新型变刚度串联弹性执行器的设计与控制

Emre Sariyildiz，高级会员，电气与电子工程师协会，Rahim Mutlu，会员，电气与电子工程师协会，Jon Roberts，Chin-Hsing Kuo，Barkan Ugurlu，会员，电气与电子工程师协会

摘要—本文阐述了一种新型变刚度串联弹性执行器（VSSEA）的设计与控制。该执行器采用模块化机械设计方法构建，可有效优化执行器的刚度调节特性和功率密度。所提出的 VSSEA 具有以下特点：i）输出连杆的工作范围不受限制；ii）刚度调节范围宽广（**~20**Nm/rad 至**~1**KNm/rad）；iii）在平衡位置和非平衡位置进行低能耗刚度调节；iv）结构紧凑，转矩密度高（**~36** Nm/kg）；v）刚度调节速度快（**~3000**Nm/rad/s）。这些特点有助于提升许多先进机器人系统的安全性和性能，例如与非结构化环境进行物理交互的协作机器人，以及为人类用户提供物理辅助的外骨骼。这些特点还使我们能够利用变刚度特性，仅通过采用传统控制器即可完成各种调节和轨迹跟踪控制任务，无需在柔顺驱动中综合复杂的运动控制系统。为此，实验验证了所提出的 VSSEA 能够通过采用传统的比例 - 积分 - 微分（ PID ）控制器，精确跟踪期望的位置和力控制参考信号。

索引词— 柔顺机器人学、安全机器人学、串联弹性执行器、变刚度执行器、机器人与环境的物理交互。

I. 引言

为提高机器人与环境物理交互的安全性，柔顺执行器已被广泛应用于许多不同的先进机器人系统，如人形机器人、协作机器人、四足机器人和外骨骼 [1–5]。只需将弹性元件集成到执行器的设计中，即可开发柔顺驱动系统 [5]。例如，串联弹性执行器（SEAs）是机器人学中最流行的柔顺驱动系统之一，其通过在传统刚性执行器与连杆之间放置弹簧而构成[6–8]。除提高安全性外，刚性执行器与连杆之间的弹簧还可带来诸多益处，例如低成本、高保真度的力控制、机械能存储、更低的折算惯量、更高的冲击载荷耐受性以及更高的输出功率 [8]。

稿件收到……（通讯作者：Emre Sariyildiz）。E. Sariyildiz、J. Roberts 和 C.-H. Kuo 就职于澳大利亚新南威尔士州伍伦贡 2522 的伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院。（电子邮箱：emre@uow.edu.au、robertsj@uow.edu.au、chkuo@uow.edu.au）。R. Mutlu 就职于阿拉伯联合酋长国迪拜的伍伦贡大学迪拜校区工程与信息科学学院，以及 Intelligent Robotics & Autonomous Systems Co (iR@SC)，澳大利亚新南威尔士州 2529。（电子邮箱：ramutlu@irasc.com.au）。B. Ugurlu 任职于土耳其伊斯坦布尔 34794 厄兹耶金大学机械工程系。（电子邮箱：barkan.ugurlu@ozyegin.edu.tr）。

尽管具有上述益处，集成到柔顺执行器中的弹性元件也会在运动控制方面带来一些挑战和根本性限制 [9]。例如，众所周知，柔顺执行器的位置控制问题比传统刚性执行器的更为复杂 [10–14]。为了抑制柔顺执行器连杆的振动和扰动，研究人员通常需要采用先进的运动控制器 [14]。另一个例子是，尽管使用较柔软的弹性元件能够提高安全性和透明性，但柔顺执行器的固有频率会降低。这不仅会激发连杆侧的振动，还会降低执行器的带宽，从而限制运动控制应用中可实现的位置控制和力控制性能 [13, 14]。因此，必须根据目标控制任务恰当地选择柔顺执行器弹性元件的刚度[15]。然而，对于采用固定弹性元件的柔顺执行器而言，这通常并不切实际，且往往会导致安全性与性能之间的折中 [10, 16]。针对这一根本性问题，一种简单而高效的解决方案是将具有可变刚度特性的柔顺机械部件以串联或并联方式集成到执行器中[17, 18]。

为了满足运动控制任务中不同的柔顺性需求，例如人机交互中的柔性驱动和轨迹跟踪中的刚性驱动，人们开发了能够通过机械方式改变执行器刚度的可调柔顺机构。尽管目前尚无统一的术语，但文献中通常将此类执行器称为变刚度执行器（VSAs）。关于变刚度执行器设计的全面综述可参见 [18, 19]。其中，拮抗驱动是变刚度执行器中最著名且应用最广泛的刚度调节方法之一。受哺乳动物解剖结构启发，这种驱动方法自20世纪80年代初以来便得到研究 [20], , 自20世纪90年代末以来，人们已开发出不同的拮抗执行器，并将其应用于各种机器人应用，例如腿式运动和上肢康复 [21, 22]。最简单的拮抗执行器可以采用主动-拮抗配置设计，通过两个非线性弹簧将两个电机连接到一根连杆上，其结构类似于人类手臂中的肱二头肌和肱三头肌 [19, 23]。通过使两个电机沿相同方向旋转，可以调节平衡位置；而电机的反向旋转则会改变

通过改变弹簧预紧力来调节执行器的刚度。尽管这种仿生驱动方法简单，但在实际应用中仍存在若干缺点，例如：i）刚度调节与平衡位置的控制问题相互耦合；ii）执行器的输出转矩受每个电机最大转矩的限制；iii）非线性弹簧的势能容量无法得到充分利用；以及 iv）能耗较高，因为调节刚度时对非线性弹簧进行预紧需要持续消耗功率，即使执行器在平衡位置不做净机械功也是如此 [24, 25]。

在过去二十年中，人们提出了许多不同的拮抗式和非拮抗式变刚度执行器，以应对主动-拮抗驱动配置的缺点 [18, 19]。例如，虽然在 [26]，中通过双向配置提高了拮抗执行器的输出转矩，但在 [27] 中利用准拮抗驱动机构实现了部分解耦的运动控制问题。然而，使用拮抗驱动系统仍无法完全解决上述问题 [18, 19]。这促使许多研究人员开始构建非拮抗式变刚度执行器。在 Maccepa 中，通过一种新的机械设计方法，将执行器输出连杆的平衡位置与柔顺性控制问题解耦 [28]。通过控制线性弹簧的张力来调节执行器的刚度。在 DLR-VSJ 中也采用了类似的刚度调节方法，并且仅通过改变关节的凸轮盘，在 [29] 中设计出了一种轻量且紧凑的变刚度执行器。然而，与拮抗执行器类似，在这些非拮抗式变刚度执行器设计方法中，高能耗的刚度调节仍然是一个具有挑战性的问题。由于 Maccepa 和 DLR-VSJ 的刚度通过弹簧预张紧进行调节，因此它们在平衡位置需要持续耗电，从而导致较高的能耗 [28 – 30]。在过去十年中，人们通过不同的变刚度执行器设计方法改善了刚度调节的能量成本。在 AWAS 中，通过改变杠杆臂上弹簧和枢轴点的位置来调节输出连杆的刚度 [31, 32]。采用这种变刚度执行器设计方法可以实现低能耗的刚度调节（例如，在平衡位置理论上实现零功耗）。然而，刚度范围受到执行器尺寸的限制 [31, 33]。在 vsaUT 中，通过控制杠杆臂的有效长度来调节执行器的刚度

[34, 35]。

这种刚度调节方法不仅能够在平衡位置实现零功耗，还能利用紧凑型执行器实现无限范围的刚度调节。然而，随着执行器刚度趋于无穷大，用于刚度调节的电机功耗变得无界 [33, 34]。变长度片簧机构也被用于开发能量高效的变刚度执行器 [30, 36 – 39]。与其他拮抗式和非拮抗式变刚度执行器相比，近期研究表明，变长度片簧机构在实践中能够提供多项优势，例如，在平衡位置实现零功耗、快速且无限范围的刚度调节，以及在平衡和非平衡位置的所有刚度范围内实现有界功耗 [30, 33]。如 [30, 38] 所示，这些特性在生物医学工程应用中可能非常有用。然而，在构建可集成到不同机器人系统（如协作机器人）中的紧凑型变刚度执行器时，变长度片簧机构可能存在若干缺点，例如较低的转矩/功率密度和工作空间限制 [30, 36 – 39]。

值得注意的是，采用离散刚度调节方法可以简单地构建非拮抗式变刚度执行器，其中多个弹簧可以串联或并联集成到执行器中 [40 – 42]。这种驱动方法的主要缺点是刚度范围有限，而刚度范围取决于执行器设计中所采用的弹簧数量。此外，离散刚度调节方法给控制器分析与综合带来了若干挑战，例如切换系统的稳定性问题 [40, 42]。因此，本文主要考虑连续刚度调节方法。

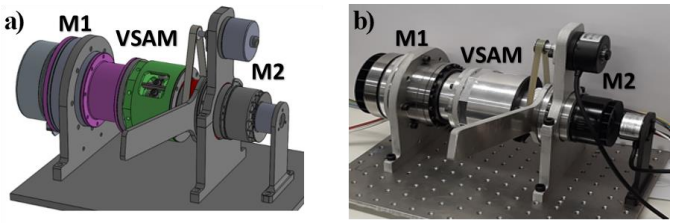
现有的变刚度执行器各有优缺点。虽然它们在各自的应用领域中具有很高的功能性，但在实际应用中，可能无法满足理想柔顺执行器所需的全部技术规格：i）紧凑且简单的机械设计，使变刚度执行器能够针对不同应用进行便捷重构；ii）运动范围不受限制；iii）宽范围的刚度调节；iv）刚度快速变化；以及 v）高能效驱动 [30]。一般而言，研究人员会进行权衡，仅针对上述少数特性进行优化，从而产生不同的折衷，例如较高的能耗或机器人应用中有限的运动控制性能。因此，尽管近年来取得了许多进展，仍应投入更多努力来开发变刚度执行器 [18, 19 和 30]。文献中现有变刚度执行器的实例在表一中对此进行了总结。

为此，本文提出一种新型 VSSEA，由三个主要部分组成：i）独立控制平衡位置的刚性执行器；ii）一种新颖的变刚度驱动机构（VSAM）；以及 iii）独立调节刚度的直接驱动电机。所提出的 VSSEA

表一：执行器、偏转范围、M　　运动范围、刚度范围、平衡状态下固定刚度的能量成本、无限范围刚度调　　s
节、转矩密度和刚度　　调制速度。

执行器	偏转范围 [度]	运动范围 [度]	刚度范围 [牛米/弧度]	能量成本在平衡位置	能量成本无限范围刚度调节	转矩密度 [Nm/kg]	刚度调节速度 [Nm/rad/s]
VSSEA	±25	无限制	20 – 1000 b)	ZEC	BEC	35.72	3000
Maccepa	±60	±90 c)	5 – 110	NZEC	NA	20.83	40
DLR-VSJ	±15	±180	50 – 820	NZEC	NA	22.27	2350
AWAS	±12	±120	30 – 1500	ZEC	NA	31.1	420
AWAS-II	±18	±150	10 – 10000	ZEC	NA	9.76	4000
vsaUT-II	±45	±180a)	0.5N – 100	ZEC	NBEC	8.7	1000
VSA-I [36]	±12	NA	250 – 3000 b)	ZEC	BEC	6.1	NA
VSA-II [30]	±75	±75	10 – 8000 b)	ZEC	BEC	被动式（3kg）	10000

除非参考文献中提供了数据，否则表一采用论文中给出的实验结果编制。a) 尽管 vsaUT 的运动范围有限（例如，vsaUT-II 的运动范围为 ±180°），mvsaUT 可以不受运动范围限制地连续运动 [46]。b) 基于片簧的变刚度执行器可实现无限范围刚度调节。c)[28] 指出，Maccepa 的运动范围可以扩大。ZEC：零能耗；NZEC：非零能耗；BEC：进行无限范围刚度调节时能耗有界；NBEC：进行无限范围刚度调节时能耗无界；NA：不适用，因为这些执行器无法提供无限范围的刚度调节。



a) CAD模型。b) VSSEA 的首个原型。图1：新型 VSSEA 的 CAD模型及首个原型。M1：电机1，M2：电机2，VSAM：变刚度驱动机构。

只需将 VSAM 集成到刚性执行器中即可轻松构建。该模块化设计方法使我们能够针对不同的机器人应用，轻松优化 VSSEA 的刚度调节特性和输出功率/转矩。执行器的刚度通过直接驱动电机改变 VSAM 中一组板簧的有效长度来调节。这种刚度调节技术具有多项优势：i）刚度调节范围大，理论上可从接近零刚度调至无限大刚度；ii）使用相对较慢的电机实现高速刚度调节；iii）在平衡位置保持或改变刚度时能耗为零或接近零，而在非平衡位置进行刚度调节的能耗较低。此外，所提出的 VSSEA 不受运动范围限制。据我们所知，现有的变刚度执行器尚未兼具所提出的 VSSEA 的所有这些理想特性 [30]。

本文其余部分的组织结构如下。第II节介绍VSSEA的机械设计。第III节通过质量-弹簧-阻尼器系统的类比和欧拉-伯努利梁理论，推导执行器的动力学模型。第IV节通过实验验证VSSEA的性能。最后，在第V节和第VI节分别给出讨论和结论。

II. 机械设计

A. 变刚度串联弹性执行器：

图1展示了VSSEA的CAD模型和首个原型。它包括：i）传统刚性执行器，其中包含伺服电机和齿轮箱，在图中以M1表示；ii）新型变刚度驱动机构，以VSAM表示；以及ii）图中以M2表示的直接驱动伺服电机。

采用传统刚性执行器 M1 独立控制输出连杆的平衡位置。所提出的模块化设计方法使我们能够自由调整 VSSEA 的输出转矩和输出速度。例如，在该执行器的首个原型中，我们使用 Maxon EC90 扁平电机和减速比为 1:100 的谐波传动，实现了 ~100Nm 的输出转矩和 ~π/2rad/s 的输出速度。通过采用不同的伺服电机和/或在传统刚性执行器 M1 的设计中采用齿轮箱，可以直接调整 VSSEA 的输出功率。

第二电机M2用于通过VSAM独立控制执行器的刚度。VSAM具有低能耗刚度调节功能，相关内容将在第III节中介绍；该功能使我们能够在执行器的刚度控制中采用Maxon EC60直接驱动扁平电机。

如图1所示，所提出的VSSEA通过将VSAM集成到传统刚性执行器M1中而进行了简洁设计。这种模块化设计方法为针对不同机器人应用构建VSA提供了极大的灵活性。下面介绍新型VSAM的机械设计，该设计在柔顺驱动中具备诸多重要特性，例如宽范围的刚度调节和能量效率。

B. 变刚度驱动机构 :

图2展示了VSAM的CAD模型和首个原型。该设计包括：i）八个沿径向分布的并联板簧；ii）每个板簧配备两个滚轮，以减少摩擦并提高能量效率；iii）一个滚珠丝杠机构，用于沿板簧移动滚轮，如图所示。

执行器的刚度通过改变滚轮的位置进行调节，而滚轮的位置由第二电机M2驱动的滚珠丝杠机构控制。当滚轮位于板簧的自由端时，VSSEA处于最柔软模式；随着滚轮向固定端移动，执行器的刚度逐渐增加。借助VSAM的非线性动态行为，只需通过滚轮的位置控制改变板簧的有效长度，即可实现宽范围的刚度调节。这使我们能够在短时间内实现大幅度的刚度调节，并且这

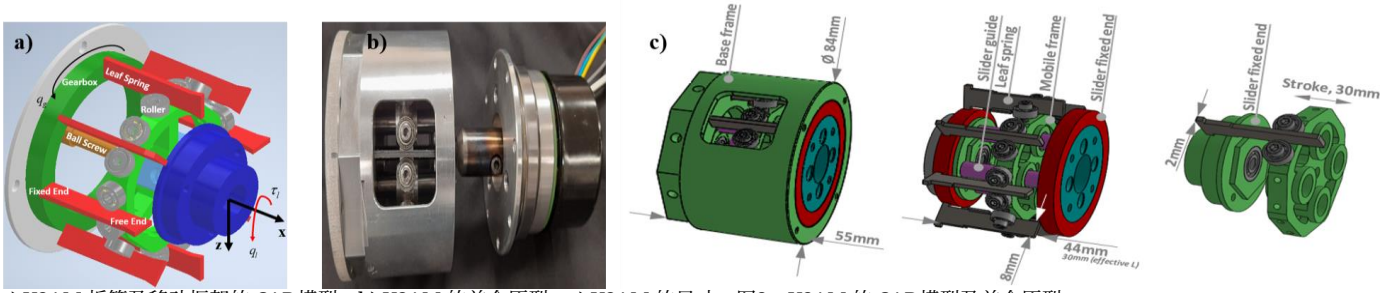
这一特性可为机器人应用带来多项益处 [27]。所提出的 VSSEA 的另一项重要特性是低能耗刚度调节。例如，VSAM 无需持续消耗功率，即可在平衡位置保持刚度恒定。

III. 动力学模型

VSSEA 的动力学模型通过采用质量-弹簧-阻尼器系统的类比以及欧拉-伯努利梁理论建立。

A. 变刚度串联弹性执行器：

VSSEA 的动力学模型如图 3 所示。在该图中， 表示电机1、齿轮箱、电机2和输出连杆的转动惯量，其中 分别为 *m1*、*g*、*m2* 和 *l*；、 和 同样分别表示电机1、齿轮箱、电机2的转矩、黏性摩擦系数和角度，以及



a) VSAM 板簧及移动框架的 CAD模型。b) VSAM 的首个原型。c) VSAM 的尺寸。图2：VSAM 的 CAD模型及首个原型。

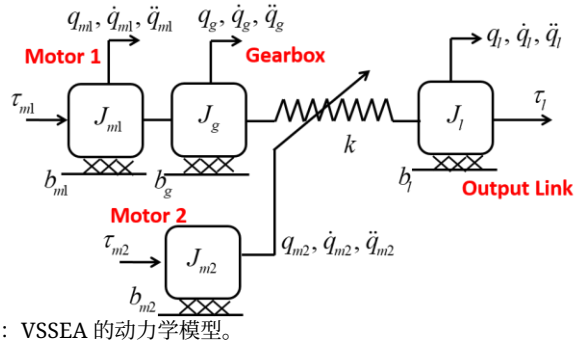


图 3：VSSEA 的动力学模型。

输出连杆，分别；和表示的一阶和二阶导数，即角速度和角加速度，分别；并且表示执行器的刚度，它可以定义为和的非线性函数，如第三节C所示。

如图3所示，第一电机m1用于控制执行器的平衡位置，第二电机m2则用于独立调节输出连杆的刚度。VSSEA的动力学模型可由该图推导如下：

$$\begin{aligned} \tilde{J}_{m1}\ddot{q}_{m1}+\tilde{b}_{m1}\dot{q}_{m1} &= \tau_{m1}-N^{-1}\tau_s-\tau_{m1}^{dis} \\ J_l\ddot{q}_l+b_l\dot{q}_l &= \tau_s-\tau_l-\tau_l^{dis} \\ J_{m2}\ddot{q}_2+b_{m2}\dot{q}_{m2} &= \tau_{m2}-\tau_s^{dis}-\tau_{m2}^{dis} \end{aligned} \tag{1}$$

其中，表示电机1、电机2和输出连杆在分别为*m1*、*m2*和*l*时的未知/未建模扰动；表示VSAM的非线性弹簧对电机1和输出连杆施加的转矩；表示刚度调节过程中VSAM的非线性弹簧对电机2施加的扰动力矩；以及和其中 为传动比。

~ 1 = 1 + −2 毫米 焦耳 焦耳 牛顿 焦耳

~ 1 = 1 + −2 m

式（1）给出了所提出的 VSSEA 的一个简单而实用的动力学模型。然而，我们还需要进一步研究 VSAM 的非线性动力学，即推导和式（1）中的。这将使我们能够解释 VSSEA 的重要特性，例如其能量效率。

B. 变刚度驱动机构：

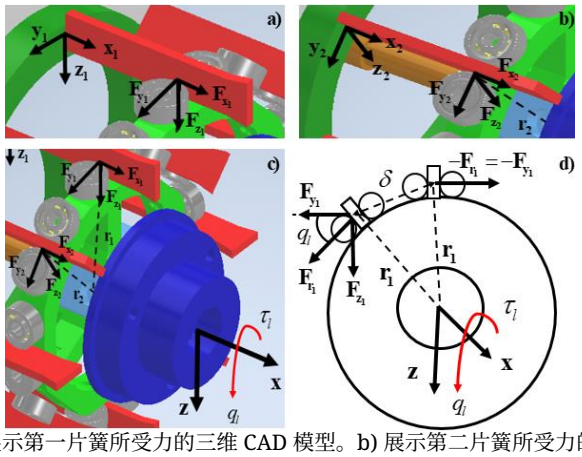
为推导 VSAM 的模型，我们先关注图4a所示的第一片簧。在该图中，、和分别表示板簧沿局部坐标系的、和轴对滚轮施加的力。需要指出的是，所提出的分析同样适用于其他板簧，例如图4b所示的第二片簧。

假设 VSAM 的设计中仅使用第一片簧，则可根据图4c和图4d直接得到输出连杆的运动学与静力平衡方程如下：

$$\delta = 2r\sin\left(q_l/2\right) \tag{2}$$

$$\tau_s-\tau_l = F_{r_1}r-\tau_l = \sqrt{F_{y_1}^2+F_{z_1}^2}\,r-\tau_l = 0 \tag{3}$$

其中 是将角度与……相关联的运动学约束输出连杆相对于板簧的偏转；表示 *r*



a) 展示第一片簧所受力的三维 CAD 模型。b) 展示第二片簧所受力的三维 CAD 模型。c) 展示输出转矩与第一片簧和第二片簧所受力之间关系的三维 CAD 模型。d) 展示第一片簧偏转与输出连杆角度之间关系的二维运动学模型。图 4：变刚度驱动机构模型。

图4c所示距离向量的大小；并且表示力矢量的大小其中可以是r_1, y_1 和z_1，如图4d所示。

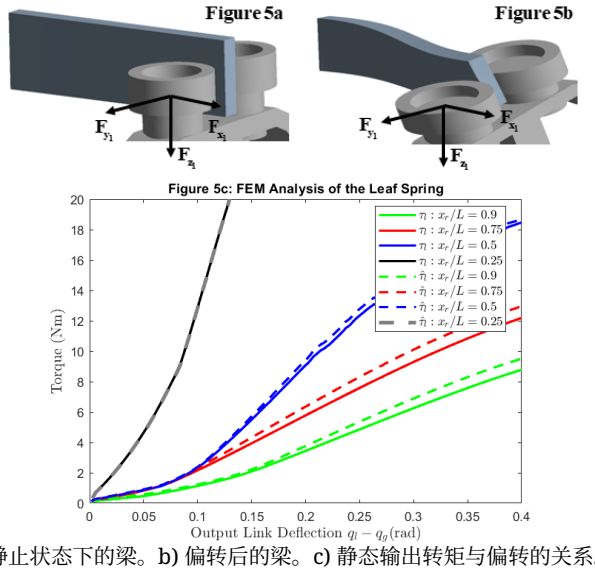
考虑图 2a 所示的其他板簧后，输出连杆的静力平衡方程可通过将公式（3）简单展开而得到，如下所示：

$$\tau_s-\tau_l = \sum_{i=1}^{8}F_{r_i}r-\tau_l = \sum_{i=1}^{8}\sqrt{F_{y_i}^2+F_{z_i}^2}\,r-\tau_l = 0 \tag{4}$$

其中 、和 分别表示 个板簧施加的力，表示距离向量 的大小。公式（4）表明，为获得 VSSEA 的动力学模型，需要确定板簧力。

C. 板簧：

所提出的 VSAM 板簧不仅沿横向轴 y_i 弯曲，还会在非平衡位置 [43]绕纵向轴 x_i 发生轻微转动。为简化起见，图5 所示板簧的三维挠曲模型采用有限元法进行数值求解



a) 静止状态下的梁。b) 偏转后的梁。c) 静态输出转矩与偏转的关系。为输出转矩， 为与相关的输出转矩。图 5：使用有限元法建立的第一片簧三维大挠度模型。

（有限元法）。图 5a 显示了处于平衡位置的有限元法模型，而图 5b 显示了输出连杆旋转约 20° 时板簧的最大偏转。如图所示，最大偏转沿横向轴 $\mathbf{y_1}$ 方向发生。图 5c 展示了在输出连杆偏转增大时，执行器在不同刚度配置下的静态输出转矩。在该图中， 表示

在不同非平衡位置处，与沿横向轴方向的力相关的输出转矩。从图 5c 可以清楚看出，在执行器的偏转范围内，输出转矩主要由沿横向轴方向的弯曲力决定。这使我们能够简化 VSAM 的动力学模型，同时在较大的偏转范围内精确估算输出转矩。

为此，我们考虑图 6 所示的板簧二维偏转模型。在该图中，x_1 和 y_1 分别表示梁上某一点沿 $\mathbf{x_1}$ 轴和 $\mathbf{y_1}$ 轴的位置；分别表示梁在 x_1 处的弧长和斜率；分别表示梁在 $\mathbf{x_1}$ 和 $\mathbf{y_1}$ 轴方向上于 x_1 处的偏转；类似地，分别表示滚轮位于 $\mathbf{x_1}$ 轴上的 x_r 处的偏转；L 表示梁的长度；表示梁在 x_r 处的斜率。

非平衡位置处板簧的模型可根据非线性欧拉-伯努利梁理论和图 6 推导如下。

$$S_{x_1} = \sqrt{\frac{EI}{2F_{y_1}}} \int_0^{\phi_{x_1}} \frac{d\phi}{\sqrt{\sin(\phi_{x_r}) - \sin(\phi)}} \tag{5}$$

$$x_1 = \sqrt{\frac{2EI}{F_{y_1}}} \int_0^{\phi_{x_1}} \frac{\cos(\phi)d\phi}{\sqrt{\sin(\phi_{x_r}) - \sin(\phi)}} \tag{6}$$

$$y_1 = \sqrt{\frac{2EI}{F_{y_1}}} \int_0^{\phi_{x_1}} \frac{\sin(\phi)d\phi}{\sqrt{\sin(\phi_{x_r}) - \sin(\phi)}} \tag{7}$$

其中，E 表示杨氏模量，I 表示梁截面关于中性轴的惯性矩 [44]。其他参数的定义与前文相同。

方程（5 – 7）无法通过解析法求解，因此应采用数值求解方法来计算施加力作用下梁的偏转。这使我们能够计算板簧对滚轮施加的反作用力，这是根据公式（3）计算输出转矩所必需的。例如，可以采用以下步骤计算板簧在 处的偏转：i）使用数值方法（例如非线性射击法或 Adomian 分解

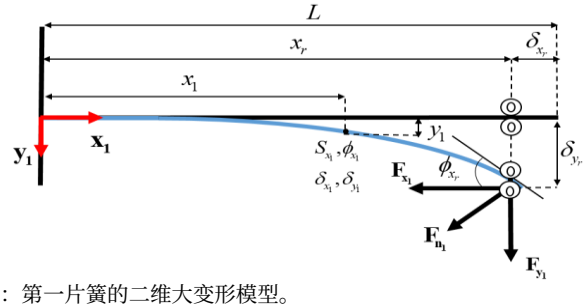


图6：第一片簧的二维大变形模型。

法）或 Matlab 的 fzero 命令，求出公式（5）中的 ；ii）通过对公式（6）和（7）在 [0,] 上进行数值积分，计算 和 。将 和 代入公式（2）和公式（3），即可计算输出连杆的运动学与静力平衡方程。

尽管式（5-7）能够精确估算 VSSEA 在非平衡位置处不同偏转角下的输出转矩，但在解释执行器的输出转矩和刚度如何随 和 变化时却存在不足。此外，它们对于控制器分析和综合也不是很有用。为了解决这一问题，下面我们将获得一个近似模型，以清晰揭示所提出 VSSEA 的刚度调节特性。

当假设板簧的偏转较小时，可根据简化梁理论和式（2–4）计算输出连杆的转矩和刚度，如下所示：

$$\tau_s(q_{m2}, q_l) = \frac{48EI}{\eta^3 q_{m2}^3} r^2 \sin\left(\frac{q_l}{2}\right) \tag{8}$$

$$k(q_{m2}, q_l) = \frac{24EI}{\eta^3 q_{m2}^3} r^2 \cos\left(\frac{q_l}{2}\right) \tag{9}$$

其中 在该式中 表示滚珠丝杠的导程，即 [30, 33, 44]。

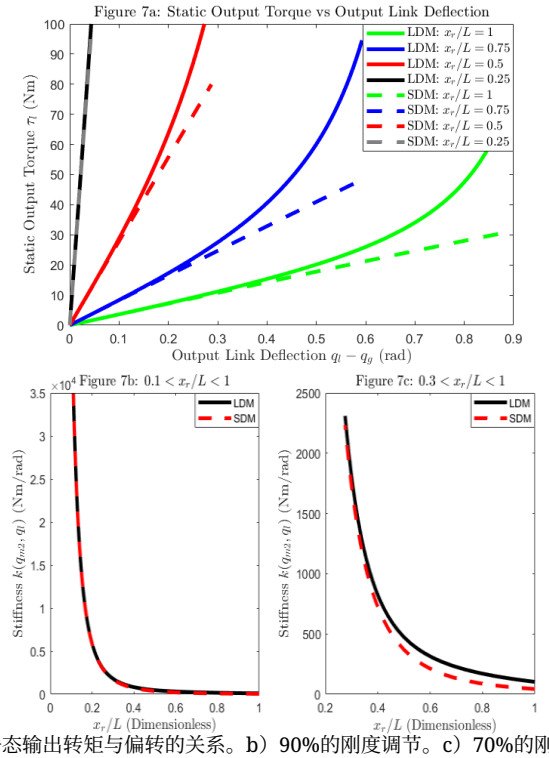
公式 (8) 和 (9) 可用于说明执行器的输出转矩和刚度如何随 q_l 和 q_{m2} 变化。公式 (8) 表明，随着输出连杆角度增大，VSAM 的非线性弹簧施加在输出连杆和电机1上的转矩会增大。这是因为板簧偏转越大，施加在滚轮上的反作用力越大。当执行器的非平衡位置保持不变时，仍可通过第二电机进行调节。公式 (8) 表明，随着减小（增大），VSAM 施加的转矩会

更高（更低）。这是因为 VSAM 的刚度会随第二电机的角度（即滚轮的位置）而变化，如公式（9）所示。VSAM 的非线性行为使我们只需控制第二电机的角度，就能实现大范围的刚度调节。

图7展示了输出连杆在不同非平衡位置处的转矩和刚度。随着输出连杆角度的增大，小偏转模型的精度逐渐降低。这是预期的结果，因为该近似模型是在假设板簧发生小偏转的基础上建立的。尽管存在一些不准确之处，所提出的近似模型对于解释 VSSEA 的重要特性仍然非常有用，因为如图7所示，小偏转模型和大偏转模型表现出相似的行为。然而，应使用公式（5–7）准确估算 VSSEA 的输出转矩。

在平衡位置处，其中，i） 当执行器的刚度保持不变时，即 ，以及 ii），但由于 在 时，摩擦和惯性力较小。因此，在平衡位置处，刚度调节的能耗可以忽略不计。

在非平衡状态下，随着板簧偏转增大，刚度调节的能耗也随之增加



a）静态输出转矩与偏转的关系。b）90%的刚度调节。c）70%的刚度调节。

图7：VSSEA的偏转模型，SDM：小偏转模型。

位置。VSAM 作用于刚度调制电机上的扰动力矩可按如下方式计算：

$$\text{Large Deflection Model: } \tau_s^{dis} = \sum_{i=1}^{8} F_{x_i} r \tag{10}$$

$$\text{Small Deflection Model: } \tau_s^{dis} = \frac{48EI}{\eta^3 q_{m2}^3} r^2 \sin\left(\frac{q_l}{2}\right)\tan(\varphi) \tag{11}$$

where $\varphi = F_y L^2 / 2EI$ [44].

图 8 展示了刚度调制电机的扰动力矩 以及 VSSEA 的静态输出转矩随输出连杆偏转增大时的变化情况。由于当时为零，因此 VSAM 在平衡位置无需消耗能量来保持刚度恒定。当偏转较小时，VSAM 的能耗可以忽略不计，因为无论 如何都非常低。然而，随着输出连杆偏转增大，VSAM 的能耗也会增加。从图 8 可以看出，刚度调制电机的扰动力矩始终受到限制

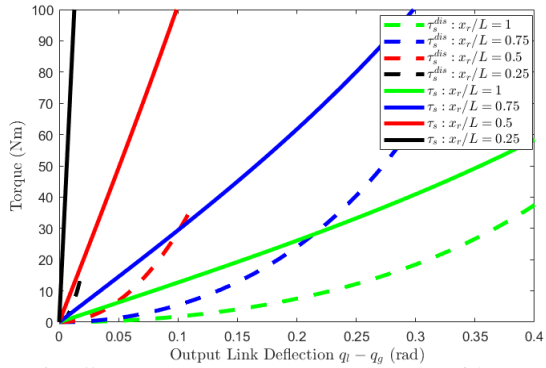


图 8：刚度调节电机的扰动力矩 电机。

在 VSSEA 的工作范围内。采用新颖的机械设计可以进一步抑制这种扰动，例如 [45]。

IV. VSSEA的运动控制

本节讨论 VSSEA 的位置控制和力控制问题。众所周知，柔顺执行器的运动控制问题比传统刚性执行器更复杂，尤其是在位置控制方面 [10]。为了精确跟踪连杆轨迹或与非结构化环境交互，应使用自适应控制器和鲁棒控制器补偿内部和外部扰动 [9 – 15]。本节通过实验表明，所提出的 VSSEA 使我们能够使用传统 PID控制器执行高性能运动控制任务。实验装置采用 ESCON 50/5电机驱动器、电机上的 1000ppr 编码器以及连杆上的 10000ppr 编码器搭建。实验使用运行 Linux 操作系统的个人计算机，以 1ms 的采样时间进行实时运动控制实验。

A. 位置控制：

首先讨论 VSSEA 的位置控制问题。图 9 展示了通过综合 PID 控制器来控制

按如下方式设定第一电机的角度：

$$\tau_m = K_p\left(q_g^{ref} - q_g\right) + K_i\int\left(q_g^{ref} - q_g\right)dt + K_d\left(\dot{q}_g^{ref} - \dot{q}_g\right) \tag{12}$$

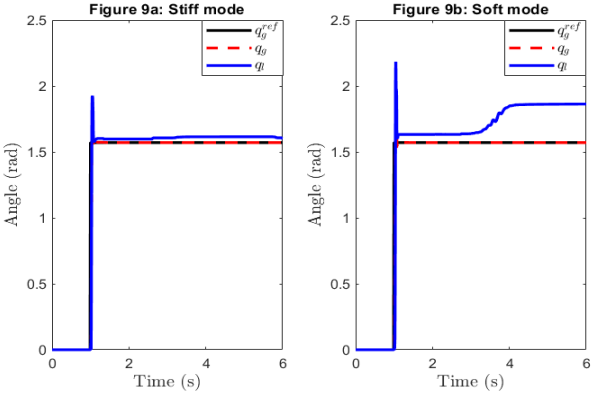
其中 和 分别表示齿轮箱的位置参考值和速度参考值，即 。

当 VSSEA 分别处于柔性模式（21 Nm/rad）和刚性模式（985 Nm/rad）时，在 2 秒后向输出连杆施加了最大为 5 Nm 和 15 Nm 的外部扰动。尽管瞬态响应良好，但连杆侧存在相对较高的超调；同时，执行器的连杆对外部扰动非常敏感，尤其是在执行器处于柔性模式时。这是预期的，因为连杆的角度 未用于位置控制器综合。

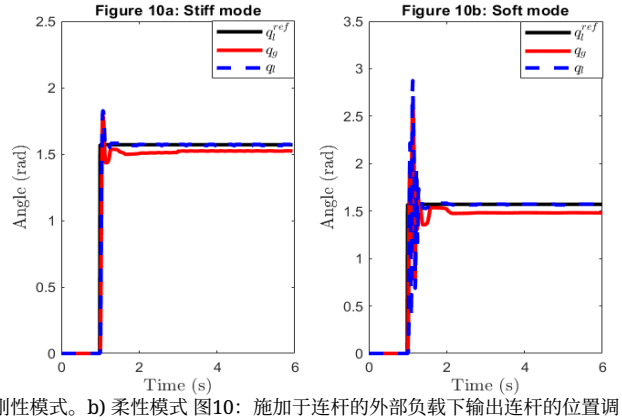
为了提高对外部负载的鲁棒性，我们在反馈控制器综合中使用。该实验中的控制信号设计如下：

$$\tau_m = K_p\left(q_l^{ref} - q_l\right) + K_i\int\left(q_l^{ref} - q_l\right)dt + K_d\left(\dot{q}_l^{ref} - \dot{q}_l\right) \tag{13}$$

其中和分别表示VSSEA的连杆的位置和速度参考值。



a) 刚性模式。b) 柔性模式。图 9：连杆受到外部载荷时电机1的位置调节控制。K_p = 15000，K_d = 500，K_i =75 和。



a) 刚性模式。b) 柔性模式 图10：施加于连杆的外部负载下输出连杆的位置调节控制。$K_p = 5000$，$K_d = 95$，$K_i = 35$，以及。

Externa l disturbances up to 10Nm were s imilarly app lied 然而，当执行器处于刚性模式时，由于执行器在柔性模式下遇到鲁棒稳定性问题，外部扰动只能小于 1 Nm。图10显示，在反馈控制器综合中采用该方法提高了对外部载荷的鲁棒性。然而，当执行器处于柔性模式时，较大的振动显著恶化了瞬态响应性能（见图10b）。此外，由于鲁棒稳定性问题，只能抑制较小的外部扰动。众所周知，柔顺执行器的鲁棒位置控制问题需要采用更高级的控制器 [10]。如图10所示，本文通过改变执行器的刚度，为这一具有挑战性的问题提出了一种简单而有效的解决方案。

在轨迹跟踪控制中使用相同的 PID控制器时，我们获得了类似的结果，如图11所示。由于柔顺系统众所周知的带宽限制，提高参考轨迹的速度会显著降低执行器处于柔性模式时的位置控制性能 [3]。VSSEA无法跟踪 1 Hz 的参考轨迹，如图11b所示。通过提高执行器的刚度，可以轻松改善轨迹跟踪控制性能，如图11c和图11d所示。

B. 力控制：

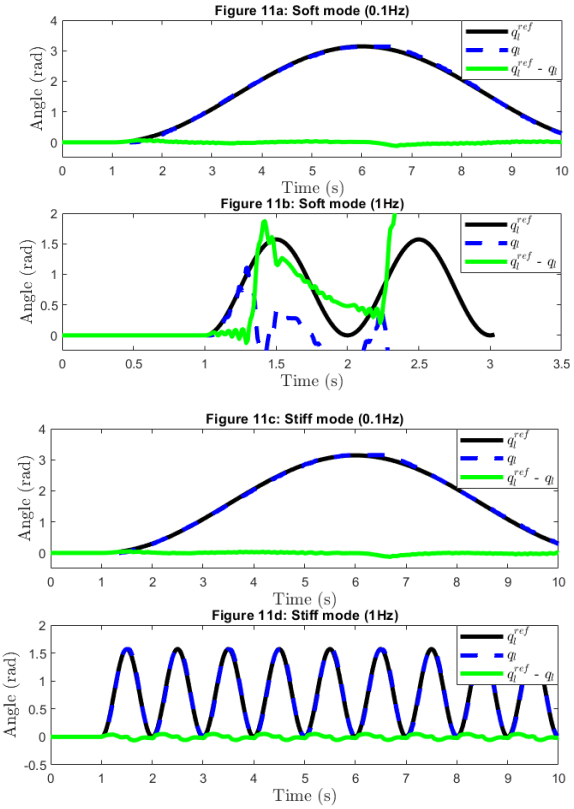
利用胡克定律，可将柔顺执行器的力控制问题描述为位置控制问题，并通过控制非平衡位置处输出连杆的偏转来进行力控制实验。与位置控制实验类似，通过反馈输出连杆的偏转角，综合得到一个简单的PID控制器，即其中和分别为连杆角和齿轮角。

图12展示了VSSEA的力控制实验。力控制信号根据式(14)。

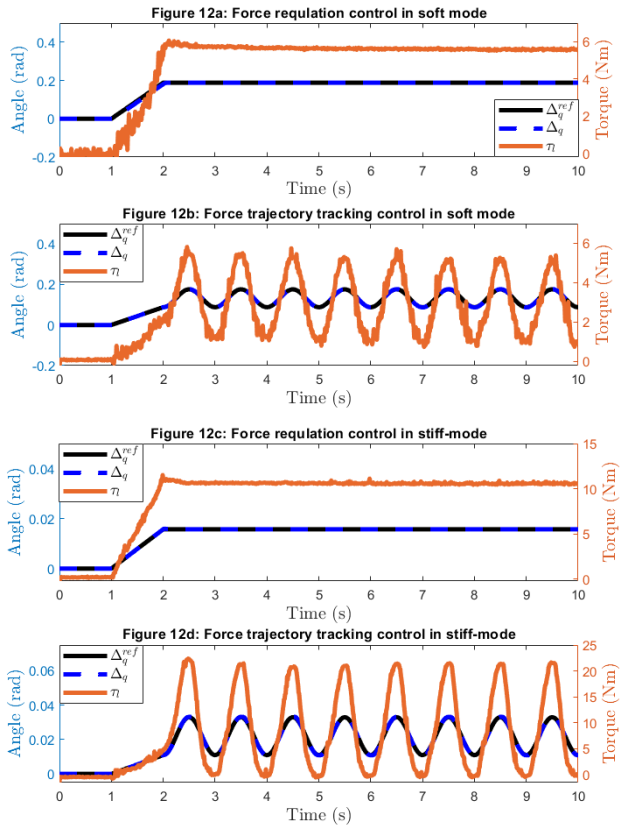
$$\tau_m = K_p\left(\Delta_q^{ref} - \Delta_q\right) + K_i\int\left(\Delta_q^{ref} - \Delta_q\right)dt + K_d\left(\dot{\Delta}_q^{ref} - \dot{\Delta}_q\right) \qquad (14)$$

其中和分别表示连杆偏转的位置和速度参考值，即，。

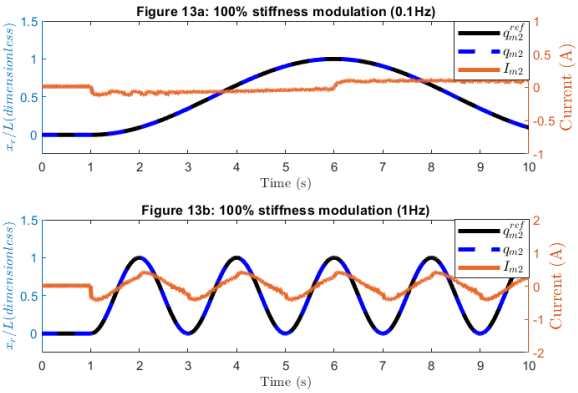
当执行器处于柔性模式时，如图12a和图12b所示，较小的输出转矩会产生相对较大的连杆偏转。这使执行器能够以安全的方式与不同环境进行物理交互。为实现更高的



a) 柔性模式和 = 0 1 = 1 = . Hz b) 柔性模式和 0 1 = 1 Hz. c) 刚性模式和 . Hz. d) 刚性模式和 Hz. 图11：当 K_p =5000，K_d = 95，K_i = 35，且其中是和。



a) 柔性模式下的调节控制 b) 柔性模式下的轨迹跟踪控制 c) 刚性模式下的调节控制 d) 刚性模式下的轨迹跟踪控制。图12：当 K_p = 2500、K_d = 85 和 K_i = 15 时的力控制实验。



a) 0.1 Hz 刚度调节。b) 1 Hz 刚度调节。
图13：平衡位置处的刚度调节。

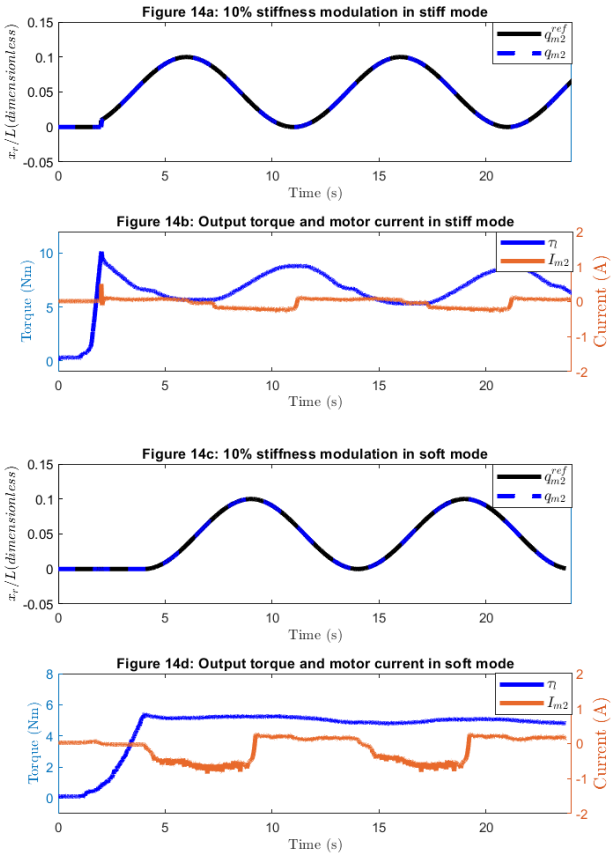
输出转矩，应如图12c和图12d所示提高执行器的刚度。然而，这可能会降低接触运动中的安全性。从图12可以清楚看出，所提出的VSSEA使我们能够使用传统的PID控制器执行高性能力控制应用。

C. 刚度调节：

图13展示了执行器处于平衡位置时，电机2在不同速度下的位置控制实验。如图13所示，在平衡位置保持执行器刚度不变时，电机无需消耗电流，即 VSAM 无需消耗能量。刚度调节速度较低时，例如图13a中的0.1 Hz，电机2的电流可以忽略不计。随着刚度调节速度提高，由于 VSAM 的摩擦和惯性扰动增大，电机消耗的电流也随之增加（见图13b）。这是预期的，因为所有变刚度执行器的能耗都会随着刚度调节速度的提高而增加 [33, 45]。由于 VSAM 的设计减轻了摩擦和惯性扰动，因此如图13所示，在平衡位置进行刚度调节时，电流消耗较低。

图14展示了执行器处于非平衡位置时的刚度调节实验。在调节输出连杆的偏转角时，本实验将执行器的刚度调节了10%。图14a和图14b显示，在VSSEA的刚性模式下进行10%的刚度调节时，电机2的电流I_{m2}较低。这是预期结果，因为如公式（11）所示，刚性模式下板簧的偏转较小，因此VSAM施加到电机2上的扰动转矩也较小。与其他能量高效且具有无限范围的变刚度执行器相比，例如 [34, 35]，，所提出的VSAM具有这一特点，使我们能够使用有界控制信号[33]进行无限范围刚度调节。图14c和图14d显示，在VSSEA的柔性模式下进行10%的刚度调节时，电机2的电流消耗较高。由于柔性模式下输出连杆的偏转角较大，VSAM产生的较大扰动力矩使电机2的电流消耗增加，如公式（11）所示。图13和图14显示，在平衡位置和非平衡位置进行刚度调节时，电机2的控制信号始终有界。

图15展示了执行器处于刚性和柔性模式时进行 10% 刚度调节所需的能量成本，并将其与 VSAM 弹簧中储存的势能进行了比较。结果表明，刚度调节的能量成本



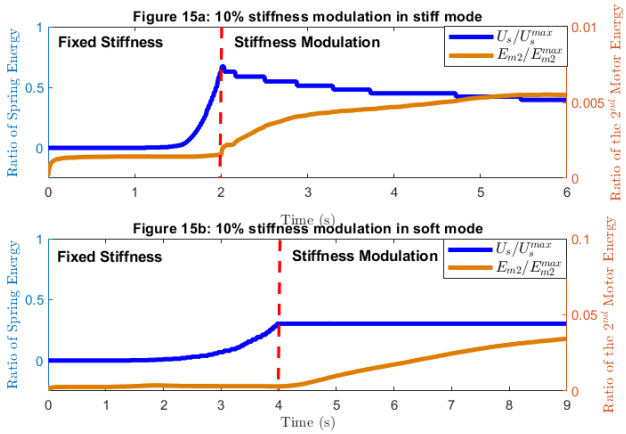
a) 刚性模式下的刚度调节。b) 刚性模式下的输出转矩和电机电流。c) 柔性模式下的刚度调节。d) 柔性模式下的输出转矩和电机电流。

图14：非平衡位置处的刚度调节

与输出连杆的偏转仅弱相关。在刚性和柔性模式下，VSAM 采用固定刚度配置时消耗的能量较少；而改变执行器刚度时，刚度调节的能量成本会增加。如图15b所示，柔性模式下输出连杆偏转较大，因此刚度调节的能量成本更高。这一结果符合预期，因为如公式（11）所示，输出连杆偏转越大，扰动力矩也越大。

V. 讨论

第IV节给出的实验结果表明，



a) 刚性模式下的刚度调节。b) 柔性模式下的刚度调节。图15：VSAM的能耗。

所提出的VSSEA使我们能够利用传统的PID控制器执行高性能的位置控制和力控制应用。这为许多不同的高级机器人应用带来了诸多益处。例如，VSSEA的刚性模式能够使协作机器人在工业中执行高精度位置控制任务，而执行器的柔性模式则可以提高机器人与环境的物理交互安全性。然而，为了在位置控制和力控制任务（即执行器的刚性模式与柔性模式）之间实现平滑过渡，还应综合设计更高级的控制器。此外，还应投入更多精力研究最优刚度调节。

实验结果表明，只需控制第二电机的位置，即可实现大范围的刚度调节。例如，在图9a中，执行器处于柔性模式时，输出连杆的刚度为21 Nm/rad；而在图9b中，刚度达到985 Nm/rad，是前者的~50 倍。这是所提出的VSSEA的一项重要特性，使我们能够使用传统的PID控制器，同时执行精确的位置控制和安全的人机交互任务。VSSEA的其他重要特性包括快速、低能耗的刚度调节能力。如图13所示，从最柔性模式切换到最刚性模式可在一秒内完成。由于VSAM作用于电机2上的扰动力矩始终有界（除非为零），因此在平衡位置和非平衡位置处，均可利用有界控制信号实现大范围的刚度调节，如图13和图14所示。因此，如图15所示，刚度调节的能量成本较低。这一特性可为人形机器人、四足机器人和外骨骼等移动机器人系统带来显著益处。

采用所提出的模块化设计方法，可轻松修改 VSSEA，以满足不同机器人应用的需求。例如，i）使用更高的传动比可提高转矩密度；ii）通过改变板簧的数量、材料和形状，可调节刚度特性；iii）使用导程更大的滚珠丝杠，可实现更快的刚度调节。如图 11a 和 11c 所示，所提出的新型机械设计消除了变刚度执行器的工作范围限制。这使我们能够将 VSSEA 应用于各种机器人场景。

在第三节 [44] 中，通过忽略板簧的微小扭转运动，并采用质量-弹簧-阻尼器系统的类比以及欧拉-伯努利梁理论，得到了 VSSEA 的动力学模型。尽管精确的动力学模型和非线性欧拉-伯努利梁理论在计算上开销很大，且不适用于控制器综合 [43, 44], , 但通过简化梁理论推导的模型在输出连杆偏转较大时并不准确。因此，应投入更多精力，为 VSSEA 建立有效的动力学模型。

VI. 结论

本文提出了一种新型 VSSEA，能够在较大范围内快速、低能耗地进行刚度调节。这些特性可为机器人系统带来诸多益处，例如简化运动控制问题、延长电池寿命，并实现更安全的机器人与物理环境交互。本文通过实验表明，所提出的 VSSEA 可利用传统 PID控制器实现高性能的位置和力控制任务。此外，实验还表明，执行器的刚度可在一秒内提高或降低至多 50 倍，同时刚度调节的能量成本极低。然而，仍需开展进一步研究，以明确 VSSEA 如何为机器人应用带来助益。为此，我们将在未来的研究中将所提出的执行器应用于先进的机器人应用，例如腿式运动。

参考文献

[1] B. Sciliano 和 O. Khatib，《机器人学手册》第57章《物理人机交互安全》，美国纽约州纽约：Springer，第1335-1348页，2008年。[2] N. Paine、J. S. Mehling、J. Holley、N. Radford、G. Johnson、C.-L. Fok 和 L. Sentis，“NASA-JSC Valkyrie人形机器人的执行器控制：用于串联弹性机器人的转矩控制的解耦动力学方法”，《现场机器人学》，第32卷第3期，第378–396页，2015年5月。[3] E. Sariyildiz、G. Chen 和 H. Yu，“一种新型串联弹性执行器的基于加速度的鲁棒运动控制器设计”，《IEEE工业电子学汇刊》，第63卷第3期，第1900-1910页，2016年3月。[4] S. Wolf、O. Eiberger 和 G. Hirzinger，“DLR FSJ：基于能量的变刚度关节设计”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第5082-5089页，2011年。[5] S. Hiasa 等，“带有大腿双关节肌腱复合体的腿式机器人”，IEEE Access，第9卷，第62285-62297页，2021年。[6] G. Pratt 和 M. Williamson，“串联弹性执行器”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第1卷，第399-406页，1995年。[7] E. Dunwoodie 等，“一种用于机器人与物理环境交互的高转矩密度柔顺执行器设计”，《IEEE先进运动控制国际研讨会（AMC）论文集》，第1-6页，2020年。[8] R. V. Ham 等，“柔顺执行器设计”，《IEEE机器人与自动化杂志》，第16卷第3期，第81-94页，2009年9月。[9] B. Ugurlu 等，“基于扭转的串联弹性执行器转矩控制策略的基准测试”，《IEEE机器人与自动化杂志》，doi：10.1109/MRA.2021.3124154。[10] E. Sariyildiz、G. Chen 和 H. Yu，“串联弹性执行器的统一鲁棒运动控制器设计”，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第22卷第5期，第2229-2240页，2017年10月。[11] L. Jinoh、H. Dallali、N. Tsagarakis 和 D. Caldwell，“针对具有多个柔顺关节的COMAN人形机器人的鲁棒无模型连杆位置跟踪控制”，《IEEE-RAS人形机器人国际会议论文集》，第1-7页，2013年。[12] N. Paine、S. Oh 和 L. Sentis，“高性能串联弹性执行器的设计与控制考量”，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第19卷第3期，第1080-1091页，2014年6月。[13] Y. Yokokura 和 K. Ohishi，“基于双惯量系统扭矩感知的精细负载侧加速度控制”，《IEEE工业电子学汇刊》，第67， 1， 768 777， 2020 卷第，页-，1月。E. [14] Sariyildiz、R. Mutlu 和 H. Yu，“串联弹性执行器的滑模力与位置控制器综合”，《Robotica》，第38卷第1期，第15-28页，2020年。[15] W. Roozing 等，“转矩控制串联弹性执行器的刚度选择”，《IEEE机器人与自动化快报》，第2卷第4期，第2255-2262页，2017年10月。[16] M. Sharifi 等，“人机交互中的阻抗变化与学习策略”，《IEEE控制论汇刊》，doi:/TCYB.2020.3043798。[17] C. W. Mathews 和 D. J. Braun，“并联变刚度执行器”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第8225-8231页，2021年。[18] S. Wolf 等，“变刚度执行器：设计与组件综述”，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第21卷第5期，第2418-2430页，2016年10月。[19] B. Vanderborght 等，“可变阻抗执行器：综述”，《机器人与自主系统》，第61卷第12期，第1601-1614页，2013年。[20] N. Hogan，“通过拮抗肌共同激活实现机械阻抗的自适应控制”，《IEEE自动控制汇刊》，第29卷第8期，第681-690页，1984年8月。[21] J. Yamaguchi 和 A. Takanishi，“采用非线性弹簧机构和拮抗驱动关节的双足行走机器人开发”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第1卷，第185-192页，1997年。[22] C. Chen、W. Lien、C. Chen、Y. Wu，“用于康复的气动肌肉执行器驱动上肢外骨骼机器人的实现”，《执行器》，第9卷，第，页106，2020年。[23] T. Ménard、G. Grioli 和 A. Bicchi，“用于主动-拮抗式变刚度执行器装置的刚度估计器”，《IEEE机器人学汇刊》，第30， 5， 1269 1278， 2014 卷第，页-，10月。M. Laffranchi、N. [24] G. Tsagarakis、F. Cannella 和 D. G. Caldwell，“拮抗式执行器与串联弹性执行器：能耗比较分析”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第5678-5684页，2009年。[25] B. Ugurlu、P. Forni、C. Doppmann、E. Sariyildiz 和 J. Morimoto，“通过气动肌肉驱动的机器人关节的力、位置和刚度稳定控制

气动肌肉”，《IEEE工业信息学汇刊》，第15卷第12期，第6270-6279页，2019年12月。[26] S. Wolf 和 G. Hirzinger，“一种新型变刚度设计：满足下一代机器人的需求”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第1卷，第1741–1746页，2008年。[27] J. W. Hurst 和 A. A. Rizzi，“实现高效跑步步态的串联柔顺性”，《IEEE机器人与自动化杂志》，第15卷第3期，第42-51页，2008年9月。[28] R. Van Ham 等，“Maccepa，机械可调柔顺性与可控平衡位置执行器：在双足机器人中的设计与实现”，《机器人与自主系统》，第55卷第10期，第761-768页，2007年。[29] S. Wolf 和 G. Hirzinger，“一种新型变刚度设计：满足下一代机器人的需求”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第1卷，第1741-1746页，2008年。[30] D. J. Braun、V. Chalvet、T. Chong、S. S. Apte 和 N. Hogan，“用于低能耗人体增强的变刚度弹簧执行器”，《IEEE机器人学汇刊》，第35卷第6期，第1435-1449页，2019年12月。[31] A. Jafari、N. G. Tsagarakis、B. Vanderborght 和 D. G. Caldwell，“一种新型可调刚度执行器（AwAS）”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第4201-4206页，2010年。[32] A. Jafari、N. G. Tsagarakis 和 D. G. Caldwell，“AwAS-II：一种基于可调适支点和可变杠杆比这一新颖原理的新型可调刚度执行器”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第4638-4643页，2011年。[33] V. Chalvet 和 D. J. Braun，“低功耗变刚度机构的设计准则”，《IEEE机器人学汇刊》，第33卷第4期，第1002-1010页，2017年8月。[34] L. Visser、R. Carloni 和 S. Stramigioli，“高能效变刚度执行器”，《IEEE机器人学汇刊》，第 27， 5， 865 875, 2011 卷第，页-。[35] S. S. Groothuis、G. Rusticelli、A. Zucchelli、S. Stramigioli 和 R. Carloni，“vsaUT-II：一种新型旋转变刚度执行器”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，第3355-3360页，2012年。[36] J. Choi、S. Hong、W. Lee、S. Kang 和 M. Kim，“一种采用板簧的变刚度机器人关节”，《IEEE机器人学汇刊》，第27卷第2期，第229-238页，2011年4月。[37] J. Wu 等，“一种具有可重构性的新型基于板簧的变刚度关节的设计与验证”，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第 25， 4， 2045 2053， 2020, 卷第，页-，8月。M. K. [38] Shepherd 和 E. J. Rouse，“VSPA足部：一种刚度连续可变的准被动踝足假肢”，《IEEE神经系统与康复工程汇刊》，第12卷第25期，第2375-2386页，2017年12月。[39] M. I. Awad 等，“一种新型被动变刚度关节（pVSJ）的建模、设计与表征”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第1卷，第323-329页，2016年。[40] E. Sariyildiz、G. Chen 和 H. Yu，“通过扰动观测器实现新型串联弹性执行器的鲁棒位置控制”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第1卷，第5423-5428页，2015年。[41] Hussain 等，“用于安全人机交互的具有刚度瞬时切换功能的离散变刚度执行器的设计与控制”，IEEE Access，第9卷，第118215-118231页，2021年。[42] E. Sariyildiz、H. Wang 和 H. Yu，“串联弹性执行器鲁棒位置控制问题的滑模控制器设计”，《IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集》，2017年，第3055-3061页。[43] S. K Sinha，“自由端承受接触冲击载荷的扭转旋转悬臂铁木辛柯梁的扭转-弯曲-轴向耦合动力学”，《ASME应用力学杂志》，第74卷第3期，第505–522页，2007年5月。[44] T. Belendez、C. Neipp 和 A. Belendez，“ 悬臂梁的大偏转和小偏转 ”，《欧洲物理学杂志》，第 23 卷第 3 期，第371–379页，2002年。[45] S. Y. Kim 和 D. J. Braun，“一种新型变刚度弹簧机构：调节刚度而不受弹簧储能的影响”，《IEEE/RSJ智能机器人系统国际会议（IROS）论文集》，第1卷，第8232-8237页，2021年。[46] M. Fumagalli、E. Barrett、S. Stramigioli 和 R. Carloni，“mVSA-UT：用于连续旋转变刚度执行器的微型差动机构”，《IEEE生物医学机器人与生物机电学国际会议（BioRob）论文集》，第1943-1948页，2012年。

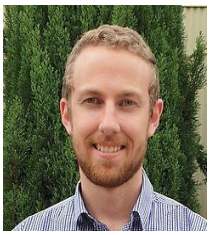


Emre Sariyildiz（S’11、M’16、SM’21）于2014年在日本横滨庆应义塾大学获得第一个综合设计工程博士学位，并于2016年在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得第二个控制与自动化工程博士学位。

他目前是机械、材料、机电一体化与生物医学工程，澳大利亚新南威尔士州伍伦贡的伍伦贡大学。他的研究兴趣包括控制理论、机器人学、机电一体化和运动控制。



Rahim Mutlu（M’22）于2013年在澳大利亚新南威尔士州伍伦贡的伍伦贡大学（UOW）获得机器人学博士学位。2017至2021年，他在UOW担任讲师，之后接受目前的任命，担任工程与信息科学学院在阿联酋的UOWD任职。他还是 Intelligent Robotics & Autonomous Systems Co（iR@SC）的创始人，该公司位于澳大利亚新南威尔士州2529。他的研究兴趣包括软体机器人学、软体触觉技术、可穿戴技术、辅助与康复外骨骼以及增材制造。



Jon Roberts 于2019年在澳大利亚新南威尔士州伍伦贡的伍伦贡大学（UOW）获得机械工程博士学位。

自2020年1月起，他担任伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院讲师，该学院位于澳大利亚新南威尔士州伍伦贡。他的研究兴趣包括仿真方法、散装物料处理、采矿安全和粉尘控制技术。



Chin-Hsing Kuo 于2011年在英国伦敦国王学院获得机械工程博士学位。

自2019年2月起，他担任伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院高级讲师。该校位于澳大利亚新南威尔士州，伍伦贡。在此之前，他曾任国立台湾科技大学副教授。他的研究兴趣包括并联机器人、机构设计以及机器人运动学与动力学。



Barkan Ugurlu（S'08-M'10）于2010年在日本横滨的横滨国立大学获得电气与计算机工程博士学位。

他曾任玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里研究员，目前担任土耳其伊斯坦布尔厄兹耶金大学机械工程系助理教授。他的研究兴趣包括腿式运动控制、新型机器人系统的硬件开发以及多体动力学。