arXiv:2304.00442v1 [cs.RO] 2 Apr 2023

可变形线性物体的动态弯折翻转操作

Chunli Jiang、Abdullah Nazir、Ghasem Abbasnejad 和 Jungwon Seo

摘要——**本文介绍了一种弯曲翻转操作技术，适用于抓取放置在平坦表面上的细长柔性线性物体。在操作过程中，机器人夹爪的手指先置于物体上方并将其弯曲，随后物体增加的内能帮助夹爪形成稳定的捏取抓握，同时使物体翻转进入手指之间的空间。本文通过分析能量交换方式，阐述柔性物体与夹爪之间的动态交互。我们还讨论了防止接触丢失所需满足的摩擦条件。该弯曲翻转操作技术可采用开环控制实现，并适用于欠驱动柔顺手指机构。使用定制硬件和软件系统开展的一系列机器人翻页实验，展示了该操作技术的有效性和鲁棒性。**

I. 引言

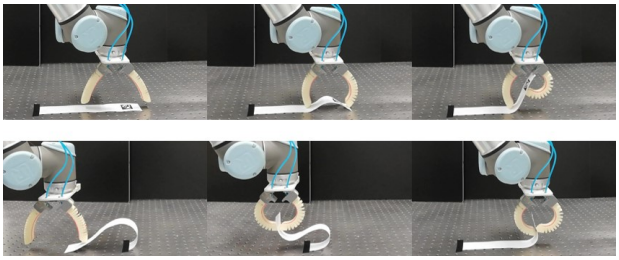


图1：从左上方开始按顺时针方向排列的一系列快照，展示了我们使用双指软体机器人手进行弯曲翻转操作以完成翻页任务。

本文研究一种我们称为弯曲翻转操作的机器人操作技术。该技术针对柔性薄物体，旨在实现对其稳固的捏取抓握。图1展示了使用双指软体机器人手执行翻页任务的操作过程。首先，将柔性物体（一条纸条）放在桌面上。机器人手靠近并使物体变形（操作的“弯曲”阶段），随后将变形后的物体塞入两指之间的缝隙中（“翻转”阶段）。最后，完成捏取抓握，即可执行翻页任务（或其他次级操作任务）。

抓取柔性物体这一任务似乎无处不在，涉及众多行业领域和各种

所有作者均来自香港科技大学，地址为香港清水湾（Chunli Jiang 和 Ghasem Abbasnejad：机械与航空航天工程系 cjiangab@connect.ust.hk,abbasnejad@ust.hk；Abdullah Nazir：电子与计算机工程系 sanazir@connect.ust.hk；Jungwon Seo：机械与航空航天工程系／电子与计算机工程系junseo@ust.hk）。

可以想见的服务机器人应用场景。然而，柔性物体的复杂性——无论是变形导致的几何形状变化，还是其内在属性——都带来了巨大挑战，此外还有刚体操作中众所周知的难题，例如摩擦建模。我们的弯曲与翻转操作技术利用变形后柔性物体的动力学特性，通过帮助物体翻转并及时与两根手指分离，促进抓取建立。我们将通过分析物体-机器人系统内能随时间的变化，讨论该方法的合理性。

正如我们的实验将要展示的，弯曲翻转操作技术可以通过极简硬件配置实现：采用欠驱动方式操控3D打印软体机器人手指。这种配置也有助于应对与环境（即支撑柔性物体的桌面）的交互。无需进行闭环运动/力控制。通过开环回放手指运动，即可保证结果高度可重复且成功率高。除了本研究的主要挑战任务——图1所示的翻页外，我们还预计，基于弯曲翻转操作所获得的稳固抓取，可以实现柔性物体上的各种次级操作任务。

在第II节概述相关工作、第III节阐述问题定义之后，我们将在第IV节讨论用于抓取柔性物体的操作技术。第V节将介绍该技术的实现，并给出一系列实验。

II. 相关工作

除了机器人学中由刚性连杆组成、依据刚体力学规则进行驱动和控制的传统机器人之外，软体机器人和/或能够处理软体物体的机器人如今正日益受到关注。一个基本问题是如何对软材料的行为进行建模。在机器人学文献中， [1]基于微分几何对线状物体的静态变形建模进行了研究，并开展了一系列实验。 [2]提出了一种基于细分的计算方法来进行变形建模，这种方法在计算方面可能更具优势。一般而言，物体变形建模被表述为一个能量最小化问题，并受边界条件约束，例如由障碍物的存在所施加的约束。

我们在此研究的是存在顺应性时的物体操作。可变形线性物体的打结与解结操作是受到广泛关注的问题之一，并具有重要的

潜在医疗与服务机器人应用：其规划与控制方面见 [3]–[5]；关于感知的讨论见 [6]。 [7] 研究了二维可变形物体的操作，并将其应用于折叠衣物。其他例子包括 [8],, 其中通过使用欠驱动柔顺手指机构进行翻转与捏取操作，实现了对薄物体的精确抓取。本文的挑战任务是翻页。 [9]介绍了一种利用聚合物材料机械黏附实现的高可靠性翻页技术。我们采用的方法是利用非抓取式动态操作（见 [10], [11]及其中的参考文献）来翻页；我们此前的一些工作 [12]–[14]也研究过这种方法。

软体机器人手能够有效地抓取软体物体。在翻页任务中，我们也采用了软手。欠驱动、柔顺性机器人手的开发一直是一个活跃的研究课题。早期的实例见 [15]。近期的实例见 [16]，其中展示了一种欠驱动手，甚至能够进行灵巧操作；以及 [17] ，其中展示了一种由气动腔室构成、能够快速运动的机器人手指。

III. 问题描述

本文探讨的问题涉及一种可用于抓取柔性物体的新型机器人操作技术。与刚性物体相比，抓取柔性物体还需要妥善处理变形，因为变形不仅会影响物体的几何形状，也会影响接触力。我们关注如何在抓取建立过程中利用物体变形的动态特性。

本文研究的对象被建模为一种可变形线性物体 [1]（简称物体 ），可将其视为柔性线材。我们进一步假设，这些物体具有弹性但不可伸长。该模型可表示多种在实际应用中具有重要意义的物体，例如纸条或聚合物。初始时，假设物体无变形地放置在平坦刚性地面上。任何变形都发生在包含物体且垂直于地面的平面内。我们研究的是具有两个点接触的操作场景，这种场景可通过双指夹爪实现。

图2展示了在上一段所述设置下，对物体进行操作以实现捏取抓握的一种自然过程。我们将这种弯曲-翻转操作称为弯曲翻转操作，因为它涉及使物体弯曲，而由此产生的变形会使物体动态地翻过手指（图中的手指 #2）。以下各节将详细介绍这种动态操作技术，并展示其在翻页任务中的应用。

IV. 动态弯曲翻转操作

本节介绍我们实现动态弯曲翻转操作的策略。

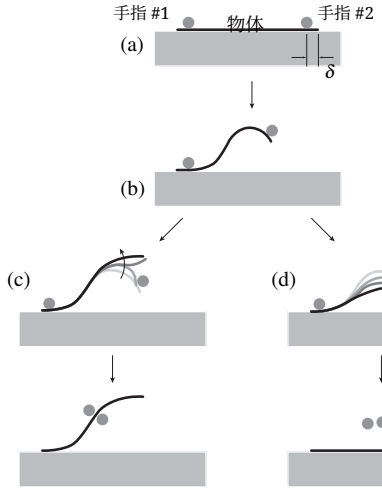


图2：使用两个点状手指进行弯曲翻转操作的过程：(a) δ 趋于无穷小的初始构型，(b) 物体变形，(c) 成功捏取抓握，(d) 抓取失败。

A. 总体场景

如图 2 所示，我们对可变形线性物体进行弯曲翻转操作：从两个手指位于物体同一侧的初始构型（图 2a）开始（图 2a），到两个手指位于物体不同侧的捏取抓握状态结束（图 2c）。注意， δ（物体尖端与手指 #2 之间的距离）假设为无穷小。同时，物体受到手指（外在因素）和自身能量（内在因素）的作用而发生变形。后续小节将把操作过程分为弯曲和翻转两个步骤进行说明。

B. 弯曲：直至接触分离

当物体从初始状态（平放在地面上）发生变形时，其内能会增加。物体（不可伸长，且仅限于在平面上运动）的内能可通过弯曲变形产生的弯曲能来量化。为了增加弯曲能，如图2所示，两个手指需要在不失去与物体接触的情况下彼此靠近。因此，如图所示，合理的做法是用一个手指（手指 #1）向下按压物体，并移动另一个手指（手指 #2）来控制弯曲变形。此外，还需要将手指 #2 抬离地面，否则最终可能无法夹住物体。考虑到操作过程中涉及的边界条件，预计物体会变形成只有一个拐点的 S形：手指 #1 处的接触点 #1（手指 #2 处的接触点 #2 ）具有零斜率（自由斜率），且两个手指之间存在距离约束。图3a中给出的模拟物体形状证实了这一点，这些形状是通过求出使弯曲能最小化的曲线得到的 [1]:

$$U = \frac{1}{2}\int_0^L R_f \kappa^2(s) ds \tag{1}$$

（其中 s：弧长参数；L：总长度，Rf：

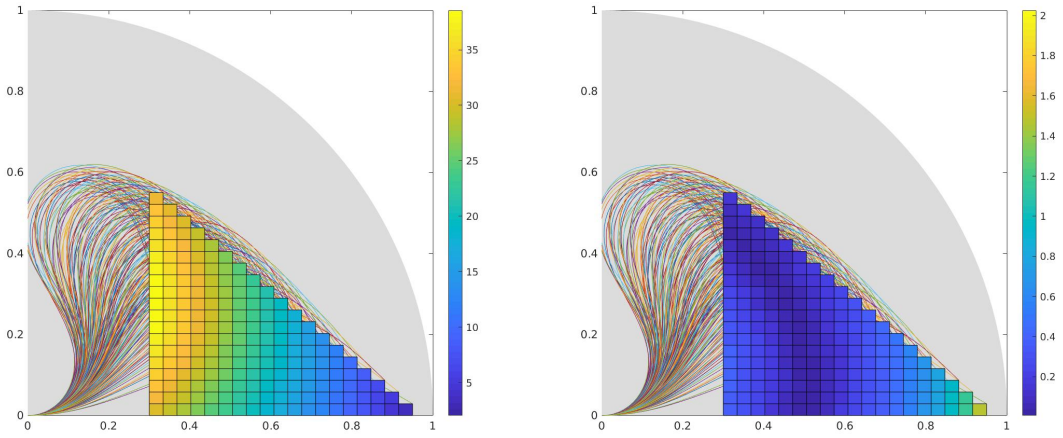


图 3：（a）可变形线性物体的计算得到的最小能量形状（从原点开始的 S 形曲线）。每条曲线的终点位于一个网格单元上，其颜色表示该形状的弯曲能值，如垂直色条所示；这里假设物体的弯曲刚度为 1，对弯曲能进行了无量纲化。物体如图2所示在水平轴上发生变形：手指 #1 位于原点，手指 #2 的位置则在网格上变化。灰色区域表示物体上接触点 #2 的所有可能位置，物体长度为 1。（b）显示在接触点 #2 维持准静态平衡所需的摩擦系数下界的色彩图。其他设置均与（a）相同。

弯曲刚度，且 $\kappa(s)$：物体的曲率），并满足边界条件。

在动态情形下，可以控制手指 #2（具有非零惯性）以正动能运动。当物体向高能量区域弯曲时（图 3a 中颜色较亮的网格单元），手指会减速，因为其动能转化为物体的弯曲能。同时，接触点 #2 处的摩擦必须足够大，以防止如图 2d 所示的接触过早丢失。通过考察接触点 #2 处的接触力，可以求得所需摩擦系数的下界：沿着手指 #2 的一条标称轨迹，接触力必须始终位于其摩擦锥内，才能防止接触丢失。接触力对应于能量最小化问题（式 1）的拉格朗日乘子。对于物体的每一种能量最优形状，图 3b 显示了维持静态平衡所需的接触点 #2 处的最小摩擦系数。该值通过观察接触点 #2 处的物体形状法向量与相应接触力向量之间的夹角得到。需要注意的是，这一下界基于本质上为准静态的分析；因此，在高度动态的过程中，实际值可能有所不同。

备注 初始接触定位对于成功执行弯曲翻转操作至关重要。在图3a和图3b中，假设接触点 #2基本位于物体的右端（回想一下，在图2中，δ 被假设为无穷小）。实际操作中，δ需要足够大，以应对感知和定位误差。不过，合理的做法是尽量减小 δ，因为考虑到提供接触的夹持器的实际运动学，δ较大时可能无法翻转物体（第V节还将讨论这一点）。

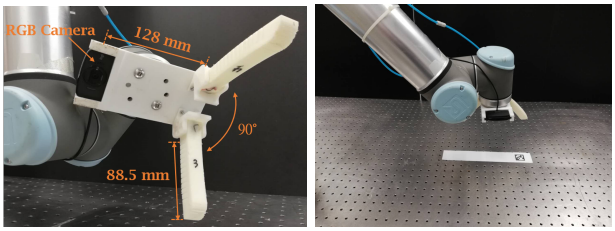
C. 翻转：接触分离后

例如，出于安全考虑，假设将手指#2的动能设定为低于预期的弯曲能目标值。此时，手指将最终停下来。在这一瞬间，能量转换会朝相反方向发生，使物体的弯曲能成为手指动能的来源。与此同时，除非恢复过程是完全塑性的，否则手指会与物体失去接触。失去接触后，物体的形状将沿着弯曲能场的负梯度演变（回想图3a），这有助于实现所需的翻转运动（图 2c），除非手指与物体尖端完全同步运动。因此，在这种动态情境下，物体变形产生的内能有助于手指从物体上弹开，从而促进翻转操作。我们预计，除完全塑性碰撞以及物体与手指之间相对运动为零这一特殊情况外，这种情形都能以高度可重复且稳健的方式实现。

D. 讨论

本节介绍的动态弯曲翻转操作无需采用闭环手指运动/力控制。因此，这种操作技术适用于采用开环控制的欠驱动柔顺手指机构。既不需要触觉感知，也不需要计算。此类机构的被动机械特性也有助于处理手指与地面之间的相互作用。下一节将介绍的实验将验证这些优点。

也可以考虑采用基于传统高阻抗位置控制方案的方法。可以通过位置控制手指 #2，在物体与地面之间形成间隙；这一过程或许可以准静态方式进行，使动能可忽略。然而，物体在重力作用下的被动动力学会使间隙再次闭合，因此手指似乎仍需快速动态运动，才能在间隙闭合前进入其中。相较之下，我们的方法利用了弯曲物体的动力学特性。



(a) (b)

图4：（a）安装在 UR10 工业机器人机械臂上的双指软手。（b）用于机器人翻页的硬件设置。夹持器将被控制以翻动纸条，纸条通过 AprilTag 自动定位。纸张

五、实现与实验

本节通过一系列实验介绍我们弯曲与翻转操作技术的实现。

A. 我们的双指软手

图4a展示了我们将在实验中使用的软手。它具有两根欠驱动的柔顺手指，分别通过气动驱动（SMC 电气比例阀 ITV 0030-2S）独立控制，手掌上还安装了一台 RGB 相机（罗技网络摄像头 C525）。这些手指实现了 [17]中提出的“快速气动网络”理念。具体而言，每根手指都包含一系列可充气气动腔室，并使用 Ultimaker 2+ 3D 打印机，以弹性体材料热塑性聚氨酯制成。制造过程以 [18]为指导。制成的手指整体形状可表示为一段朝手掌方向弯曲的圆弧，其曲率与内部压力成正比。如图5所示，我们的手指曲率与内部压力之间呈高度线性关系。两根手指在根部的夹角设为90°（图4a）。该夹角决定了翻转操作过程中用于容纳物体的口袋空间的大小和形状，而这可能对操作结果至关重要。下文介绍的实验表明，90° 可以是一种可行的选择。

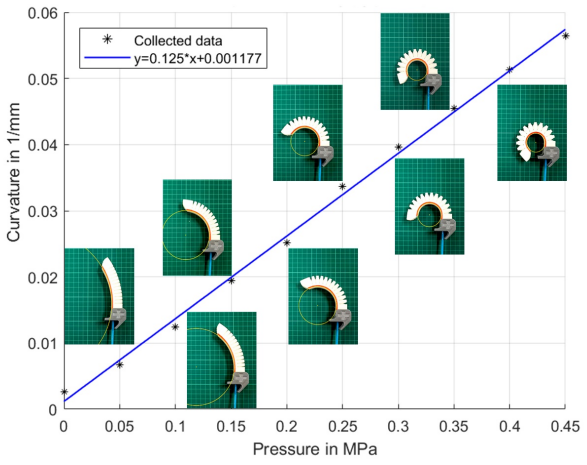


图5：我们的手指曲率与压力之间具有高度线性的关系。手指的曲率通过使用 OpenCV（http://opencv.org）进行图像处理估算。

参数	Min	Max	步长
水平距离，x (mm)	30	90	10
垂直距离，z (mm)	116	135	1
腕部角度，θ (deg)	0	12	1

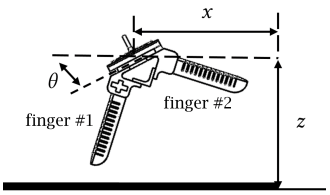


表 I：在翻页实验中待测试的手部初始构型范围。

B. 机器人翻页实验的设置

我们使用软手在翻页任务中测试了所提出的弯折翻转操作技术。图 4b展示了我们的硬件配置，操作物体是一条尺寸为295毫米×50毫米、定量为80克/平方米的 ISO A4纸条。翻页操作预期在两根手指与纸条所构成的平面内进行，因此该平面垂直于桌面。首先，控制机械臂将手移动到所需的初始构型，即该平面上$SE(2)$中的一个元素。表 I通过参数x、z（以物体右端为测量基准）和θ说明了该构型，并列出了这些参数的待测试范围。其次，对1号和2号手指（见表 I）加压以操作纸张，力求实现图 2c所示的捏取抓握。

通过运行集成了机械臂控制器和手指气动调压器控制器的软件，即可自主进行实验。使用 AprilTag[19]定位物体；请见图4b页面上印制的标签。实验结果将表明，手指的材料特性足以实现成功翻页：手指具有足够的柔顺性，能够被弯折的纸张弹开（图3a），且指尖处的摩擦力足够大，能够维持接触足够长的时间（图3b）。

C. 结果

对于每种手部构型（x,z θ），通过控制气动调压器向手指施加压力来尝试弯曲-翻转操作：手指 #1（用于固定页面）的压力为 0.15 MPa，手指 #2（用于弯折页面）的压力为 0.3 MPa。随后，以开环方式弯折物体与手指 #2 组成的系统。总共进行了 7 次（对应 x） $\times 20$ （对应 z）$\times 13$ （对应 θ） $\times 5$ （重复五次） $= 9100$ 尝试（图7给出了一些示例路径，这些路径是预期由手指 #2 的指尖描绘的）。

图 6展示了实验结果。图中的数据点代表成功率等于或高于 0.6 的配置集合（五次弯曲翻转操作试验中至少成功三次）（x，z θ）。这些聚集的数据点表明，我们的弯曲翻转操作可以重复、稳健地执行。在失败的试验中，如果z 设置得过大，指尖就不会与纸张接触

；如果z 设置得过小，指尖就会卡在桌面上；或者如果 x （因此 δ）设置得过大，物体的尖端就无法容纳在手指 #2形成的口袋空间内（回顾我们在第IV-B节中的讨论）。

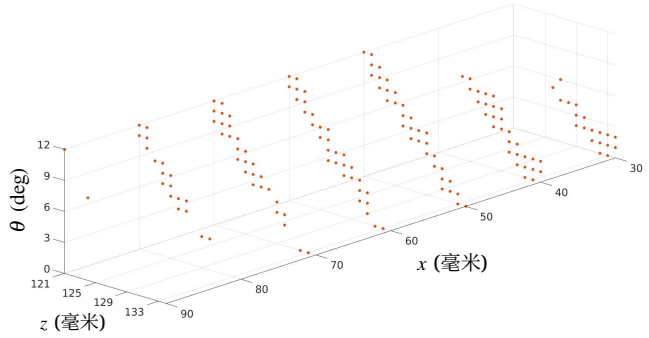


图 6：成功执行弯曲翻转操作时的手部构型（x，z θ）。

从图 6 可以观察到：（1）z 与 θ 之间的关系可用仿射方程建模；（2）如果x设置得过大或过小，则（z θ）的范围会缩小。基于这些观察，可以确定成功执行弯曲翻转操作的最优手部构型（x，z θ）。首先，在以下区间内选择x：

$$50 \le x \text{ (mm)} \le 70 \tag{2}$$

使z 与 θ 的可行范围根据图 6 达到最大。其次，选择满足通过最小二乘法得到的仿射方程的z 和 θ：

$$\hat{\theta} \text{ (deg)} = -0.90z \text{ (mm)} + 120.5 \tag{3}$$

且处于实验报告的范围内。x区间的非零宽度，以及所得到的仿射函数具有使残差平方和最小的性质，表明使用所选参数执行操作的结果具有鲁棒性。

图7通过展示成功试验中可能发生的情况，印证了我们在第IV节中的讨论。图中展示了手指 #2 的指尖将描绘的一些标称路径，这些路径叠加在图3a中也出现过的能量图上。路径是在假设手指以均匀曲率弯曲的条件下得出的（如图5的插图所示）。此时，指尖将沿螺旋曲线移动。此处，手的构型（x,z θ）按照方程 2 和 3 中的讨论进行设定。当指尖沿路径向左移动时，物体的弯曲能将增加，并且指尖最终会在某一点停止移动并从物体上弹开。假设指尖沿路径反向回弹，可以看出，接近路径末端时，指尖的运动方向可能与弯曲能场的梯度明显不同。这种差异能够引导页面尖端朝向手指 #2 的口袋空间（即弯曲手指围成的区域），从而促成翻转；此时，指尖（物体）以相对较大的向下（向右）速度移动。从图7中还可以看出，指尖与不只物体发生相互作用，也会与地面发生相互作用；图中路径在水平轴上显示为平坦。成功的结果表明，我们的柔顺手指能够妥善应对这一情况。另请参阅视频附件，其中的慢动作视频片段进一步阐释了此处的讨论。

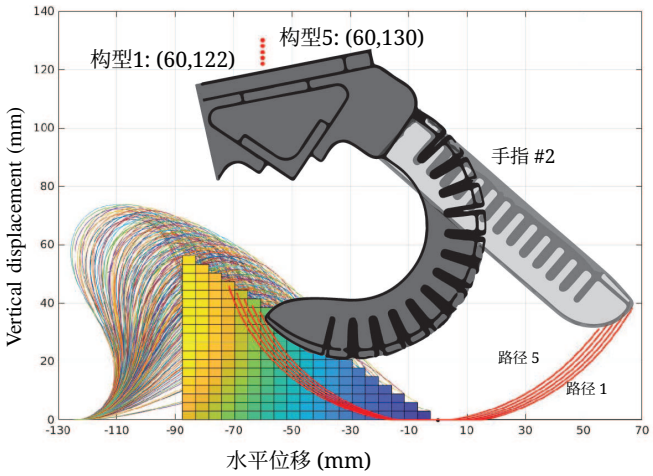


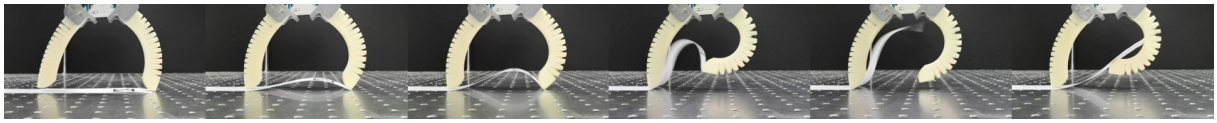
图 7：随着手指 #2 充气，其指尖名义上沿红色曲线所示路径移动。由于路径不能穿入水平轴下方的区域（桌面约束），因此在轴上会有一段平坦部分。这五条路径基于由公式 2 和 3 确定的手部构型（x，z θ）。红点表示这些构型的（x，z）坐标。图中还展示了根据图3a得出的量纲化能量图，其中物体长度设为 125mm，与我们的实验相对应。

图8a展示了一次成功的弯折-翻转操作的连续快照。在图中的第二个画面里，手指 #2（右侧的手指）在充气时开始与纸条（以及桌面）接触。从第二个画面到第三个画面，手指与地面“相互较劲”，因此手指以准静态方式相应变形。当手指与地面分离时，接触过程中积累的势能转化为手指的动能。此时手指开始动态运动，直到第四个画面所示的时刻：弯折阶段结束，翻转阶段开始。在第五和第六个画面中，随着纸条尖端向右移动，进入手指围成的口袋区域，手指向下回弹，正如上一段所述。如图8b所示，弯折-翻转技术也成功应用于整张 A4纸；而较大的 x 值（因此也有较大的 δ）可能导致图8c所示的失败。图8d展示了由弯折-翻转操作进一步实现的连续完整翻页。另请参阅视频附件。

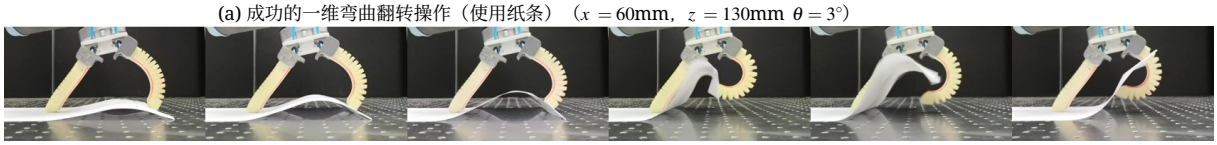
最后，我们还在具有不同特性的其他纸张样品上测试了弯折翻转操作技术。初始手部构型再次由公式 2 和 3 选取。总体而言，可以看出，纸张样品的刚度（即克/平方米）越大，成功率越高。

VI. 结论

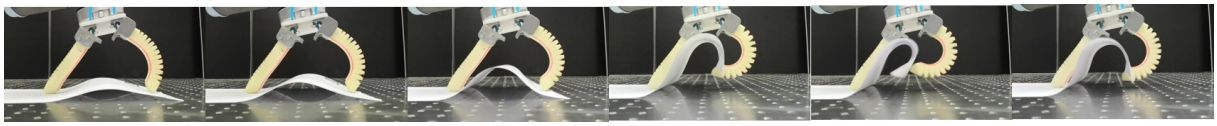
本文提出了一种弯曲与翻转操作技术，通过利用物体变形的动力学来抓取柔性物体。该技术



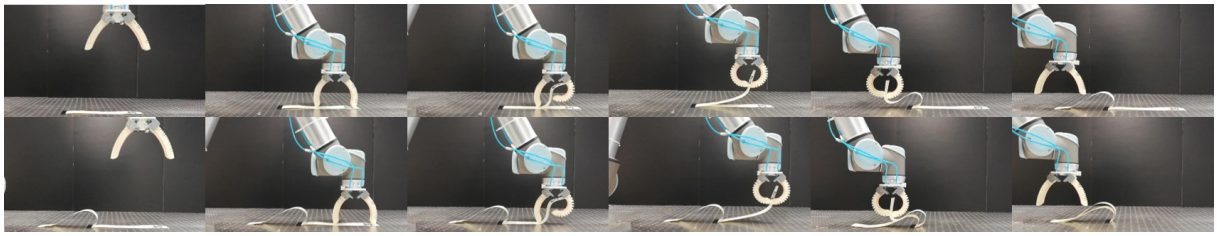
(a) 成功的一维弯曲翻转操作（使用纸条）（$x = 60\text{mm}$，$z = 130\text{mm}$ $\theta = 3°$）



(b) 成功的二维弯曲翻转操作（使用整张A4纸）（$x = 50\text{mm}$，$z = 120\text{mm}$ $\theta = 12°$）



(c) 未成功的二维弯曲翻转操作（$x = 60\text{mm}$，$z = 120\text{mm}$ $\theta = 12°$）



(d) 连续翻页（从左到右、从上到下）

图8：(a)-(c) 弯曲翻转操作的快照。(d) 基于弯曲翻转的连续翻页。

表II：使用多种纸张样品进行的翻页实验

纸张类型	成功次数/试验次数	成功率
书写纸（70 克/平方米）	51/65	78.5%
打印纸（80 克/平方米）	56/65	86.2%
水纹纸（100 克/平方米）	58/65	89.2%
纹理纸（140 克/平方米）	62/65	95.4%
牛皮纸（160 克/平方米）	59/65	90.7%
彩色卡纸（200 克/平方米）	61/65	93.8%

通过一组翻页任务实验进行了验证。未来工作的可能方向包括利用触觉反馈估计摩擦力以增强鲁棒性，以及将该技术推广至可变形二维平面物体的抓取。

参考文献

[1] H. Wakamatsu 和 S. Hirai，《基于微分几何的线状物体变形静态建模》，国际机器人研究期刊，第 23 卷，第 3 期，第 293–311 页，2004 年。[2] M. Moll 和 L. Kavraki，《可变形线性物体的路径规划》，*IEEE*机器人学汇刊，第 22 卷，第 4 期，第 625–636 页，2006 年。[3] A. Ladd 和 L. Kavraki，《运用运动规划解开绳结》，国际机器人研究期刊，第 23 卷，第 7–8 期，2004 年。[4] H. Wakamatsu、E. Arai 和 S. Hirai，《可变形线性物体的打结／解结操作》，国际机器人研究期刊，第 25 卷，第 4 期，2006 年。[5] M. Saha 和 P. Isto，《可变形线性物体的操作规划》，*IEEE*机器人学汇刊，第 23 卷，第 6 期，第 1141–1150 页，2007 年 12 月。[6] T. Matsuno 和 T. Fukuda，《基于传感器信息的拓扑模型对柔性绳索进行操作》，载于*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议论文集，2006 年 10 月。[7] S. Miller、J. van den Berg、M. Fritz、T. Darrell、K. Goldberg 和 P. Abbeel，《机器人折叠衣物的几何方法》，国际机器人研究期刊，第 31 卷，第 2 期，第 249–267 页，2012 年。

[8] L. U. Odhner、R. R. Ma 和 A. M. Dollar，《受人类操作策略启发的欠驱动手开环精确抓取》，*IEEE*自动化科学与工程汇刊，第 10 卷，第 3 期，第 625–633 页，2013 年。[9] J. Young 和 I. R. Nourbakhsh，《装订书页的低开销操作》，载于*IEEE*机器人与自动化国际会议，*2004*年。*ICRA'04*会议录。*2004*，第 5 卷。IEEE，2004 年，第 4326–4331 页。[10] K. M. Lynch 和 M. T. Mason，《动态非抓取操作：可控性、规划与实验》，国际机器人研究期刊，第 18 卷，第 1 期，第 64–92 页，1999 年。[11] M. T. Mason，《机器人操作力学》。MIT 出版社，2001 年。[12] A. Specian、C. Mucchiani、M. Yim 和 J. Seo，《机器人边缘滚动操作：一种抓取规划方法》，*IEEE*机器人与自动化快报，第 1–1 页，2018 年。[13] C. H. Kim 和 J. Seo，《浅深度插入：通过机器人手内操作将销钉插入浅孔》，*IEEE*机器人与自动化快报，第 4 卷，第 2 期，第 383–390 页，2019 年 4 月。[14] A. Nazir 和 J. Seo，《通过摇摆与行走操作实现被动动态物体运动》，载于机器人与自动化（*ICRA*），*2019*年*IEEE*国际会议。IEEE，2019 年，第（即将发表）。[15] S. Hirose 和 Y. Umetani，《用于多功能机器人手的软夹持器开发》，机构与机器理论，第 13 卷，第 3 期，第 351–359 页，1978 年。[16] L. U. Odhner、L. P. Jentoft、M. R. Claffee、N. Corson、Y. Tenzer、R. R. Ma、M. Buehler、R. Kohout、R. D. Howe 和 A. M. Dollar，《用于鲁棒操作的柔顺型欠驱动手》，国际机器人研究期刊，第 33 卷，第 5 期，第 736–752 页，2014 年。[17] B. Mosadegh、P. Polygerinos、C. Keplinger、S. Wennstedt、R. F. Shepherd、U. Gupta、J. Shim、K. Bertoldi、C. J. Walsh 和 G. M. Whitesides，《用于快速驱动软体机器人的气动网络》，先进功能材料，第 24 卷，2170，2014 年 4 月 15 日，第 2163 页。[18] H. K. Yap、H. Y. Ng 和 C.-H. Yeow，《用于软体机器人应用的高力软体可打印气动装置》，软体机器人学，第 3 卷，第 3 期，第 144–158 页，2016 年。[19] E. Olson，《AprilTag：一种鲁棒且灵活的视觉基准系统》，载于*IEEE*机器人与自动化国际会议（*ICRA*）论文集。IEEE，2011 年 5 月，第 3400–3407 页。