可变刚度提升软体机器人的安全性与性能

Mert Aydin 伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院 澳大利亚新南威尔士州伍伦贡
ma731@uowmail.edu.au

Emre Sariyildiz 伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院 澳大利亚新南威尔士州伍伦贡
emre@uow.edu.au

Charbel Dalely Tawk 黎巴嫩美国大学工程学院工业与机械工程系 黎巴嫩比布鲁斯
charbel.tawk@lau.edu.lb

Rahim Mutlu 迪拜伍伦贡大学工程与信息科学学院 阿拉伯联合酋长国迪拜 r
mutlu@uow.edu.au

Gursel Alici 伍伦贡大学机械、材料、机电与生物医学工程学院 澳大利亚新南威尔士州伍伦贡
gursel@uow.edu.au

摘要—本文提出了一种新型变刚度软体夹爪，可在工业应用中执行高性能抓取任务。所提出的一体式软体夹爪由一个中间波纹管和两个侧波纹管（即手指）组成。通过开关控制器调节中间波纹管执行器中的负压，从而控制手指的位置。通过比例式气压调节器控制手指中的正压，以调节软体夹爪的刚度。实验表明，所提出的软体夹爪可在250毫秒内将刚度调节125%。实验还表明，这种变刚度软夹爪有助于提升工业应用中抓取任务的安全性和性能。

关键词—软体夹爪、一体式、柔顺执行器、3D打印、可变刚度、气动控制。

I. 引言

柔顺机器人和软体机器人已广泛应用于各种机器人系统（如协作机器人、外骨骼、手术机器人和人形机器人），以提升机器人与环境进行物理交互时的安全性 [1–6]。尽管它们固有的柔顺机械结构具有诸多优点，例如安全性高、成本低，且能实现高保真力控制，但柔顺机器人和软体机器人在运动控制方面仍面临一些挑战和根本性限制 [5, 7 - 9]。例如，弹性机械部件会限制机器人系统的带宽，从而显著制约位置控制的性能 [8, 9]。随着弹性部件的刚度降低，机器人系统的响应时间延迟会增大。此外，柔顺或软体机器人系统所施加的力范围与其弹性部件的刚度直接相关。机器人系统的弹性部件越柔软，其在机器人与环境的物理交互中所能施加的力范围就越小 [5, 10]。因此，刚度固定的弹性部件会导致明显的柔顺和软体机器人系统在安全性与性能之间的权衡 [5, 11]。

为克服软体机器人领域中的这一局限，并使软体机器人更适用于需要输出力范围较广的应用[12] （即既能以极小的力与脆弱、低刚度环境交互，也能以较大的力与高刚度环境交互，并能够在软体夹爪[13] 或软体机器人手 [14] 的情况下举起中等至较重的物体），软体机器人需要能够主动按需改变其柔顺性（即实现可变刚度）[15]。例如，使用软体机器人夹爪抓取刚度各异的物体[14] 时，若具备可变柔顺性[16]，就能更高效（即针对每个物体施加适当的夹持力）且更灵活（即处理不同负载，并以不同速度或加速度移动物体）。

人们探索了多种方法，使软体机器人具备可变刚度能力 [17]。相变材料[18] （例如低熔点合金（LMPA））已被用于改变软体机器人的刚度 [19]。另一种方法是使用聚乳酸（PLA）[20], 、形状记忆聚合物（SMP）[13, 21], 和形状记忆合金（SMA）[22] ，它们在加热至高于各自的玻璃化转变温度后都会软化。同样，蜡 [23] 也可用于构建适用于软体机器人应用的变刚度软结构。这些方法的主要缺点是响应和恢复速度较慢，因为它们都由热量驱动。此外，电活性聚合物（EAP） [24] 和磁流变液 [25] 也已被用于实现变刚度软结构，以及用于将可变刚度集成到软体夹爪中的仿生结构 [26, 27]。

其他常见方法通过堵塞[28] 颗粒[29-31], 层[32], 和纤维 [33, 34] 来实现较高的刚度，因此更受青睐；其主要驱动方式是

采用气动动力源（即空气压缩机）。此外，拮抗结构也被用于开发变刚度软结构。这种方法可基于拮抗式气动致动器 [35，36] 和腱驱动结构 [37，38]。为实现快速响应，人们还利用双稳态金属条[39]开发了多级变刚度执行器。

本文提出了一种完全由单一材料3D打印而成的软体夹爪，通过负压驱动，并利用正压改变刚度 [40, 41]。该夹爪采用熔融沉积成型（FDM）3D打印机和软质热塑性聚氨酯进行3D打印。我们将这种具备变刚度能力的软体夹爪安装在机械臂上作为末端执行器，并进行了演示。结果表明，通过正压提高刚度后，该软体夹爪能够在不同的抓取和放置速率（即速度和加速度）下，稳定而牢固地抓取水瓶。

本文其余部分安排如下。第二节介绍变刚度软夹爪的设计与制造。第三节描述抓取运动和刚度调节的控制系统。第四节通过实验评估软体夹爪的性能。第五节和第六节分别进行讨论并给出结论。

II. 方法与材料

A. 变刚度软夹爪的设计 软体机器人夹爪的设计与

基于软波纹管设计，使用 Fusion 360（Autodesk公司）进行建模，如图 1 所示。该软体机器人夹爪由正压和负压驱动。软体夹爪将驱动单元（即负压驱动的中间波纹管）与软手指（即正压驱动的侧波纹管）相结合；通过压力调节，软手指的刚度会发生变化。因此，软体夹爪由两个主要部件组成，这两个部件在同一道制造工序中同时进行三维打印（即一体式软体夹爪）。第一个部件是图 1 中所示的中间部分，通过负压（即真空）激活，是主要的驱动器或驱动单元。中间波纹管激活后，会与周围的两个波纹管接触并将它们向内拉动，因为它们通过软肋与中间波纹管相连，如图 1 所示。第二个部件是两个波纹管手指，通过

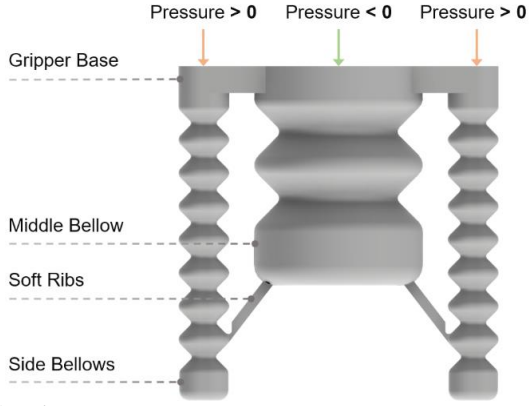

图 1：变刚度软夹爪的 CAD设计 r.

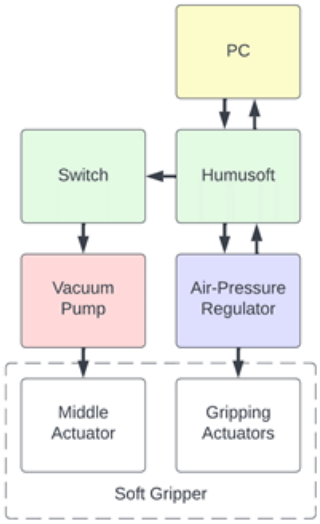

图 2：所提出的变刚度软夹爪控制图流程图。

正压。这些手指在受到
加压激活，因此输入正压时会进一步向内推。此外，正压激活会提高其整体刚度，进而提升夹爪的刚度。因此，这些手指在夹爪中充当变刚度单元。有关变刚度软夹爪设计的更多详情，请参阅我们先前的研究 [40]。

B. 材料与增材制造工艺

软体夹爪采用一台低成本、开源的熔融沉积成型三维打印机（FlashForge Inventor，FlashForge公司）进行打印，该打印机使用市售软质热塑性聚氨酯（TPU）材料，商品名为 NinjaFlex。NinjaFlex 长丝材料在打印前兼具刚性与可拉伸性和柔韧性，使打印过程更加顺畅；本研究借此实现了可充气和可放气的波纹管式软体机器人夹爪，并使其刚度可调。将软体夹爪以气密性气动软结构的形式进行三维打印时所选用的打印参数，依据我们此前的研究成果，这些研究优化了软体夹爪和气动执行器的关键参数 [40-43]。如图 1 所示，夹爪沿高度方向垂直进行三维打印。

III. 变刚度软夹爪与机器人系统的控制

变刚度软夹爪分别使用两个独立的控制器，对位置和刚度调节中的负压与正压进行调节。使用一个开关（即开关控制器）来控制软体夹爪手指的位置。当开关打开时，中间波纹管执行器收缩，将两个侧指向内拉动，使夹爪抓住目标物体。此外，使用比例式气压调节器，通过调节手指中的正压来调节软体夹爪的刚度。随着正压增大，软体夹爪的刚度也会提高。这使我们能够执行安全且高性能的运动控制任务 [5,

44]。可变柔性夹爪的控制结构如图 2 所示。

变柔性夹爪的抓取力可通过增大中间波纹管内的负压或侧指内的正压来调节。要增大负压，只需使用直径更大的波纹管。这样便能在工业应用中搬运更重的物体。还可以通过调节正压来改变夹爪的刚度，从而调节抓取力。随着正压调节使刚度增大，变刚度软夹爪能够对物体施加更大的力。不过，这受到柔性材料特性和夹爪设计的限制。本研究将压力参考值设定在 50 kPa 至 350 kPa 之间。

为评估变刚度软夹爪在工业应用中的性能，我们将夹爪安装在一台协作机器人上。本研究的实验演示使用了Franka Emika Panda协作机器人。值得注意的是，所提出的变刚度夹爪可轻松安装到不同的工业机器人和协作机器人上。Panda机器人使用 Franka Emika 的高级用户界面按照预设轨迹运动。编程的轨迹包含不同速度和方向的运动，以测试软夹爪在牢固抓取和搬运物体时的能力。实验详情见第 IV 节。

IV. 实验

本节通过实验验证所提出的变刚度软夹爪的性能。实验中使用单级旋片式真空泵作为负压源来控制夹爪的位置，使用Chicago Air HUSH50空气压缩机提供正压源以调节刚度，使用ME-system的K6D27 50/1Nm力传感器估算夹爪的作用力，并使用Festo的VPPM-6L-10H比例空气压力调节器控制夹爪的刚度。我们使用MATLAB Simulink Desktop Real-Time和Humusoft MF644数据采集卡搭建了实时控制器。实时控制系统的采样时间为1ms [45]。我们使用Franka Panda协作机器人执行取放任务。

第一个实验旨在验证刚度调节效果，结果表明，可通过比例式气压调节器调节软夹爪的刚度，从而改变夹爪施加的力。在该实验中，我们将力传感器放置在夹爪的尖端，并在调节器施加不同正压时测量夹持力，如图3所示。图中显示，当正压从150kPa升高至350kPa时，软体夹爪施加在力传感器上的力增加了~100%。向手指施加50kPa正压时，柔性执行器能够施加的最小夹持力为~7N；施加350kPa正压时，最大力为~25 N。当手指内的正压从50kPa升至350kPa时，总夹持力增加了三倍以上。如图3所示，软体夹爪能够在250 ms内达到最大力值。

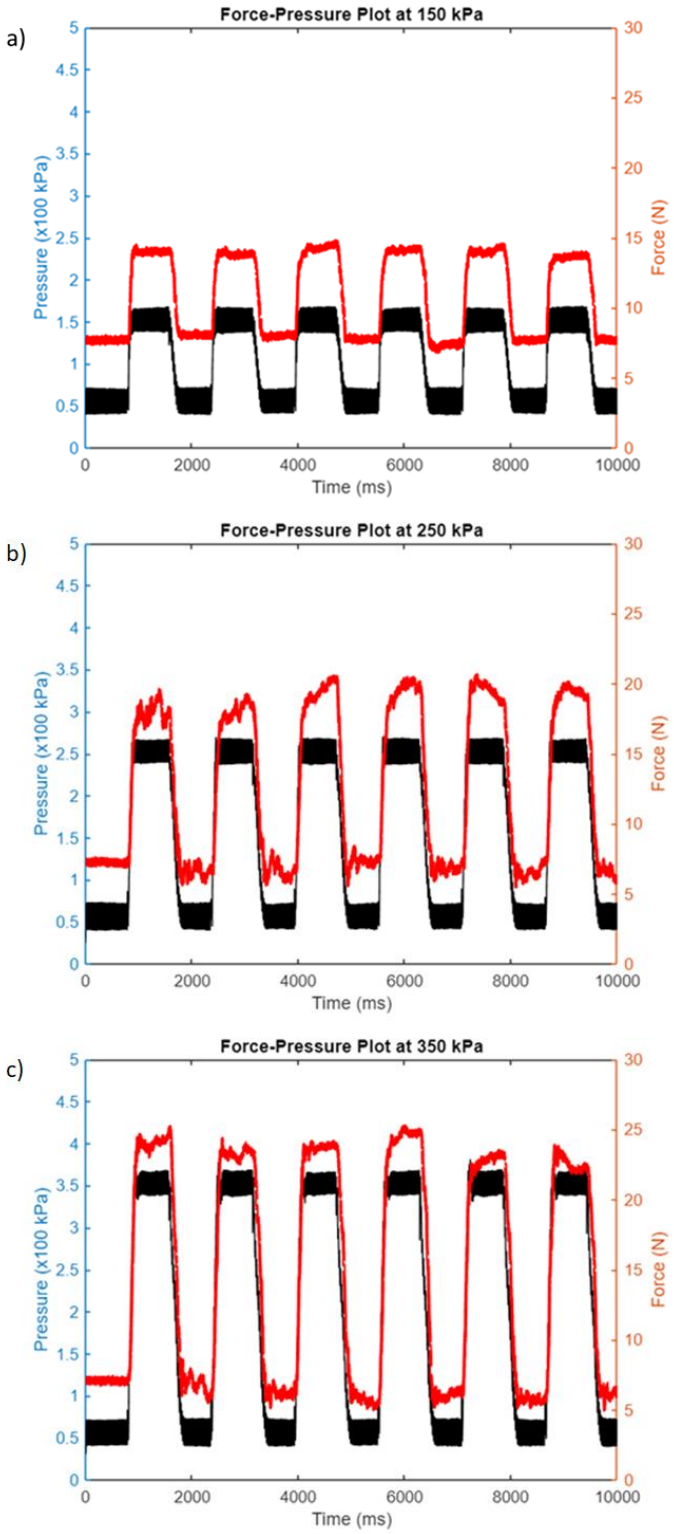

图3：刚度调节实验 1。（a）对软体夹爪施加 150kPa 时的刚度调节实验。（b）对软体夹爪施加 250kPa 时的刚度调节实验。（c）对软体夹爪施加 350kPa 时的刚度调节实验。

为估算刚度变化，我们施加了 10N 恒定通过伺服电机控制系统向夹爪施加力，并测量软体夹爪表面的位置偏转，同时将正压从 50kPa

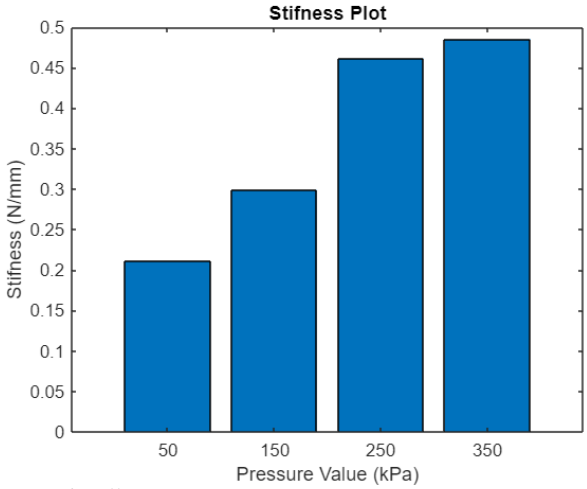

图4：刚度调节实验2。

通过比例气压调节器施加至 350kPa。该实验如图 4 所示。当软手指中的正压为 50kPa 时，夹爪处于最软模式，刚度为 0.2N/mm；而当正压为 350kPa 时，软体夹爪处于最硬模式，刚度为 0.45N/mm。所提出的变刚度软夹爪可将刚度调节 125%。值得注意的是，如图 3 所示，软体夹爪的刚度可在 250ms 内从最低值 0.2N/mm 调节至最高值 0.45N/mm。

为展示软体夹爪的可变刚度特性如何帮助我们提升实际工程应用的性能，我们进行了两项实验：当夹爪安装在协作机器人手臂上执行不同的工业任务时，软体夹爪的较软模式和较硬模式各自展现出不同的优势。在第一项实验中，软体夹爪执行了易碎物体（即一次性咖啡杯）的抓取与放置任务，如图 5 所示。图 5a、5b 和 5c 中软体夹爪的压力分别设为 50kPa、100kPa 和 200kPa。随着软体夹爪刚度增加，施加在一次性咖啡杯上的力也随之增大。当压力为 50kPa 和 100kPa 时，软体夹爪能够安全地抓取一次性咖啡杯（见图 5a 和 5b）；而当压力设为 200kPa 时，杯子则受到了损坏（见图 5c）。这张图清楚地表明，即使使用软体机器人进行抓取，应适当调节机器人与物体之间的接触力，以安全地执行抓取与放置任务。所提出的变刚度软夹爪能够以较软模式安全地抓取易碎物体。

然而，尽管夹爪的较软模式提高了抓取易碎物体时的安全性，却可能显著限制其执行不同取放任务的性能。图 6 展示了这种局限性的一个例子。在该实验中，使用所提出的变刚度夹爪抓取了一个水瓶

在较软模式下，当以较低速度（即低于 30 mm/s）执行取放任务时，软体夹爪能够成功完成任务。然而，随着任务速度提高（例如，高于 45 mm/s），软体夹爪在较软模式下无法完成将水瓶放置到目标位置的任务，如图 6 所示。为在高速下（即 45 mm/s）成功完成该任务，系统启用了增刚模式，这显著提升了水瓶取放任务的执行效果，如图 7 所示。

V. 讨论

本研究介绍了一种采用单一材料、通过三维打印一体成型且具有可变刚度特性的软体机器人夹爪。该可变刚度软体机器人夹爪采用低成本熔融沉积成型三维打印机和市售软质热塑性聚氨酯制成。该软体机器人夹爪通过正负气压波纹管的组合实现驱动和刚度调节。我们开展了实验测试，以表征该软体机器人夹爪，并定性展示其通过刚度调节获得的抓取能力。实验表征在台架装置上进行，重点考察施加的正压与刚度变化之间的关系，并通过夹持多轴力传感器，测量软体机器人夹爪手指尖端的输出力；定性测试则将夹爪安装在机器人操作臂上作为末端执行器，以开展抓取与放置实验。

可变刚度是机器人应用中一项理想的特性，因为它不仅能够提高机器人与环境交互时的安全性，还能使机器人系统（例如操作臂、夹爪和外骨骼）适应

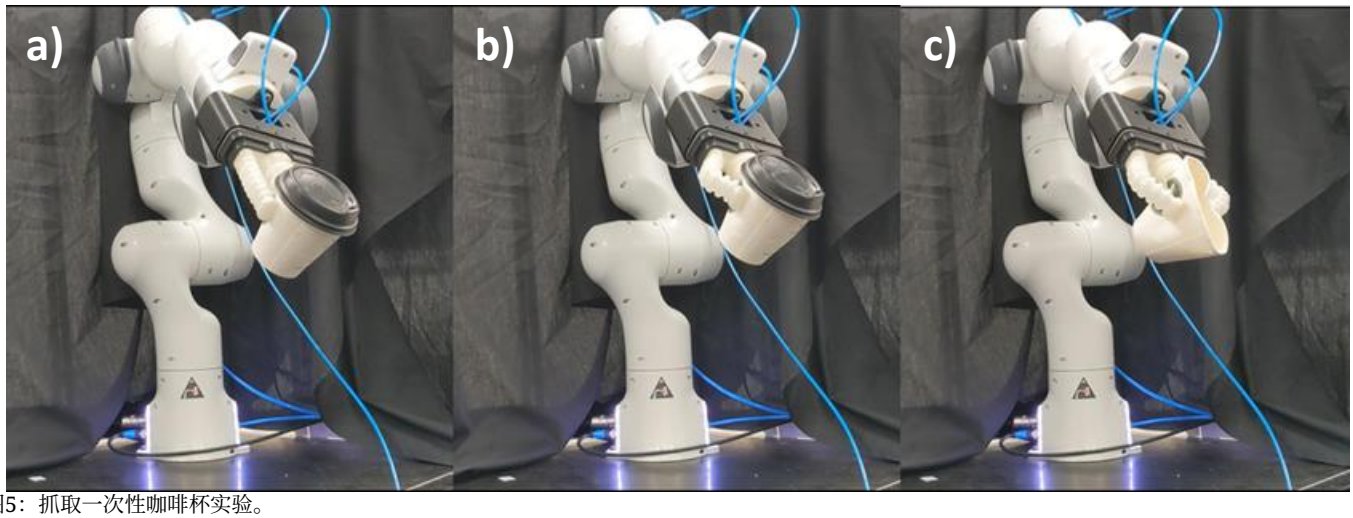

图5：抓取一次性咖啡杯实验。

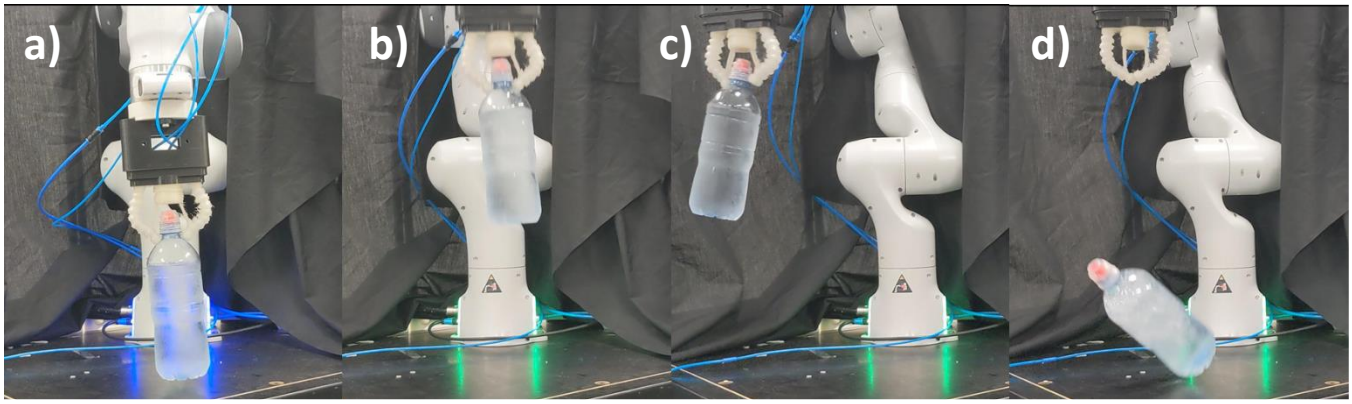

图6：夹爪在较软模式下工作时的拾取与放置实验。

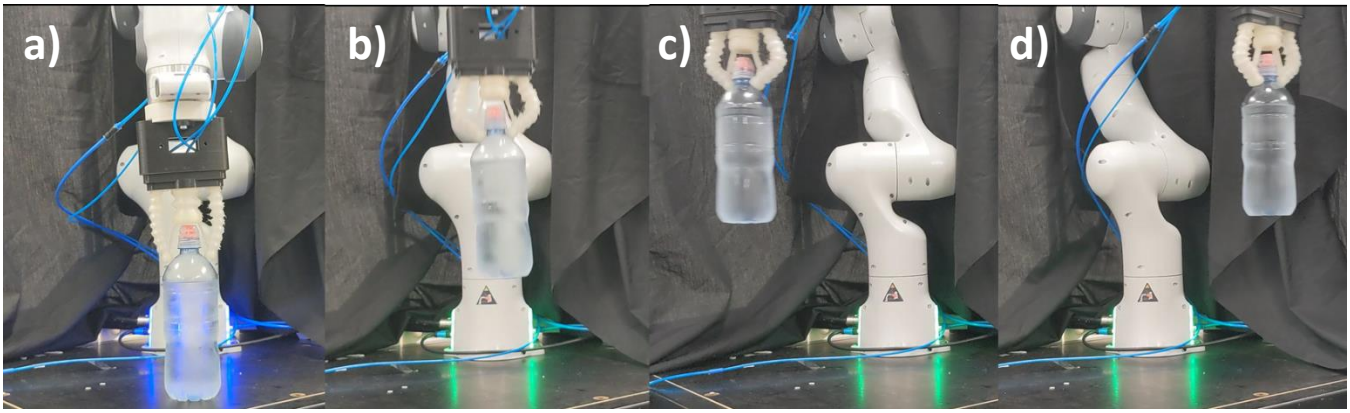

图7：夹爪在较硬模式下工作时的拾取与放置实验

.

各种不同的任务，并以有效的方式完成这些任务 [46]。例如，易碎物体可以使用可变刚度机器人系统的较软模式安全地抓取，而其较硬模式则通过提高闭环控制系统的带宽并从本质上抑制扰动，简化运动控制问题 [46]。本文表明，所提出的一体式软体夹爪无需复杂的设计和/或组装流程，即可实现理想的可变刚度特性。我们的软体夹爪能够快速地将刚度从较软模式切换至最高刚度模式。此外，图 3 所示的结果表明，即使在抓取和放置不同尺寸、形状及刚度的多个物体时需要快速改变刚度，刚度调节仍具有良好的重复性。因此，我们的夹爪能够适应指定任务。此外，图 4 所示的刚度调节结果表明，在最高达 250kPa 的范围内，刚度与输入压力之间的关系相当线性；超过 250kPa 后，则呈现饱和现象。图 5、6 和 7 中展示软体机器人夹爪抓取和放置能力的定性结果有力地表明，刚度调节不仅对于与不同物体进行交互十分重要，也会显著影响任务的执行速度。如图 6 和 7 所示，在给定的设计和实验设置下，如果不提高软体机器人夹爪的刚度，就无法在更高速度的运动（即大于或等于 45mm/s）中稳固地抓取装满水的水瓶。

VI. 结论

我们展示了一种采用单一材料、一体式三维打印的软体机器人夹爪，其具有内在的刚度可调性，具体见本文。可变刚度是机器人学家普遍期望的特性，它使机器人系统能够以安全且高效的方式适应各种任务，例如人机交互和轨迹跟踪。本文通过一系列实验测试，从定量和定性两方面证明

这表明，软体机器人夹爪的刚度变化能力能够提升软体夹爪在工业应用中的安全性和性能。未来，我们将进一步研究这种一体式软体夹爪设计在更多工业场景中的定制化和可扩展性。

参考文献

[1] G. Alici，《软即是难：软体机器人与刚性机器人的区别是什么？》，MRS Advances，第3卷，第28期，第1557–1568页，2018年。[2] M. Carmel，《软体机器人：一种观点——当前趋势与未来展望》，软体机器人，第1卷，第1期，第5–11页，2014年。[3] Barkan Ugurlu、Emre Sariyildiz、Ahmet Talha Kansizoglu、Erim Ozcinar、Sinan Coruk，《基于扭转的串联弹性执行器的转矩控制策略基准评估》，IEEE《机器人与自动化杂志》，2022年6月，第29卷，第2期，第85–96页。[4] F. Bechet、K. Ogawa、E. Sariyildiz、K. Ohnishi，《用于微创机器人技术的电液传动系统》，IEEE《工业电子学汇刊》，2015年12月，第62卷，第12期，第7643–7654页。[5] E. Sariyildiz、C. Gong、H. Yu，《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》，2016年3月，第63卷，第3期，第1900–1910页。[6] J. Lee、H. Dallali、N. Tsagarakis和D. Caldwell，《针对具有多个柔顺关节的人形机器人COMAN的鲁棒无模型连杆位置跟踪控制》，2013年第13届IEEE-RAS国际人形机器人会议（Humanoids），2013年，第1–7页。[7] L. Jinoh、H. Dallali、N. Tsagarakis、D. Caldwell，《针对具有多个

柔顺关节”，IEEE-RAS国际人形机器人会议，美国亚特兰大，2013年10月15日至17日[8] E. Sariyildiz、R. Mutlu、H. Yu，“串联弹性执行器的滑模力与位置控制器综合”，Robotica，2020年1月，第38卷，第1期，第15–28页。[9] E. Sariyildiz、C. Gong、H. Yu，“串联弹性执行器的统一鲁棒运动控制器设计”，IEEE机电一体化汇刊，2017年10月，第22卷，第5期，第2229–2240页。[10] C. Tawk 和 G. Alici，“可3D打印软体气动执行器与传感器综述：研究挑战与机遇”，Advanced Intelligent Systems，第3卷，第6期，页码2000223，2021年。[11] M. Manti、V. Cacucciolo 和 M. Cianchetti，“软体机器人中的刚度增强：技术现状综述”，IEEE机器人与自动化杂志，第23卷，第3期，第93–106页，2016年。[12] Y. Tang 等，“利用弹性失稳提升性能：受脊柱启发的高速高力软体机器人”，Science Advances，第6卷，第19期，页码eaaz6912，2020年。[13] Y.-F. Zhang 等，“通过混合多材料3D打印实现快速响应、刚度可调的软体执行器”，Advanced Functional Materials，第29卷，第15期，页码1806698，2019年。[14] X. Wang、L. Wu、B. Fang、X. Xu、H. Huang 和 F. Sun，“用于柔顺且有效抓取的可变刚度层间堵塞软体机器人手”，Cognitive Computation and Systems，第2卷，第2期，第44–49页，2020年。[15] M. S. Xavier 等，“软体气动执行器：设计、制造、建模、感知、控制与应用综述”，IEEE Access，第10卷，第59442–59485页，2022年。[16] “一种用于稳健抓取的全多材料三维打印可变刚度软体夹爪”，Soft Robotics，第6卷，第4期，第507–519页，2019年。[17] L. Zhou、L. Ren、Y. Chen、S. Niu、Z. Han 和 L. Ren，“基于冲击式抓取的仿生软体夹爪”，Advanced Science，https://doi.org/10.1002/advs.202002017，第8卷，第9期，页码2002017，2021/05/01 2021。[18] B. Ma、M. Z. Shaqura、R. C. Richardson 和 A. A. Dehghani-Sanij，“用于机器人关节刚度可控的相变材料研究”，Robotics，第11卷，第3期。doi: 10.3390/robotics11030066[19] S. Chen、Y. Pang、Y. Cao、X. Tan 和 C. Cao，“能够实现刚度变化和灵巧操作、适用于安全人机交互的软体机器人操作系统”，Advanced Materials Technologies，https://doi.org/10.1002/admt.202100084，第6卷，第5期，页码2100084，2021/05/01 2021。[20] M. Al-Rubaiai、T. Pinto、C. Qian 和 X. Tan，“利用3D打印导电聚乳酸材料实现刚度与形状调节的软体执行器”，Soft Robotics，第6卷，第3期，第318–332页，2019/06/01 2019。[21] T. Liao、M. S. Kalairaj、C. J. Cai、Z. T. Tse 和 H. Ren，“通过相变和液压调控实现可变刚度的可完全打印软体执行器”，Actuators，第10卷，第10期。doi: 10.3390/act10100269[22] W. Wei 和 A. Sung-Hoon，“基于形状记忆合金、用于柔顺且有效抓取的可变刚度软体夹爪”，Soft Robotics，第4卷，第4期，第379–389页，2017年。[23] N. G. Cheng、A. Gopinath、L. Wang、K. Iagnemma 和 A. E. Hosoi，“用于软体机器人应用的热可调自修复复合材料”，Macromolecular Materials and Engineering，https://doi.org/10.1002/mame.201400017，第299卷，第11期，第1279–1284页，2014/11/01 2014。[24] H. Markus、S. Jörg 和 G. Gerald，“基于电活性聚合物的可变刚度多层梁”，载于 Proc.SPIE，2012年，第8340卷，页码83401P。[25] S.-W. Hong 等，“聚氨酯与磁流变液的3D打印软体结构：刚度可调性的概念验证研究”，Micromachines，第10卷，第10期。doi: 10.3390/mi10100655[26] T. Sun、Y. Chen、T. Han、C. Jiao、B. Lian 和 Y. Song，“受穿山甲鳞片启发的可变刚度软体夹爪、齿状气动执行器及自主控制器”，Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，第61卷，页码101848，2020/02/01/ 2020。[27] D. Cao、J. G. Martinez、E. S. Hara 和 E. W. H. Jager，《可自生骨的生物混合可变刚度软致动器》，《先进材料》，https://doi.org/10.1002/adma.202107345，第34卷，第8期，2107345页，2022年2月1日 2022。[28] S. G. Fitzgerald、G. W. Delaney 和 D. Howard，《软体机器人中的堵塞致动综述》，Actuators，第9卷，第4期。doi: 10.3390/act9040104[29] E. Brown 等，《基于颗粒材料堵塞的通用机器人夹爪》，《美国国家科学院院刊》，第107卷，第44期，第18809–18814页，2010年11月2日 2010。[30] Y. Wei 等，《一种基于集成软致动与颗粒堵塞的新型可变刚度机器人夹爪》，软体机器人，第3卷，第3期，第134–143页，2016/09/01 2016。[31] J. Amend 和 H. Lipson，《JamHand：以最少驱动实现灵巧操作》，软体机器人，第4卷，第1期，第70–80页，2017/03/01 2017。[32] X. Zeng 和 H.-J. Su，《基于层间堵塞的高性能气动软夹爪》，《机构与机器人学期刊》，第15卷，第1期，2022。[33] S. Jadhav、M. R. A. Majit、B. Shih、J. P. Schulze 和 M. T. Tolley，《用于软体机器人与可穿戴触觉应用的纤维堵塞可变刚度装置》，软体机器人，第9卷，第1期，第173–186页，2022年2月1日 2021。[34] L. Bai、H. Yan、J. Li、J. Shan 和 P. Hou，《基于线材堵塞的可调刚度可拆卸软致动器》，《应用科学》，第12卷，第7期。doi: 10.3390/app12073582[35] S. P. M. Babu、A. Sadeghi、A. Mondini 和 B. Mazzolai，《用于软体机器人应用的可变刚度拮抗式气动致动器》，载于2019年第二届IEEE软体机器人国际会议（RoboSoft），2019年，第283–288页。[36] Y. Chen、J. Zhang 和 Y. Gong，《基于拮抗机制的软气动致动器新型设计与建模》，Actuators，第9卷，第4期。doi: 10.3390/act9040107[37] K. Althoefer，《软体充气机器人中的拮抗驱动与刚度控制》，《自然综述：材料》，第3卷，第6期，第76–77页，2018/06/01 2018。[38] A. Shiva 等，《气动软体机械臂的基于肌腱的增刚》，《IEEE机器人与自动化快报》，第1卷，第2期，第632–637页，2016。[39] R. Mutlu、E. Sariyildiz、T. Nozaki、G. Alici，《软体机器人手指多级增刚单元的设计及其鲁棒运动控制》，IEEE工业电子国际会议，华盛顿特区，美国，2018年10月21–23日。[40] R. Mutlu、C. Tawk、G. Alici 和 E. Sariyildiz，《具有可调刚度的3D打印一体式软体夹爪》，载于IECON 2017——第43届IEEE工业电子学会年会，2017年，第6235–6240页。[41] C. Tawk、E. Sariyildiz 和 G. Alici，《内置气动触觉感知腔的3D打印软夹爪力控制》，软体机器人，2021。[42] C. Tawk、H. Zhou、E. Sariyildiz、M. i. h. Panhuis、G. M. Spinks 和 G. Alici，《嵌入式气动感知腔的3D打印一体式软体机器人手指的设计、建模与控制》，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第26卷，第2期，第876–887页，2021。[43] C. Tawk、R. Mutlu 和 G. Alici，《集成超材料、用于贴合抓取的3D打印模块化软夹爪》（英文），《机器人与人工智能前沿》，原创研究，第8卷，2022年1月7日 2022。[44] Barkan Ugurlu、Emre Sariyildiz、Tatsuo Narikiyo、Jan Babiˇc，《主动柔顺控制可降低外骨骼辅助行走时的上身用力》，IEEE人体机器系统汇刊，2020年4月，第50卷，第2期，第144–153页。[45] M. Aydin 等，《新型软触觉生物反馈——关于姿势平衡与本体感觉的先导研究》，《传感器》，2022年，22，3779。[46] E. Sariyildiz、R. Mutlu、J. Roberts、C. -H. Kuo 和 B. Ugurlu，《新型可变刚度串联弹性致动器的设计与控制》，IEEE/ASME机电一体化汇刊，doi: 10.1109/TMECH.2022.3232471。