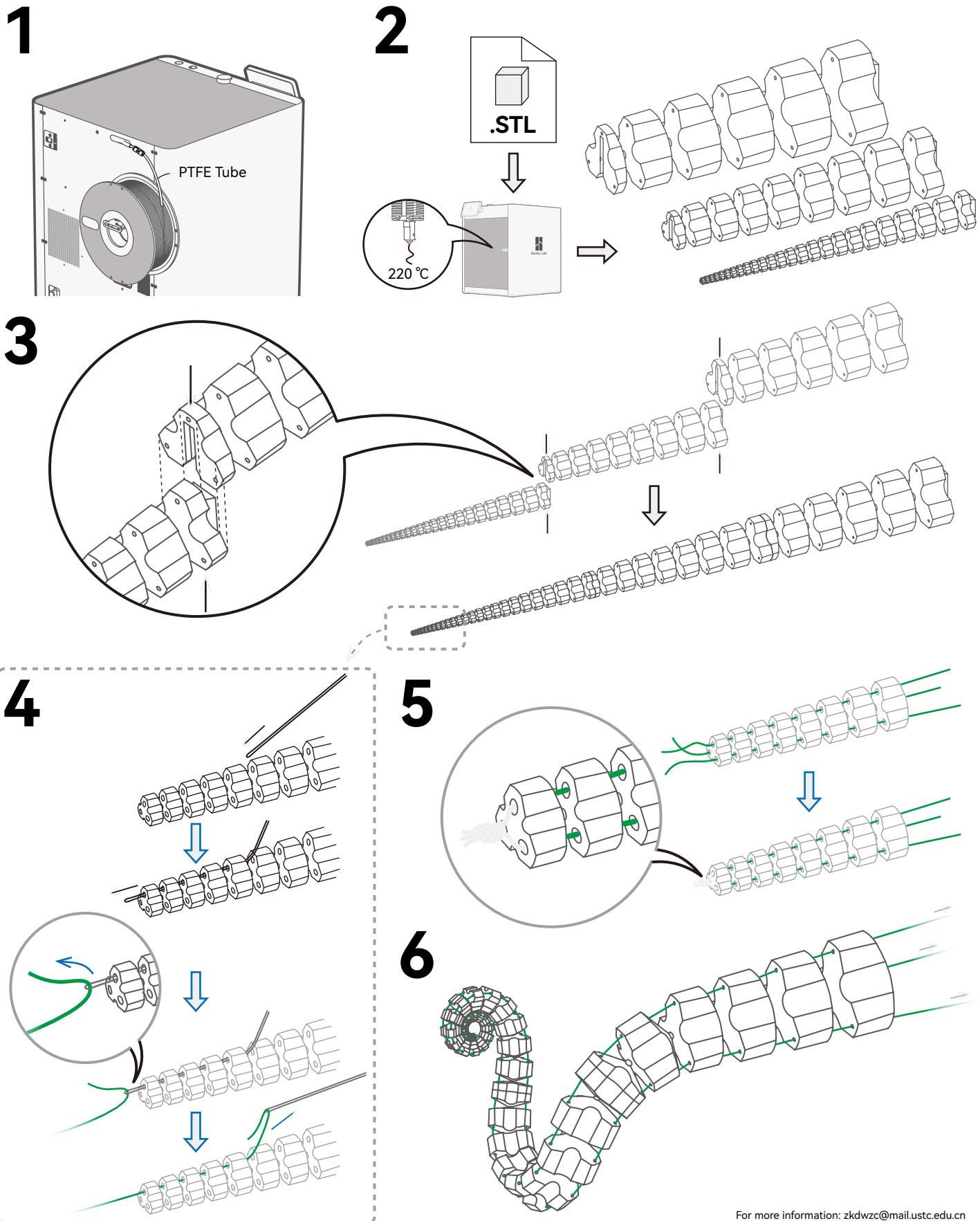
SpiRobs：适用于多尺度通用抓取的对数螺旋形
机器人 詹驰·王、尼古拉斯·M·弗雷里斯与魏曦

Supplemental Experimental Procedures



SpiRob

Fabrication Instructions



For more information: zkdwzc@mail.ustc.edu.cn

补充说明

注S1. SpiRobs的制备

SpiRob的主体部分采用热塑性聚氨酯（TPU）材料，通过Bambu Lab X1CC打印机进行打印。以下是打印时需要考虑的一些要点：

- 选择硬度合适的TPU材料。不同硬度的TPU会导致机器人刚度差异，例如有68D、95A、83A等选项（按硬度从高到低排列）。我们选用eSUN公司的eTPU 95A，因其能确保更高打印成功率（硬度越低打印失败风险越大）。
- 使用前保持TPU线材干燥。烘干线材可避免成品出现拉丝、渗料等湿度相关问题。
- 确保TPU线材顺畅送入打印机。使用3D打印机时，请勿使用自动供料系统（AMS），而应将TPU直接置于后方线轴架或外部支架上（详见补充实验步骤）。需保证材料线轴转动顺畅，以降低送料至挤出机时的阻力。

我们已附上一份包含TPU打印设置的.3mf文件。如需了解更多关于TPU材料打印的信息，请参考Bambu Lab的打印指南。

打印完成后，将电缆穿过机器人（详见补充实验步骤）。推荐使用直径为0.5毫米的超高分子量聚乙烯（UHMWPE）电缆，因其质地柔软、经久耐用且不易拉伸。随着单元结构向末端逐渐缩小，穿孔也会相应变小，导致穿线难度增加。为此，可采用硬度较高、直径更细的金属丝制作引线针状工具，辅助电缆通过微小孔洞（可视化操作参见补充实验步骤）。最后在机器人末端打结固定，并将电缆另一端连接至驱动电机以控制其运动。

除了3D打印方法外，我们还展示了一种利用单张纸张进行折纸式机器人制造的技术（图S2D）。其核心思想是将机器人主体在平面上展开。得益于相邻单元间的比例关系，我们仅需一个单元的二维展开图即可推导出整个机器人的设计。这种方法类似于制作折纸玩具，需将印刷在纸面上的图案剪裁、弯折并粘贴到位。该设计未专门设置弹性层，而是由纸张内层自然承担这一功能。实验证明，即使采用仅重5克的纸张制作，该机器人仍能抓取重达170克（相当于其自重34倍）的苹果。图S2E展示了以类似方式制作的2缆绳机器人，它由两个独立构建的1缆绳机器人粘合而成。这种折纸法适用于制作1或2缆绳原型机，但难以通过此方式制造具备扭转变形能力的3缆绳机器人。

注S2. 螺旋机器人的理论表征 $\{v^*\}$

本节阐述螺旋机器人的工作空间、抓取范围等理论分析，

以及负载能力。我们以2缆绳机器人为例进行说明。工作空间包络线可通过以下过程获得：每个机器人单元从最靠近基座的一个开始，每次旋转一个关节，同时其他单元在旋转过程中保持为直线。因此，包络线可由旋转过程每个阶段末端连续绘制的圆弧所表征（图2E和图S4A）。因此，它近似由中心螺旋线 (ρ_c) 的渐开线所捕捉，这是另一条对数螺旋线 (ρ_w , 见图S4B)：

$$\rho_w = \frac{a}{2b} (e^{2\pi b} + 1) e^{b(\theta - \frac{\pi}{2})}.$$

我们可以推断， b 越大（即锥角 ϕ 越大，通过求导(3)式可证明 ϕ 随 b 递增），半径随角度的变化就越快，因此工作空间（通过改变 $\theta \in [0, \theta_0]$ 获得）就越小：这与我们的仿真结果（图2E）一致，进一步证实了包络线内所有点均可到达（图2E中的点是通过输入随机控制信号并记录尖端轨迹获得的）。这与现有软体机器人形成鲜明对比——后者工作空间受变形速率限制，仅能形成近似球壳状的区域^[S1]。

为研究离散化的影响，我们对比了基于离散化的多单元机器人 (S_1) 与连续螺旋形体 (S_2) 在扫掠面积上的差异（见图S4A和B）：

$$S_1 = L(\theta) \Delta\theta, \quad S_2 = \int_{\theta-\Delta\theta}^{\theta} L(\theta) d\theta, \quad (10)$$

$$\eta = \frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{b} \left(\frac{1-e^{-b\Delta\theta}}{\Delta\theta} \right). \quad (11)$$

特别要注意的是， η 独立于 θ 。这确立了一个一致有界的近似误差，该误差随着 $\Delta\theta \rightarrow 0$ 趋近于 0 ($\eta \rightarrow 1$)。此分析仅针对“虚拟”尖端（即机器人两个外部轮廓相交处，亦即 $\theta \rightarrow -\infty$ ）进行，纯粹是为了符号上的简化。

在抓取物体后，工作空间同样可采用类似的几何方法进行分析（图S4C）。其核心思路是将抓取视为有效长度的一部分损失。为计算这一损失，我们考虑用于抓取物体的那部分中心轴（图S4D中物体周围的蓝色虚线），该轴是一条螺旋线，其特征由以下参数描述：

$$\rho'_c(\theta, d) = \frac{d+\delta(0)}{2} e^{\cot\frac{\pi-\phi}{2}\theta}, \quad (12)$$

其中切向角为 $\frac{\pi-\phi}{2}$ ，而 $\delta(0)$ 为尖端宽度。抓取直径为 d 的物体（假设物体呈圆形且机器人包裹圆周的一部分 n ； $n \geq 50\%$ 被视为包裹抓取物体的下限）所需长度由下式给出：

$$L_{\text{grasp}} = \int_0^{2\pi n} \sqrt{{\rho'_c}^2 + {\dot{\rho}'_c}^2} d\theta. \quad (13)$$

剩余长度为 $L' = L - L_{\text{grasp}}$ 。通过固定 L' 并重复分析流程，我们

抓取物体后获得的工作空间包络：它大致遵循另一条对数螺线 $\{v^*\}$ 。

至于可抓取的尺寸，理论最小直径为 $d_{\min} = \rho(0) + \rho(\pi) = a + ae^{b\pi}$ ，对应机器人螺旋状紧密排列时的内切圆直径。对于尖端固定宽度 $\delta(0)$ ，在 a 和 b 之间引入了如下约束关系：

$$a = \frac{\delta(0)}{e^{2\pi b} - 1}, \text{ 这进一步意味着：}$$

$$d_{\min} = \frac{\delta(0)(e^{\pi b} + 1)}{e^{2\pi b} - 1}. \quad (14)$$

理论上可抓取的最大直径满足以下方程（表 S1）：

$$L = \int_0^\pi \sqrt{\rho'_c(\theta, d_{\max})^2 + \rho'_c(\theta, d_{\max})^2} d\theta. \quad (15)$$

这可以理解为机器人用于包裹物体周长1/2所需的完整长度（被视为通过包裹抓取的最低限度）。由(14)和(15)式可推断， b 越大（对应更大的锥角；见(3)式），机器人能抓取物体的最大/最小直径就越小。

关于可抓取的负载，我们考虑图S4C所示的情况，此时缆绳力已达到其最大值。在这种情况下，增加物体的直径或质量（或两者）将导致抓取失败。这可以通过扭矩平衡来分析：

$$M_{\max} g \rho'_c(\pi, d) = F_{\max} \left(\rho'_c(\pi, d) - \frac{d}{2} \right), \quad (16)$$

左侧为旨在展开机器人的重力扭矩，右侧为驱动扭矩。基于(12)、(14)和(15)式，我们可以推导出锥角与被抓取物体质量/直径之间的关系（表达式见表S1，结果绘制于图2F）。需要注意的是，为简化分析，我们忽略了弹性层施加的弹力、电缆与主体间的摩擦力以及各单元的形变：因此此处分析的极端情况是负载值的理论上限。

注S3. 建模与仿真

为分析运动学与动力学行为，我们采用串联弹性关节机制（即由关节连接的一系列连杆）在MuJoCo中模拟螺旋机器人（图S5A）。对于仅能在平面弯曲的双缆机器人，相邻单元通过单自由度旋转关节连接；而对于能在三维空间变形的三缆机器人，则采用三自由度球关节连接相邻单元（图S5B）。缆绳驱动机制的模拟利用了MuJoCo提供的肌腱-肌肉类。仿真中关节的粘弹性直接根据真实机器人的材料与几何特性估算（例如，关节刚度可通过杨氏模量及连接单元间的弹性层几何形状计算得出）。需注意的是，由于相邻单元按比例缩放，我们仅需确定一个

连接/关节（尺寸、质量、粘度和弹性），其余部分按比例推导。例如，质量比是单位长度比的三次方（假设密度均匀）。在仿真中为机器人关节引入限制至关重要：对应于一个单元接触下一个单元，即等于 $\pm\Delta\theta$ 。特别是当所有关节同时达到其上/下限时，机器人会紧密地排列成一条对数螺旋线。

注S4. 仿生抓取策略的评估

我们的策略灵感源自章鱼，包含以下几个阶段：将卷曲的触手向目标物体伸展（*Reaching*），与物体接触，并沿表面展开触手以环绕包裹（*Wrapping*, 图3A, 视频S3）。我们通过控制线缆力来复现这一策略。为验证其有效性，我们对该策略开启与关闭状态进行了对比实验（见图S6）。关闭时，随着线缆力增大，机器人会从末端开始卷曲，导致仅能成功抓取有限范围内（靠近末端）的物体。处于较大（但仍可触及）范围内的物体会错失（图S6A）。相反，采用所提出的仿生策略时，机器人能向不同方向展开紧密盘绕的躯体，成功实现环绕抓取（图S6B）。此外，我们定量研究了不同尺寸物体的抓取空间（图3C）。值得一提的是，章鱼吸盘在抓取中也发挥着重要作用（与缠绕形成互补）；本文仅聚焦于复现缠绕行为，吸盘的添加将留待未来研究。

注S5. 操控各类对象 $\{v^*\}$

我们使用一根长度为45厘米的双缆线SpiRob来展示其抓取和操控多种物体的能力。针对不同尺寸、形状及重量的物体进行了大量测试。结果表明，同一机器人采用相同策略可成功抓取并操控各类物体（见图S7与视频S6）。由于视觉感知与控制并非本实验重点，我们采用手动方式像操纵木偶一样控制两根缆线。

我们还测试了机器人在狭小空间内的操控能力。该机器人被用于将乒乓球移动至指定位置（图S8）。机器人展现出的“包裹”行为使其能够在不同粗糙度的表面上移动、转向并穿越狭缝（图S8，视频S7）。

注S6. 无人机应用的远程控制

我们构建了一个用于人工遥操作的控制终端（图5和图S2），该终端由三个电机（M2006，大疆）和一个嵌入式控制器（Robomaster开发板，C型，大疆）组成。终端通过2.4 GHz无线信道与操纵杆通信，并将指令转换为馈送至电机的参考扭矩信号 $\{v^*\}$ 。

补充表格：

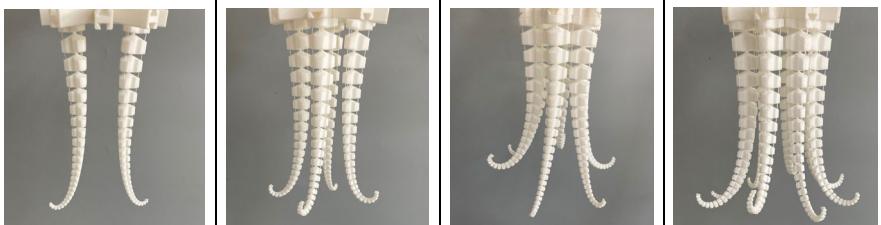
表S1. 双缆SpiRob设计参数

Parameter	Symbol	Parameterized expression
Polar coordinate	θ	-
Scaling factor	a	-
Scaling factor	b	-
Discretization step	$\Delta\theta$	-
Logarithmic spiral	$\rho(\theta)$	$ae^{b\theta}$
Central spiral	$\rho_c(\theta)$	$\frac{a}{2}(e^{2\pi b} + 1)e^{b\theta}$
Length of the central spiral from angle θ_1 to θ_2	$L(\theta_1, \theta_2)$	$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{\rho_c^2 + \dot{\rho}_c^2} d\theta = \frac{\sqrt{b^2 + 1}}{b} (\rho_c(\theta_2) - \rho_c(\theta_1))$
Length of the robot	$L(0, \theta_0)$	$L(0, \theta_0) = \frac{a\sqrt{b^2 + 1}}{2b} (e^{2\pi b} + 1) (e^{b\theta_0} - 1)$
Curvature at angle θ when packed into a spiral	$\kappa(\theta)$	$\frac{1}{\rho_c \sqrt{b^2 + 1}}$
Radius of curvature at s ($s \equiv L(-\infty, \theta)$)	$r(s)$	bs
Taper angle of the robot	ϕ	$2 \arctan\left(\frac{b(e^{2\pi b} - 1)}{\sqrt{b^2 + 1}(e^{2\pi b} + 1)}\right)$
Width of the robot at angle θ	$\delta(\theta)$	$ae^{b(\theta+2\pi)} - ae^{b\theta}$
Ratio between adjacent units	β	$e^{b\Delta\theta}$
Involute of the central spiral (workspace)	ρ_w	$\rho_w = \frac{a}{2b} (e^{2\pi b} + 1) e^{b(\theta - \frac{\pi}{2})}$
Minimum diameter of an object that can be grasped	d_{\min}	$a(1 + e^{b\pi})$
Maximum diameter of an object that can be grasped	d_{\max}	$L = \int_0^\pi \sqrt{\rho'_c(\theta, d_{\max})^2 + \rho''_c(\theta, d_{\max})^2} d\theta$
Maximum load that the robot can hold (with diameter d)	$M(\phi, d, F_{\max})$	$\frac{F_{\max}}{g} \left(1 - \frac{d}{(d + \delta(0)) e^{\cot(\frac{\pi - \phi}{2}) \pi}} \right)$

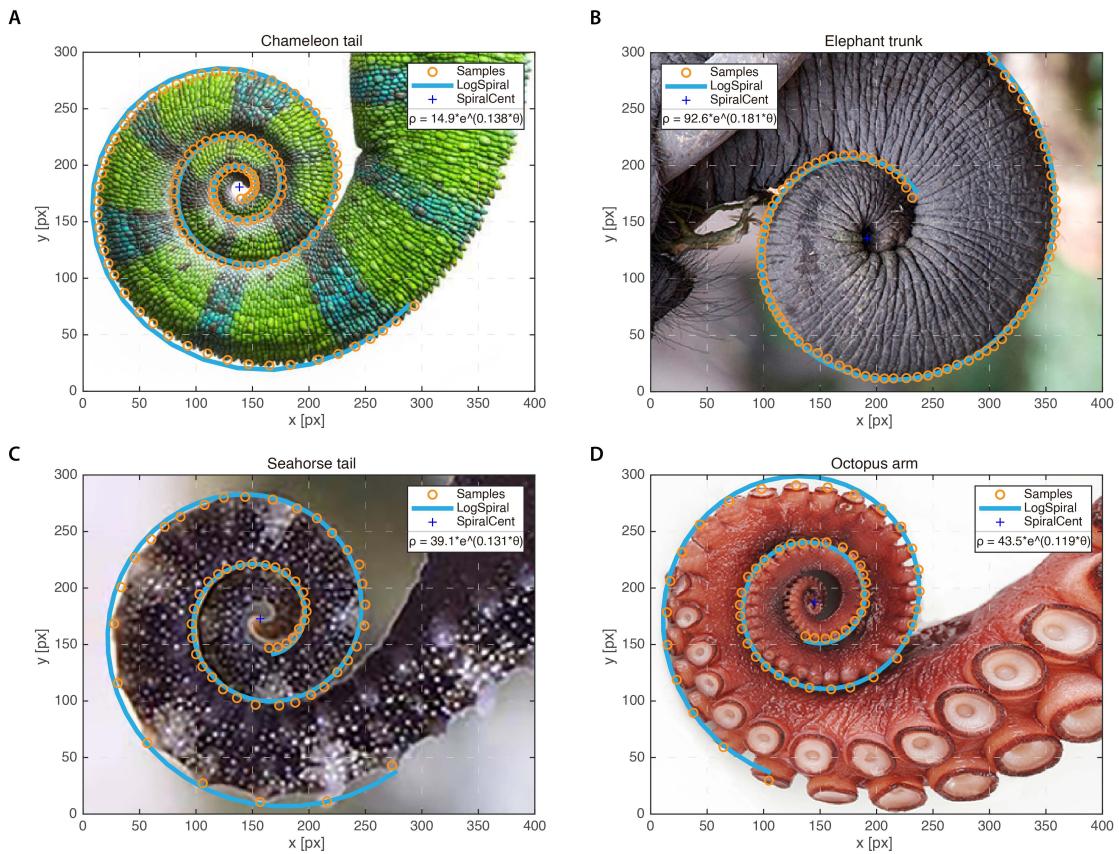
表S2. 多SpiRob抓取成功率 (每种情况5次测试)



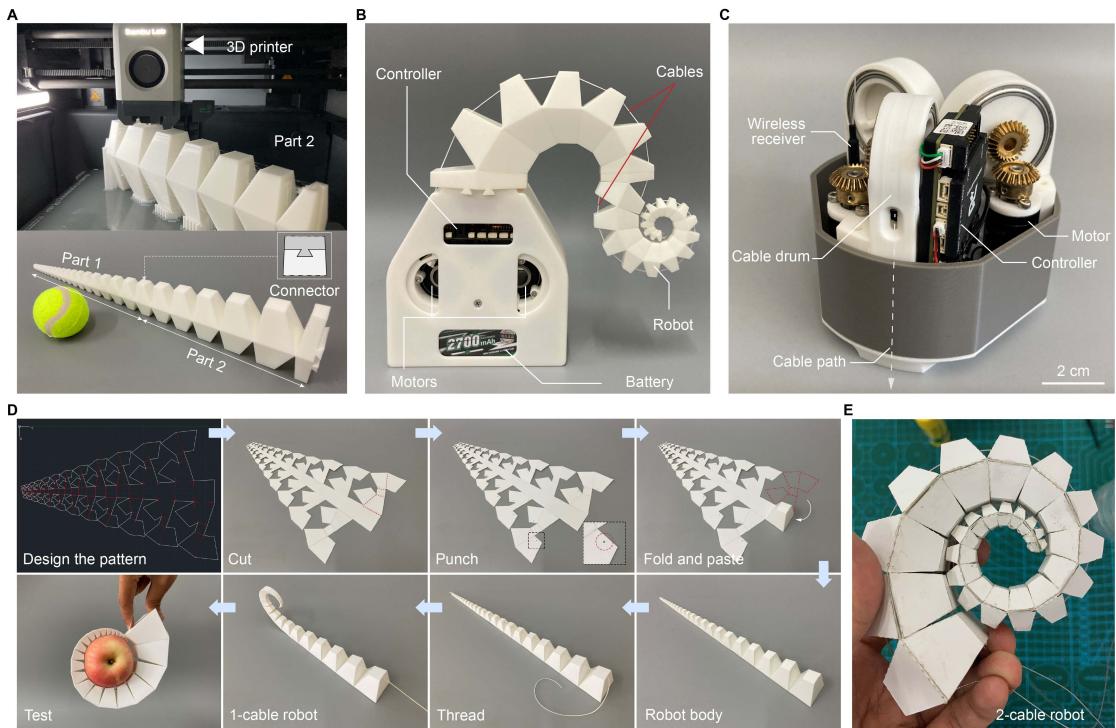
Objects	2-SpiRob array	4-SpiRob array	6-SpiRob array	8-SpiRob array
①	2/5	5/5	3/5	5/5
②	3/5	5/5	5/5	5/5
③	3/5	3/5	5/5	5/5
④	5/5	5/5	5/5	5/5
⑤	5/5	5/5	5/5	5/5
⑥	1/5	0/5	5/5	1/5
⑦	2/5	4/5	5/5	5/5
⑧	1/5	1/5	3/5	5/5
⑨	4/5	5/5	5/5	5/5
⑩	2/5	3/5	5/5	5/5
Average±SD	0.48±0.23	0.72±0.37	0.92±0.17	0.94±0.19



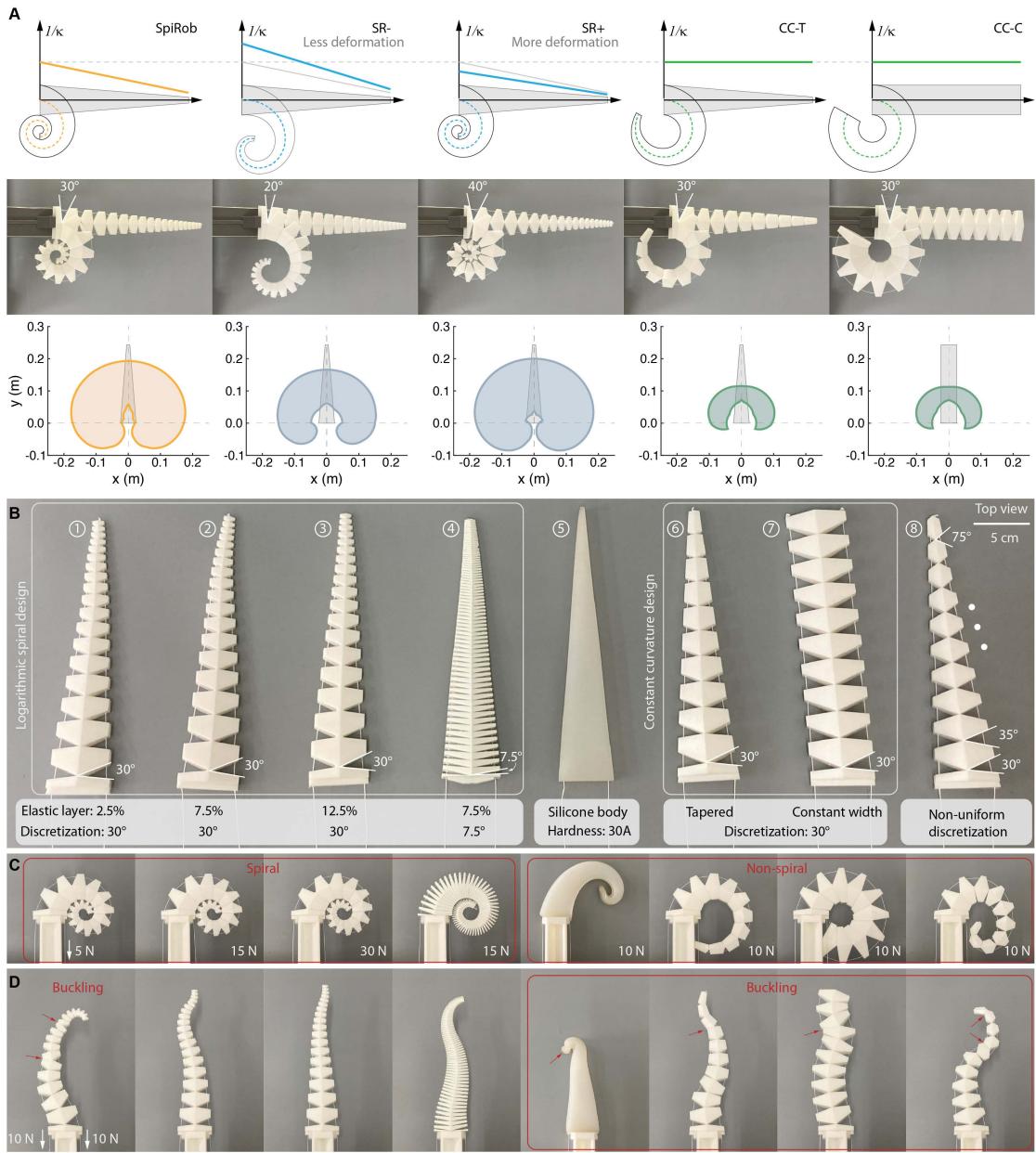
Supplemental figures:



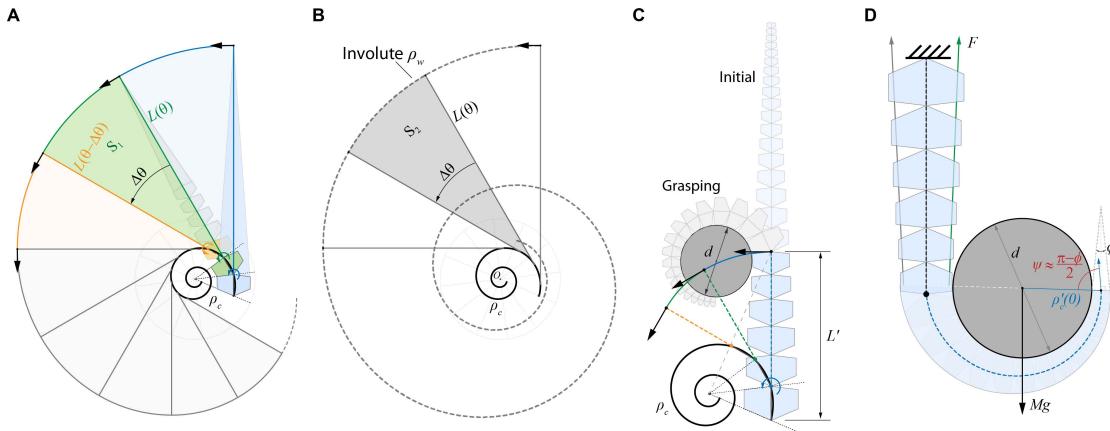
图S1. 自然界中的对数螺线。(A)-(D) 分别将对数螺线拟合至变色龙尾巴、象鼻、海马尾巴和章鱼触手。每种情况均展示了拟合参数。我们首先将图像裁剪至400x300像素并沿边缘提取点集，随后应用最小二乘法进行拟合。所有图片均来自互联网，并确保相机与对象垂直以减小透视造成的误差。



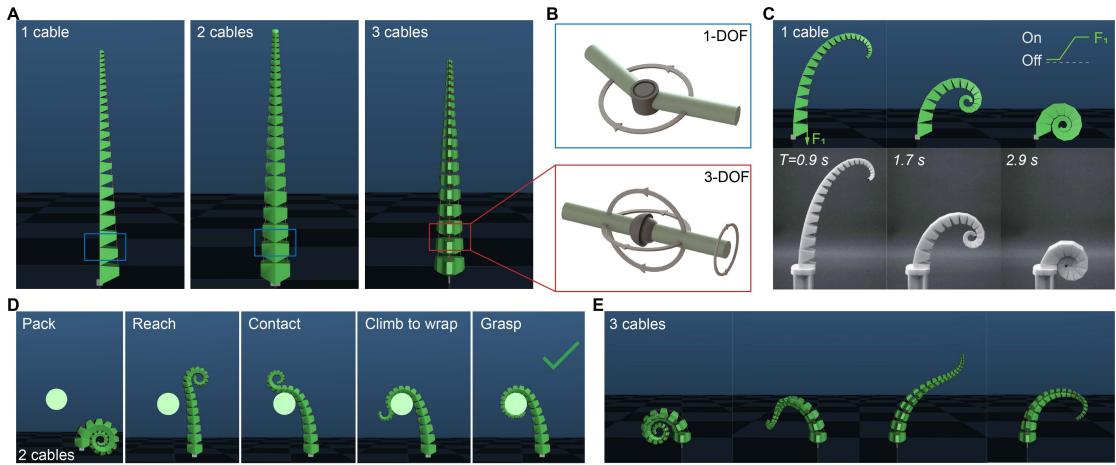
图S2. 机器人组件的制造与组装。(A) 通过3D打印制造机器人主体（首图所示）。通过分体打印部件并使用连接器（次图所示的燕尾槽）组装，可获得不同长度的机器人。(B) 驱动双缆SpiRob的硬件装置。缆线穿过各单元设计的孔洞，与直流电机相连。(C) 三缆SpiRob的控制终端由三个电机和嵌入式控制器构成。(D) SpiRob的折纸制造工艺。我们先将三维模型展开为二维平面，通过裁剪、折叠和粘贴纸张获得机器人，并在对应位置打孔供缆线穿过。该方法制造的螺旋机器人重量极轻，能实现高负载重量比，但其抓取最大重量自然小于3D打印制造的机器人。(E) 双缆折纸SpiRob实物图。两个单缆机器人背对背粘合，连接单元的纸张构成弹性层。



图S3. 不同设计方案的对比。(A) 对比实验原型。SR-与SR+为本设计的变形能力递减/递增变体（通过保持各单元标称长度不变，将间隙减小/增大 10° 实现）。CC-T为锥形恒曲率机器人^[S2]，CC-C为圆柱形恒曲率机器人。图中同时绘制了各设计持握最小可抓取物体时的工作空间。(B) 不同螺旋机器人(①-④)与非螺旋设计(⑤-⑧)的原型。(C) 右侧牵拉缆线时，驱动力标注于右下角。螺旋机器人标注的力值为实现紧密卷绕的最小值；非螺旋设计统一设定为10N，可视化结果显示其无法实现紧密卷绕。(D) 施加10N缆线拮抗力时：螺旋机器人中较薄层级更易屈曲(①)；更小的离散化步长可缓解屈曲(④)，但靠近末端的单元尺寸递减会加大制造难度；非螺旋设计在拮抗力下普遍出现严重屈曲现象。



图S4. 工作空间与负载分析。(A) 从基座出发，我们逐步转动每个单元的关节直至其接触下一单元。末端划出圆弧（以蓝、绿、橙三色示意），由此获得渐开线的分段圆弧近似。(B) 渐开螺旋线(ρ_w)近似构成了工作空间的包络线。(C) 采用类似方法，可分析抓取物体时的包络线。此时关注点不再是机器人末端，而是其本体上的某一点。 L' 表示抓取后机器人的长度。(D) 负载能力分析。我们设定物体直径为 d 并逐步增加重量，直至机器人无法包裹超过其周长的1/2（判定为抓取失败）。在此临界状态下，驱动力矩(F)与物体重量(Mg)达到扭矩平衡，由此确定最大负载能力的理论上限。



图S5. 螺旋机器人的仿真。(A) 仿真中的1缆、2缆和3缆SpiRobs图像。前两者采用一系列连接单元的1自由度旋转关节建模，后者则使用3自由度球关节（如(B)所示）。关节的旋转限制设定为离散化的步长（这对应于两个相邻单元相互接触）。当所有关节达到极限时，机器人完全盘绕成对数螺旋形态。(C) 1缆机器人卷曲的仿真（首图）与演示（次图）。在此场景中，单根缆绳的驱动力(F_1)逐步增大直至完成盘绕。(D) 图像序列展示了仿真中抓取策略的有效性。(E) 图像序列呈现了3缆SpiRob在不同构型下的三维形变效果。

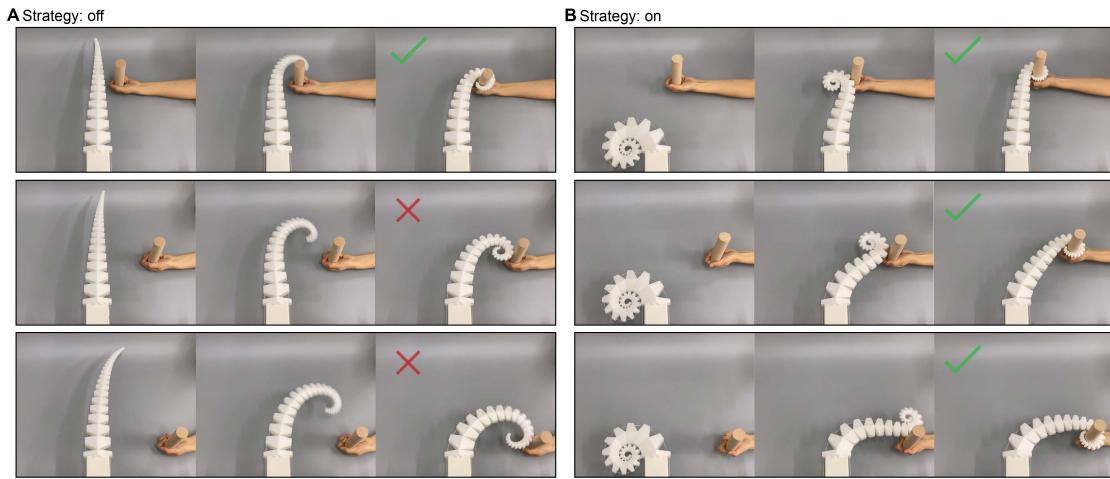
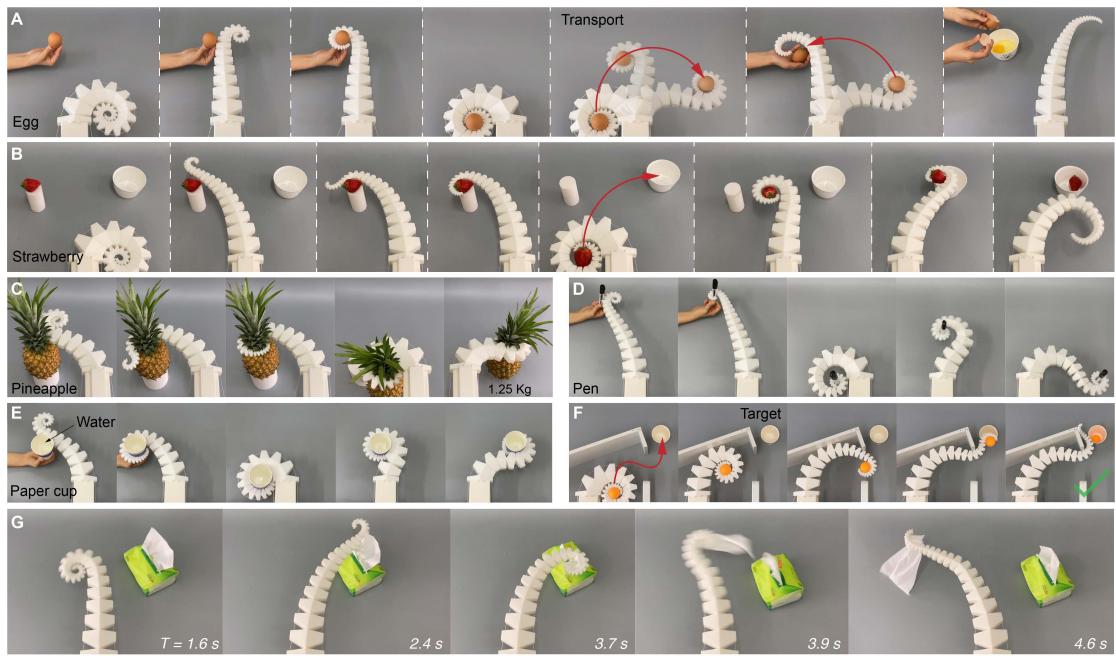


图 S6. 仿生抓取策略。(A)(B) 验证其有效性 (策略: 开启) 与直接抓取尝试 (策略: 关闭) 的对比实验。当未采用该策略时, 机器人的抓取范围受到显著限制 ((A)中第二、第三次尝试失败)。而运用仿生策略(B)后, 机器人能向不同方向伸展, 并沿物体表面攀爬以环绕并抓取目标。



图S7. SpiRobs抓取与运输各类物体。(A)-(E) 展示了一个2线缆SpiRob递送生鸡蛋、草莓、菠萝、钢笔及盛水纸杯的图像序列。(F) 机器人沿S形轨迹穿越门廊，将乒乓球运送至目标位置。(G) Spi Rob从桌面放置的盒子中抽取纸巾。

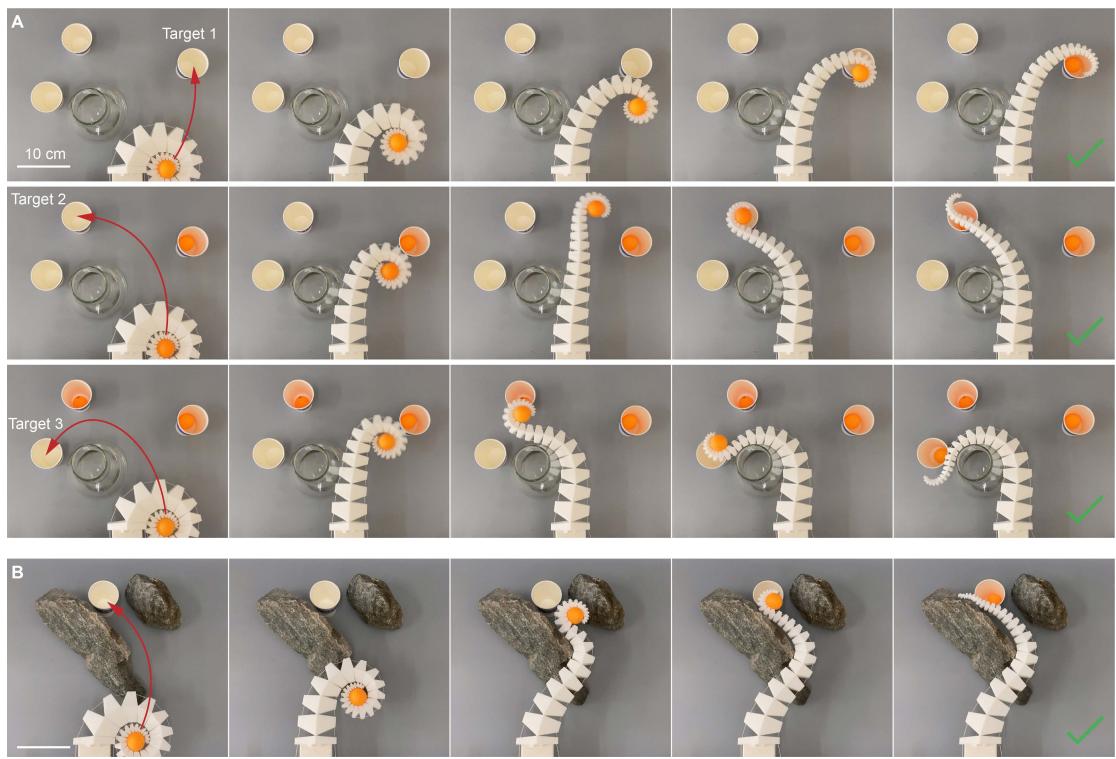
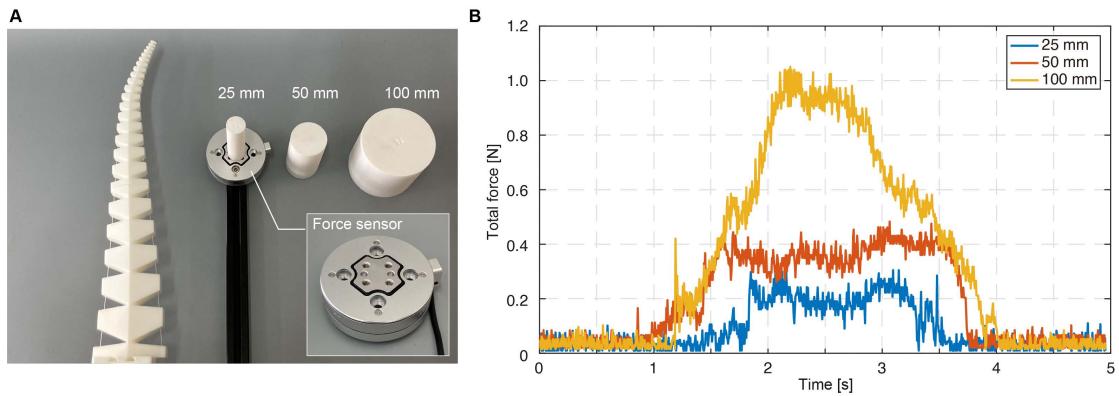
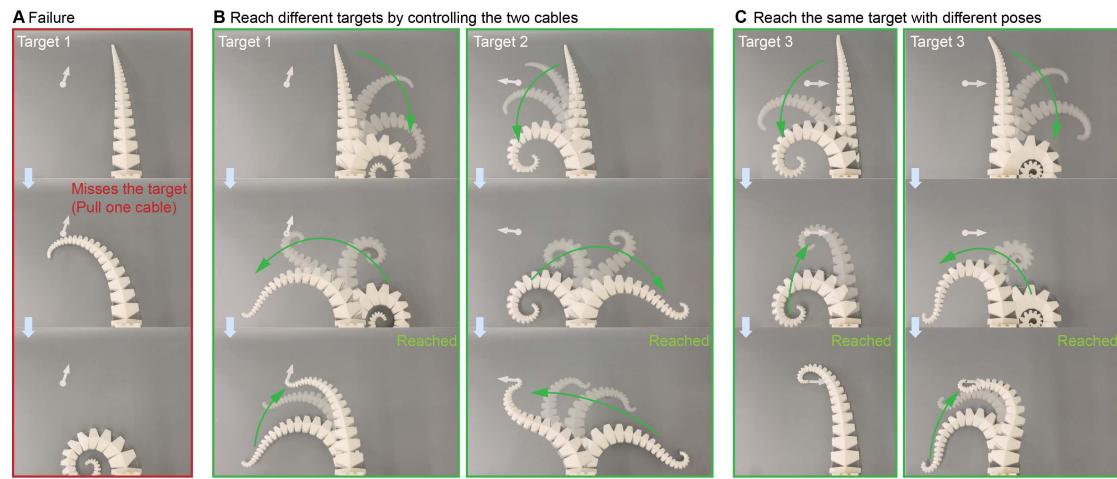


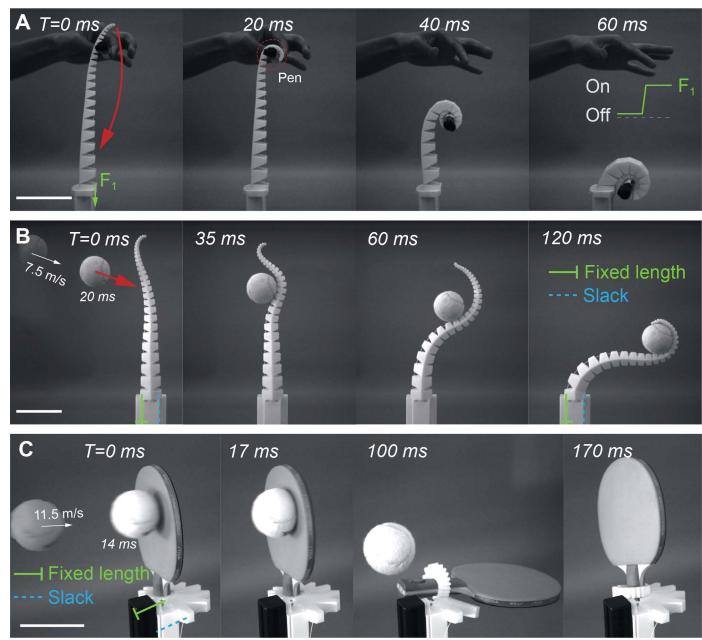
图 S8. 受限空间中的操控。(A) 机器人绕玻璃瓶移动，将乒乓球运送至不同目标的图像序列。(B) 机器人在粗糙石头表面攀爬，并穿行于两块石头之间，最终将球投入杯中。这些实验通过手动操作两根缆线完成。



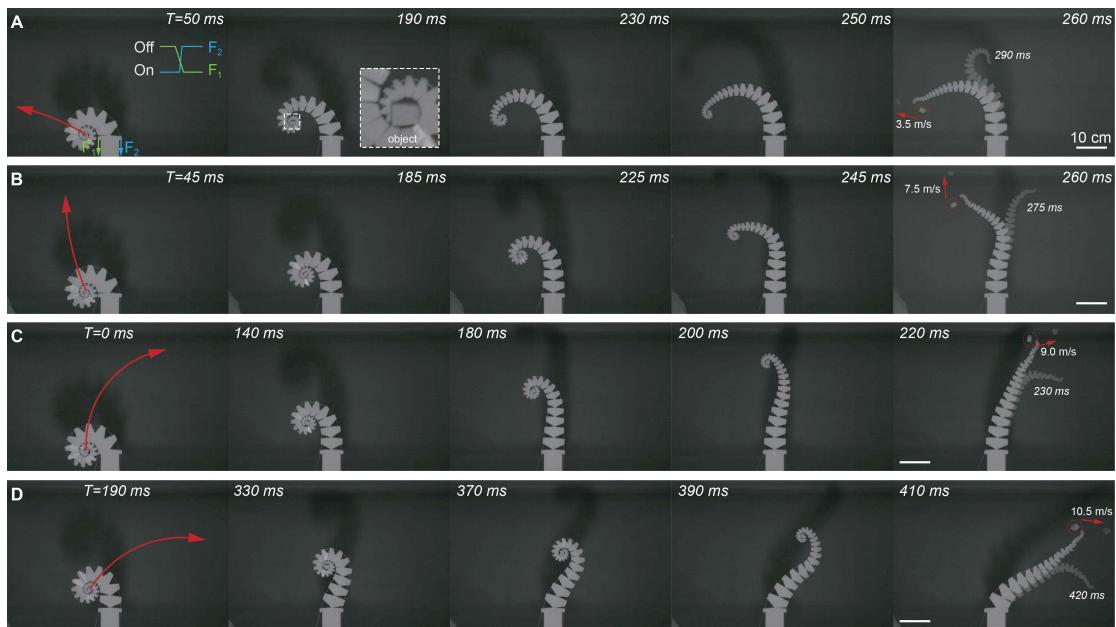
图S9. 接触力。(A) 机器人攀爬物体表面时的接触力测量实验装置。不同直径的物体被放置在力传感器上(M4313A, SRI Inc.)。(B) 随时间变化的实测力值。实验结果证实缠绕过程会对物体施加作用力，但该力值保持较低水平（且对小物体更小）。



图S10. 尖端可控性。(A)当仅拉动一根电缆时，整个机器人身体会发生卷曲，几乎无法精确控制尖端到达目标位置（目标位置和方向用白色实心点和箭头表示）。(B)通过同时控制两根电缆，可以到达不同的目标位置。(C)同一目标可通过多种姿态实现。



图S11. 动态抓取。(A) 机器人在0.06秒内抓取一支笔并将其移至基座。右上角显示了驱动模式，其中“On”表示缆绳绷紧，“Off”表示缆绳松弛。(B) 被动抓取。机器人能在无任何控制的情况下于120毫秒内抓取高速移动物体（左侧缆绳固定以保持恒定长度，右侧缆绳松弛）。(C) 机器人实现了对乒乓球拍的稳固抓取，并通过高速投掷网球进行演示。(A)-(C)中的比例尺代表10厘米。



图S12. 大象抛掷。(A)-(D) 机器人朝不同方向抛掷橡胶块的图像序列。机器人从包裹物体的初始状态出发，通过展开动作将其抛出。由于运动中产生的旋转，物体以自旋状态飞出。从上至下可观察到，机器人与物体共同移动的距离越长，物体获得的速度越高，最高释放速度超过10米/秒(D)。通过控制两根缆绳的增力/减力速率，可实现不同抛射方向的调控。

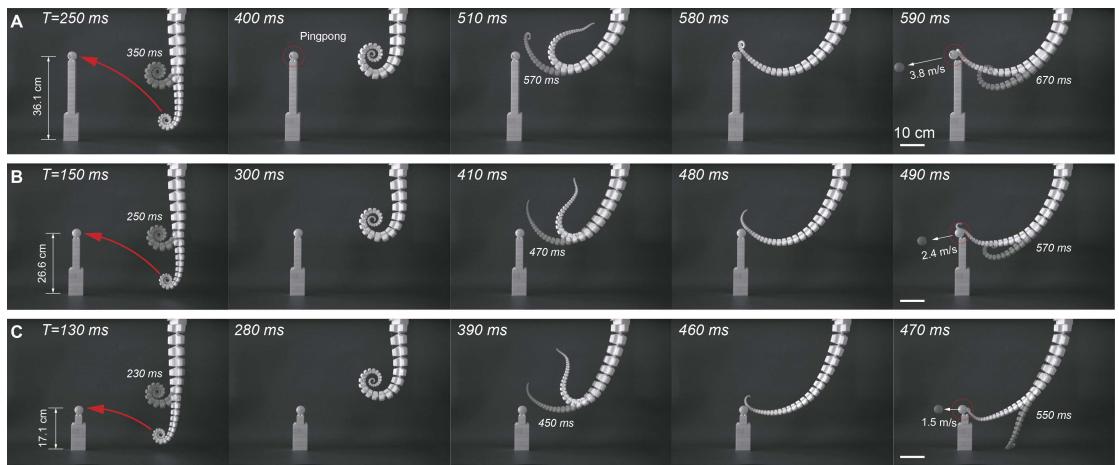
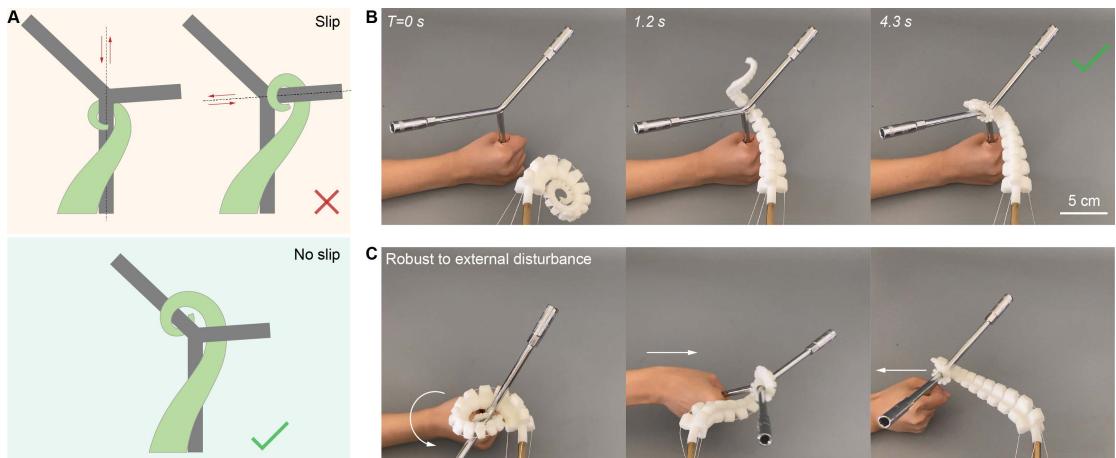
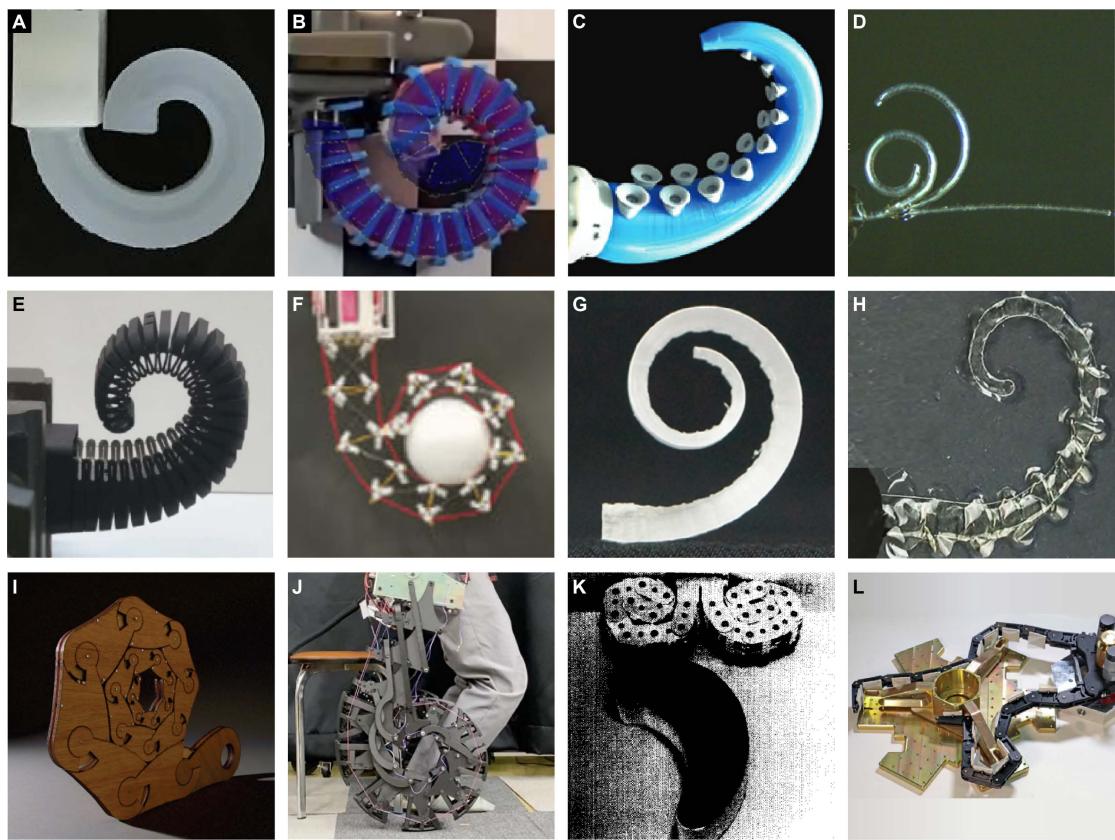


图 S13. 鞭打动作。(A)-(C) 机器人首先在拉动两根缆绳时蜷缩身体，随后释放累积的弹性势能产生鞭打动作，用以扑击位于可变高度的乒乓球。



图S14. 防滑抓取。(A) 树叉形物体的防滑抓取策略示意图。(B) 3线SpiRob实施该策略抓取六角扳手的图像序列。(C) 展示在外力作用下抓握鲁棒性的图像。



图S15. 文献中的螺旋形设计。(A)-(D) 气动驱动机械臂：前两者通过螺旋形模具铸造[S3,S4]，后两者在加压时产生螺旋弯曲[S5,S6]。(E)和(F) 线缆驱动机械臂[S7,S8]。(G) 热驱动卷须状夹持器[S9]。 (H) 卷曲型HASEL机械臂[S10]。(I)-(L) 刚性连杆螺旋结构设计：前两组复现了螺旋卷曲运动[S11,S12]，后两组展示机械臂通过表面展开缠绕物体[S13,S14]。

补充参考文献

[S1] 江, H., 王, Z., 金, Y., 陈, X., 李, P., 甘, Y., 林, S., 与 陈, X. (2021). 面向非结构化交互的软体机械臂分层控制. 国际机器人研究杂志. *40*, 411–434. <https://doi.org/10.1177/0278364920979367>. [S2] Coevoet, E., Escand e, A., 与 Duriez, C. (2017). 基于优化的软体机器人逆模型

带接触处理。《IEEE机器人与自动化快报》*2*, 1413–1419. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2669367>。[S3] 张震、王晓东、孟德远、梁斌（2021）。仿生螺旋软体气动执行器及其特性表征。《仿生工程学报》*18*, 1101–1116。 <https://doi.org/10.1007/s42235-021-00075-y>。[S4] Zournatzis, I., Kalaitzakis, S., Polygerinos, P. (2023)。SoftER: 用于分拣应用的螺旋软体弹射机器人。《IEEE机器人与自动化快报》*8*, 7098–7105。 <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3315206>。[S5] 谢震、Domel, A.G.、安楠等（2020）。受章鱼臂启发的锥形软体执行器带吸盘以增强抓取能力。《软体机器人》*7*, 639–648。 <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0082>。[S6] Paek, J., Cho, I., Kim, J. (2015)。基于形状工程弹性微管的螺旋弯曲微型触手机器人。《科学报告》*5*, 10768。 <https://doi.org/10.1038/srep10768>。[S7] Taylor, I.H., Bawa, M., Rodriguez, A. (2023)。通过尺度不变设计实现强力包络抓取的触觉混合刚性-软体连续体机械臂。载于《IEEE机器人与自动化国际会议 (ICRA)》, pp. 10331–10337. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10161121>。[S8] 张杰、胡阳等（2022）。海马尾式多功能仿生可编程连续体机器人实现贴合抓取。《先进智能系统》, 2200263. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200263>。[S9] 王伟、李超等（2018）。受卷须启发的软体夹持器：可编程聚合物-纸双层复合材料的形变。《ACS应用材料与界面》*10*, 10419–10427. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18079>。[S10] Mitchell, S.K.等（2019）。简易工具包实现高性能HASEL执行器用于无缆软体机器人。《先进科学》*6*, 1900178. <https://doi.org/10.1002/advs.201900178>。[S11] Henrich, A. (2021)。John Edmark: 运动中的艺术。《数学杂志》*94*, 65–68. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2021.1843890>。[S12] Sugiura, S.等（2023）。高强度柔性体重支撑机构。《机器人力学杂志》*10*, 16. <https://doi.org/10.1186/s40648-023-00255-x>。[S13] Hirose, S., Umetani, Y. (1978)。通用机器人手的软体夹持器开发。《机构与机器理论》*13*, 351–359. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(78\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0094-114X(78)90059-9)。[S14] Glick, P.E.等（2020）。高度欠驱动夹持器对未知物体的鲁棒抓取。载于《IEEE机器人与自动化国际会议 (ICRA)》, pp. 3996–4002. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197100>。