

# 受夹紧抓手启发的软重新抓取工具

Takuya Kiyokawa<sup>1</sup> Zhengtao Hu<sup>2</sup>, Weiwei Wan<sup>1</sup>, and Kensuke Harada<sup>1,3</sup>,

**Abstract**—重新抓取固定装置是减少机器人装配中姿态不确定性的一种有前景的方法，但传统的刚性固定装置缺乏适应性，并且需要为每个零件进行专门设计。为了克服这一限制，我们提出了一种受夹紧转变现象启发的软夹具，它可以连续变形以适应多种对象几何形状。通过将三角金字塔形工具压入膜中并排出封闭空气，形成一个稳定的腔体作为放置空间。我们进一步优化了冲压深度，以平衡放置稳定性和抓取器可达性。在基于软夹具的重新抓取过程中，关键挑战在于优化腔体大小以实现精确放置；一旦零件可靠地放置好，后续抓取可以减少不确定性进行操作。相应地，我们在十种不同形状的机械零件上进行了下落实验，大多数对象的放置成功率超过 80%，圆柱形对象则超过了 90%，而失败主要是由几何约束和膜特性引起的。这些结果表明，所提出的夹具实现了通用、精确且可重复的重新抓取，同时也明确了其当前的局限性和作为刚性固定装置实用替代品在装配自动化中的未来潜力。

## I. 介绍

近年来，为了快速灵活地适应产品类型和数量的波动，市场对变种多样化生产的需求日益增加。为实现这样的生产系统，机器人装配必须能够以通用性和精确性处理多样化的零件。

机器人装配中的一个重大挑战是抓取不确定性，这可能会显著降低后续插入或对齐任务的定位精度。重新抓取是指将初始抓取的部分放置、重新对齐并再次抓取的过程，已被证明在缓解这种不确定性方面有效 [1]。然而，大多数现有方法依赖于具有固定几何形状的刚性夹具 [2]，对于处理短生命周期和多样化产品的生产线来说并不实用。这一限制促使需要能够灵活适应不同零件形状的重新抓取工具。

为满足这一需求，我们提出了一种灵感来自夹紧抓手的灵活夹具。如图 1(a) 所示，该夹具由硅胶膜包围的玻璃珠组成，其周边通过一个圆形刚性环固定。该薄膜易于变形，如图 1(b) 所示，可以生成可重新配置的空腔。具体来说，通过将三角金字塔形状的部分压入膜中并固化结构，如图 1(c) 所示，可以创建各种大小的三角金字塔形空腔。该机制为重新抓取任务提供了生成适应性空腔的多功能手段。

在这项研究中，我们通过结合最终放置姿态 [3] 的

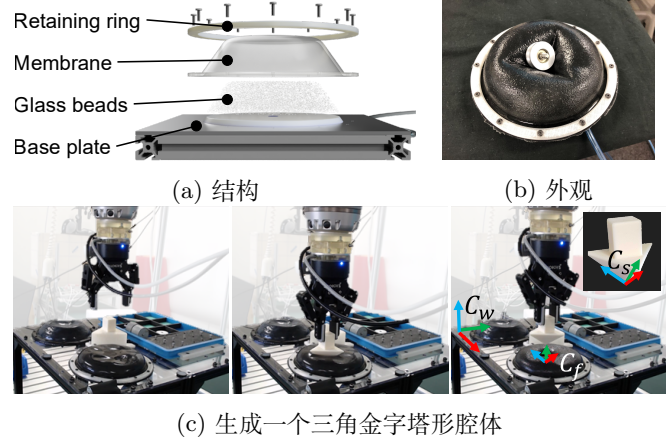


Fig. 1: 受干扰夹具启发的软固定装置

稳定性分析和抓取及轨迹生成的可行性 [1] 来扩展现有的重新抓取规划方法。然后，我们通过实验评估所提出的夹具，重点在于三角锥形腔体生成的精度和物体掉落试验，因为一旦能够可靠地进行掉落操作，后续的重新抓取就可以在降低不确定性的情况下实现。通过对十个不同形状的对象进行测试，我们也展示了具有代表性的成功和失败案例，以阐明方法的局限性和未来的研究方向。

## II. 相关工作

### A. 基于重新抓取的不确定性减少

重新抓取已被广泛研究作为一种有效手段来减少姿态不确定性并提高机器人装配的成功率。早期的工作探索了使用刚性支撑：Hu 等。[2] 分析了带有刚性夹具的重新抓取，表明可以通过利用与预定义几何形状稳定的接触来减少姿态不确定性。与此同时，Roa 等。[4] 提出了在抓取空间中使用独立接触区域的准静态重新抓取规划方法，保证了手指重新定位时的力量闭合。

在此基础上，近期的方法利用了感知和学习。Bauza 等。[5] 开发了简单，一个通过仿真来整合任务意识抓取、基于触觉的姿态估计以及图论再抓规划

的视觉触觉框架。Wada 等。[6] 引入了重新定向机器人，该方法结合了学习到的关键点选择与传统运动规划，以实现动态单步重定向和双臂特定姿态放置的再抓取。

一个互补的方向侧重于利用环境和重力的外在动作来减少不确定性。Drigalski 等。[7] 提出了一个具有不确定意识的操作规划器，该规划器使用放置、抓取和推挤环境等动作，在没有专用夹具的情况下最小化姿态不确定性。

超越工业的拾取和放置，研究人员将重新抓握扩展到了特定领域和复杂任务。Chiu 等人士。[8] 研究了双臂缝合针的重新抓握，在手术环境中利用基于自我中心状态空间的强化学习来快速生成双臂轨迹。Qin 等。[9] 进一步将双臂重新抓握应用于长变形带的操控，提出了一种与移动操作集成的分层规划器，以在受限工业环境中实现连续的重新抓握。

这些研究共同强调了重新抓取在提高装配任务的灵活性和鲁棒性方面的潜力，同时往往依赖于限制通用性的运动学或特定任务假设。

#### B. 基于夹具的不确定性降低

同时，广泛的研究集中在夹具和工装设计上，以实现零件的稳定固定和精确定位。Grippio 等。[10] 和 Whybrew 等。[11] 提出了模块化工装系统，该系统结合了定位器、夹紧装置和支持件，同时有几个小组开发了在压力下能适应物体形状的针阵列设备 [12]–[14]。这些刚性工装能够实现高精度定位，但缺乏对变种-品种生产的适应性。

为了解决这一限制，软体机器人技术已被应用于夹具设计。布朗 等。[15] 引入了一种填充颗粒的夹紧抓手，能够适应多种物体几何形状。受此原理启发，提出了用于机器人组装任务的夹紧夹具 [16], [17]，其中可变形膜在减压后适应形状并固定物体。Kemotsu 等。[18] 进一步开发了一种两步形状自适应的气球针阵列抓手，结合了针的轴向滑动和径向气球充气以实现即使在不对齐的情况下也能稳定抓取；然而，其密集的针排列可能会限制固定后的可接触区域，从而限制其在拆卸任务中的适用性。近期，Aoyama 等。[19] 提出了一个受人手指启发的壳型混合夹爪，用于农产品的紧凑包装；Hu 等。[20] 则提出了一种双模式包围式软夹爪，具有可调刚度和高负载能力，能够实现基于收缩和吸力的抓取。

这些工作展示了自适应软夹具在通用固定中的潜力。在此基础上，我们的研究探讨了这类可变形夹具是否也可以作为有效重新抓取工具，在机器人拆卸任务中发挥作用。虽然重新抓取的研究主要集中在规划和感知上，而夹具研究则侧重于可适应的固定，很少有作品将软性、可变形夹具整合到重新抓取框架中。这一差距促使我们对用于减少基于重新抓取的不确定性的夹紧灵感夹具进行了调查。

### III. 重新抓取的放置规划

#### A. 预条件

使用配备有两个平行夹指的机器人手臂、一个放置在工作范围内的三角锥形部件以及一个柔性夹具，执行刚性组件的重新抓取。为了进行重新抓取，我们首先确定夹具上的凹槽的位置和大小，以及物体的下落姿态和最终放置姿态，后者将根据稳定性分析稍后定义。然后，被夹爪抓住的三角锥形物体被压在夹具的表面上。当物体被压实时，从夹具中抽出空气以引发紧塞转变，这增加了内部颗粒材料的密度并使夹具固定在其变形形状。

固化后，三角金字塔物体返回其原始位置，并随机选择一个目标部件。然后将该部件放入软膜形成的空腔中。使用 RGB-D 相机识别部件掉落后的放置状态。最后，在物体稳定放置后，重新抓取并系统进入实际组装任务。

#### B. 基于可行性和稳定性的模腔压制

在形状形成过程中，定义了用于压基准物体的目标坐标系原点  $C_f$ ，如图 1(c) 所示。从物体的源坐标系  $C_s$  到  $C_f$  的变换矩阵  ${}^{C_s}T_{C_f}$  被计算出来，并据此生成轨迹。框架  $C_f$  的方向使得三个轴都与水平面形成  $45^\circ$  角。

每个放置姿态的稳定性评估采用两阶段标准。首先，我们使用简化的费拉里-坎尼方法 [21]：计算在压深  $D$  处的力偶空间

$$W_{L_\infty}(D) = \text{ConvexHull}\left(\left\{\bigoplus_{i=1}^m \mathbf{w}_i \mid \mathbf{w}_i \in W_i\right\}\right), \quad (1)$$

，其中  $\bigoplus$  表示闵可夫斯基和， $W_i$  是在第  $i$  个接触点处的力偶集，而  $\mathbf{w}_i \in \mathbb{R}^6$  是接触  $i$  产生的力偶（力和力矩）。如果重力扳手  $\mathbf{w}_g$  位于  $W_{L_\infty}(D)$  内部，则该姿态被视为稳定放置姿态（SPP）。如果不满足此条件，

我们将退回到几何检查：计算接触点  $c_i(D)$  投影到支撑平面上的凸包  $\mathcal{P}(D) = \text{ConvexHull}(\{c_i(D)\}_{i=1}^m)$ ，如果质心  $p_g$  的垂直投影位于  $\mathcal{P}(D)$  内部，则该姿态也被接受为 SPP。通过垂直平移此 SPP 获得的姿态定义为确定性掉落姿态 (DDP)。

基于此评估，我们确定三角锥形腔体的冲压深度  $D$ ，该深度既能提供足够的稳定裕度，又能获得最多的可行抓取候选数量 [1]。冲压深度  $D$  进一步优化了这一几何形状，因为更深的腔体通常会增加稳定性但限制接近方向，而较浅的腔体会提高可达性但减少稳定性。令  $N_g(D)$  表示允许至少一种无碰撞接近方式的可行抓取候选数量。稳定裕度  $M(D)$  定义为

$$M(D) = \begin{cases} \min_{w \in \partial W_{L_\infty}(D)} \|w - w_g\|_2, & w_g \in W_{L_\infty}(D), \\ \text{dist}(p_g, \partial \mathcal{P}(D)), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\text{dist}(p_g, \partial \mathcal{P}(D))$  表示从质心投影到支撑多边形边界之间的最小距离。

最优压印深度  $D^*$  选择为

$$D^* = \arg \max_{D \in [D_{\min}, D_{\max}]} \lambda N_g(D) + (1 - \lambda) M(D), \quad (3)$$

其中  $\lambda \in [0, 1]$  是一个权衡抓取可行性与稳定性的加权因子。直观地说， $M(D)$  衡量重力矩距位于可行扭距多面体内部的程度，而  $N_g(D)$  计算剩余的可行抓取姿态数量；因此它们的加权组合平衡了物理稳定性和操作可达性。

图 2 说明了本研究中使用的设置和分析过程。图 2 (a) 展示了用于稳定性评估的简化仿真模型，其中腔体几何形状和物体以足够的保真度表示，同时保持计算可行。图 2 (b) 展示了一个在物体表面生成候选抓取姿态的例子。图 2 (c) 可视化了稳定性分析的结果，其中质心（红色点）被投影到支撑平面上，并由接触点的凸包（灰色区域）包围。这些分析用于确定给定的姿态是否可以被视为稳定的放置姿态。

#### IV. 适用于三角金字塔空腔的软夹具

腔体生成过程涉及制造一个带有手柄的凸三角金字塔形部件，该部件被机械臂抓取并压在柔性膜上。随后，从夹具中抽出空气以形成所需的腔体。图 3 显示了带手柄的凸三角金字塔部件被压在夹具表面的情景。三角金字塔的高度设计为与夹具的垂直厚度相匹

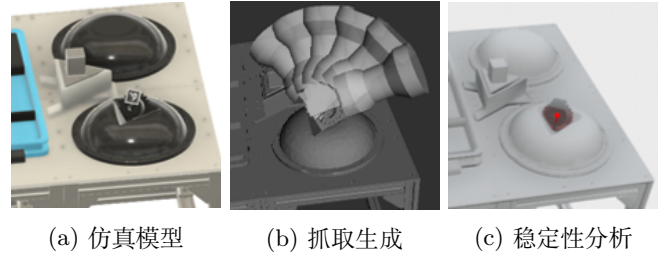


Fig. 2: (a) 稳定性评估的仿真模型示例，(b) 生成的抓取示例，以及 (c) 显示质心和接触点凸包的稳定性分析结果。

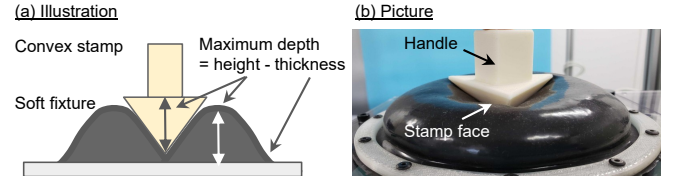


Fig. 3: 生成的三角金字塔模和由此产生的腔体的几何形状。

配，包括包裹珠子和空气的膜。

在吸气过程中，膜内的颗粒材料密度增加，触发了堵塞转变，将内部状态从流体状转变为固体状。这导致形成一个刚性、凹形的三角金字塔形状的空腔。通过这一过程，在放置的对象与夹具之间形成了坚固的接触面。夹具的内部气压通过连接到夹具空气入口端口的一根软管进行控制。该软管通过一个开关阀连接到泵上，使得可以通过切换阀门实现真空状态的二进制开/关控制。

夹具设计遵循了先前研究中开发的软夹具概念 [16]。膜由硅橡胶制成（厚度为 1 毫米，肖氏 A 硬度 2，Dragon Skin FX-Pro），以提供高弹性和摩擦力及耐用性。袋子的容量约为 296 厘米<sup>3</sup>，填充有 1 毫米玻璃珠，这些玻璃珠具有防腐蚀性能，并且能够实现可重复的夹紧转换。膜表面的曲率半径约为 60 毫米，使夹具具有足够的变形能力以生成不同大小的空腔。当使用外部泵抽真空时，内部压力大约降低 90 千帕，从而使夹具硬化以牢固地固定物体。在压印之前，通过短暂施加正压重置膜的初始形状，因为固定的性能很大程度上依赖于起始表面条件。硅橡胶膜的高摩擦系数（滑动测试中测量约为 1.97 [16]）也有助于与目标部件保持稳定接触。这些设计选择通过初步试验确定，提供了变形性和坚固性之间的最佳平衡：1 毫米厚的膜在不撕裂的情况下最大化了变形，而 1 毫米玻璃珠则是在抽真空时流动性和夹紧后的刚性之间的一种折中。总体而言，这种配置使夹具能够适应不同的物体几何形状，在重新抓取过程中保持足够的刚性。

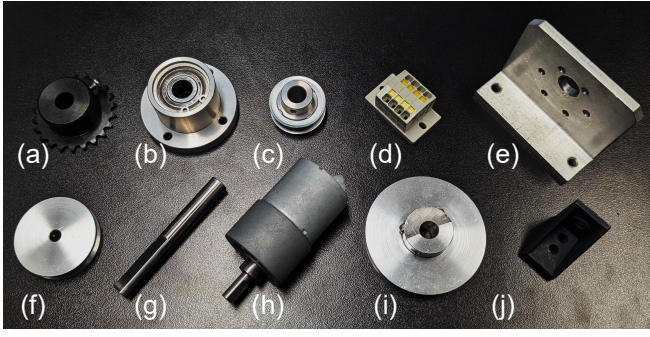


Fig. 4: 用于我们实验的目标对象。

TABLE I: 目标对象信息

| 对象 ID | 类型                  | 质量 [克] | 长 × 宽 × 高 [毫米] |
|-------|---------------------|--------|----------------|
| (a)   | Sprocket            | 106    | 48x48x18       |
| (b)   | Bearing Holder      | 119    | 54x54x30       |
| (c)   | Timing Pulley       | 19     | 32x32x20       |
| (d)   | Terminal Block      | 12     | 23x39x20       |
| (e)   | L-Bracket for Motor | 75     | 25x70x60       |
| (f)   | Idler Pulley        | 32     | 42x42x10       |
| (g)   | Shaft               | 45     | 10x10x75       |
| (h)   | Geared DC Motor     | 190    | 37x82x37       |
| (i)   | Round Belt Pulley   | 84     | 62x62x20       |
| (j)   | Small L-Bracket     | 14     | 20x30x30       |

## V. 性能评估

### A. 概述

为了评估提出的夹具辅助重新抓取的方法，我们进行了两项实验：(1) 测量通过按压凸形形状生成的三角棱锥状空腔与理想目标形状之间的偏差，以及(2) 评估零件掉落试验的成功率和重复性。如图 1 所示，实验设置包括开发的柔性夹具、使用 3D 打印机制造的用于在夹具表面生成空腔的凸三角棱锥形部件，以及配备有两个手指抓取器的机械臂。对于实验 (1)，我们还使用 Intel RealSense D455 深度相机来获取三维信息。对于实验 (2)，方程 (3) 中定义的权重因子经验性地设置为  $\lambda = 0.5$ ，在初步试验中提供了稳定性和抓取可行性之间的良好平衡，这个值用于所有后续的实验。用  $\lambda \in [0.3, 0.7]$  进行敏感度检查产生了相同的定性趋势，表明优化不会对  $\lambda$  中的适度变化过于敏感。

图 4 展示了实验中使用的十种不同类型的目标对象。这些包括常见的机械部件，如链轮、皮带轮、支架和轴等，在实际任务中必须精确组装。表 I 提供了这些对象的详细信息，包括类型、质量和尺寸。所有十个物体都在两个实验中使用，以验证所提出的夹具的通用性。

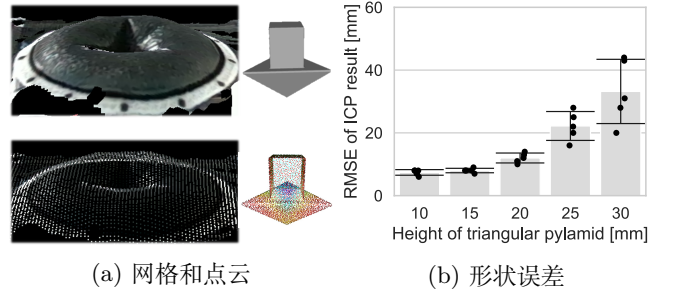


Fig. 5: 目标形状与生成形状的对比

### B. 生成的三角金字塔形状

为了量化生成的三角锥形状与理想目标形状之间的差异，使用深度传感器获取深度信息。在本实验中，通过计算生成形状和采用所提方法规划的目标三角锥形状之间的几何误差来评估柔性夹具的形状生成性能。具体而言，在生成的三角锥形区域轮廓内从传感器获得的深度图像中提取点云数据。然后使用 RANSAC (随机抽样一致性) 和 ICP (迭代最近点) 将该点云与目标三角锥形状的点云表示进行配准。注册残差误差用作评估指标。

图 5 (a) 显示了生成的形状 (左侧列) 和目标形状 (右侧列) 的网格 (顶部行) 和点云 (底部行) 表示。定性来看，这些形状非常相似，并且即使手动放置物体试验也表明物体很容易落入腔体底部。图 5 (b) 显示了定量的形状误差。在进行点云配准后的均方根误差 (RMSE) 最多为 4.4 [mm]，这表明表面几何偏差足够小。考虑到目标零件的特征尺寸范围是 30–80 mm，这个最大误差 4.4 mm 相对较小，并且没有明显影响物体落入腔体的能力或整体放置精度。这个误差相当于典型部件大小的不到 6%，并且手动测试确认物体仍然可以稳定地放入。

为了防止柔性膜受损，在 3D 打印过程中压紧组件的边缘进行了倒角处理。因此，产生的凹边比之前研究中使用的刚性夹具 [2] 更加光滑。这种边缘锐度的不同有时会导致物体最终静止位置出现轻微变化。提高膜的耐用性可能会进一步提升精度。

### C. 部分删除准确性

对于所有十个物体，方程 (3) 中的优化成功应用于全部十个物体，没有出现失败情况，展示了该优化流程在不同几何形状下的鲁棒性。使用所提出方法计划的 SPP-DDP 对进行了下落实验，以评估与预定尺寸相对应的空腔中物体放置的准确性。所有十个物体

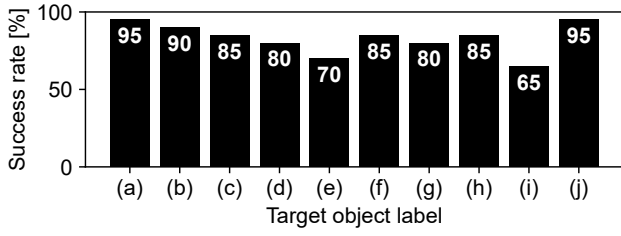


Fig. 6: 安放性能。X 轴标签对应于图 4 中分配的对象标签。

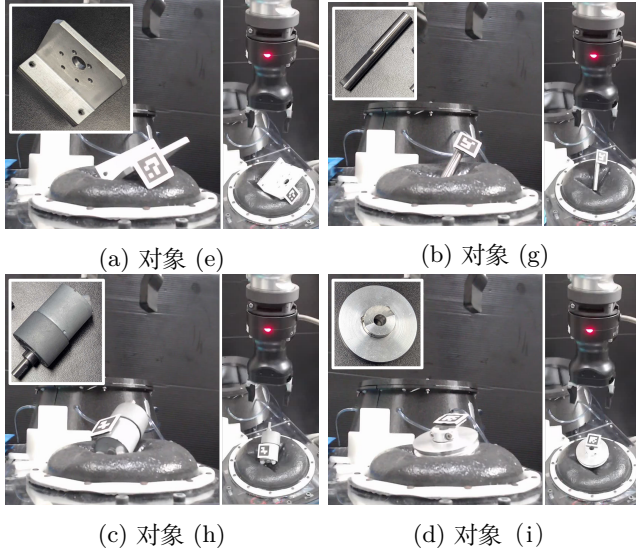


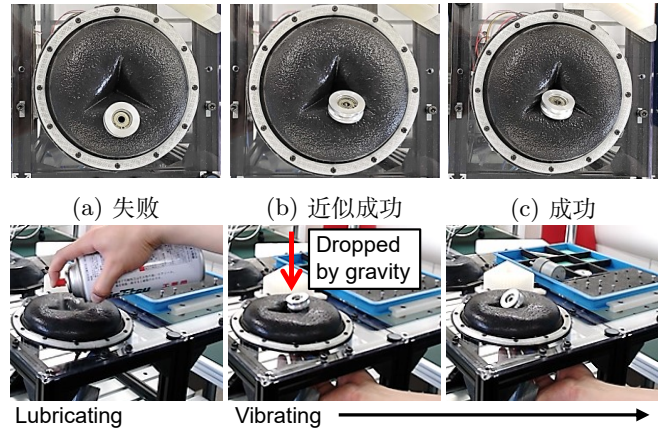
Fig. 7: 物体 (e)、(g)、(h) 和 (i) 的最终放置状态。即使在成功的情况下，物体也只是勉强稳定，经常以倾斜或危险的角度静止。

都进行了测试，并且每个物体进行了 20 次下落实验。当由视觉标记检测到的位置和方向误差分别在 5 毫米和  $5^\circ$  以内时，则认为该试验成功。

垂直下落高度设置为腔体最大深度的两倍(图 3)，这一数值在初步测试中被实证能够最小化放置失败的情况。如果下落高度过小，由于姿态不确定性，零件可能会提前接触到夹具边缘，导致不稳定或有偏倚的放置。相反，过大的下落高度会增加接触时的冲击力，并且常常因为硅膜的弹性而引起反弹。将高度设置为大约腔体深度的两倍，在这些效应之间提供了一个平衡，使得零件能够可靠地沉降到腔体底部。

图 6 显示了实验中获得的成功率 [%]。总体而言，提出的方法实现了较高的成功率，大多数对象超过了 80%。特别是，对象 (a)、(b) 和 (j) 达到了 90% 或更高。相比之下，对象 (e)、(g)、(h) 和 (i) 表现出较低的成功率，为 65–80%。

图 7 展示了物体 (e)、(g)、(h) 和 (i) 在下落后的



(d) 导出滑到底部的部分的过程

Fig. 8: 失败和成功案例。

最终放置状态。这些情况说明了具有倾斜或不对称表面的零件固有的困难：几何干涉阻止了物体完全到达腔体底部，因此即使一次试验被计为“成功”，所得到的放置也往往是勉强稳定的。对于剩余的圆柱形零件，大多数失败的放置则是由于撞击后的弹跳或滑入腔体不足引起的，这两者都与硅胶膜的弹性及摩擦特性有关。

这些结果表明，虽然复杂形状的部件（例如滑轮或轴承支架）仍然具有挑战性，但提出的柔性夹具系统为各种小型机械零件提供了稳定且可重复的重新抓取性能。

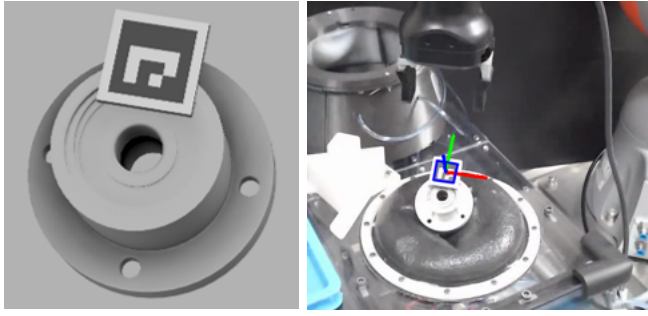
## VI. 讨论

在实验过程中，小型轻质零件常常无法可靠地沉到底腔的底部。即使它们进入了底腔，最终的姿态有时也会显著偏离期望的配置。这些问题主要是由硅胶膜的弹性引起的跳跃以及高表面摩擦导致的平滑滑动受阻所造成的。

在未来部署中，可以通过表面润滑和外部振动等简单措施来减轻这些影响。作为初步检查，我们在零件子集上测试了这些干预措施，并观察到整体成功率大约提高了 5%，这表明此类改进有明确的潜力可以提升所提出的方法。

图 8 说明了另一个圆柱形形状的代表性结果，包括失败的放置 (Failure)、接近成功的案例 (Near-miss) 和成功放置 (Success)。失败通常有两种类型：(i) 零件完全无法滑动并在空腔边缘附近停止，以及 (ii) 零件部分滑动但中途停止。

在前者情况下，由于零件没有与腔表面啮合，因



(a) AR 标记附着 (b) 检测到 AR 标记

Fig. 9: 投落实验中使用的 AR 标记。

此通过振动恢复是困难的。然而，在后者情况下，零件仍然部分接触斜面，并且振动能够诱导成功定位。在成功的案例中，零件以类似于刚性三角金字塔夹具的方式到达腔底，从而实现可靠的重新抓取。

另一个限制来自于实验设置。为了测量物体姿态，在每个目标部件上附加了一个轻量级的 AR 标记板（2 克，25 毫米 × 25 毫米 × 2 毫米），如图 9 所示。尽管增加的质量很小（2 克），但偏移产生的扭矩变化对于轻质部件是明显的，有时会改变它们的稳定姿态与没有标记时的情况相比。虽然在估计可达性和压印深度时对标记偏移进行了建模，但附加的板不可避免地改变了重心，产生了与实际组件不同的质量分布。这种差异代表了当前评估的一个限制。

## VII. 结论

本研究提出了一种使用可变形软夹具进行抓取转换的规划和执行框架。我们展示了如何在夹具表面生成金字塔形空腔，并引入了深度可达性优化以平衡放置稳定性和抓取可行性。

实验中使用了十种不同的部件，确认了高成功率，特别是对于圆柱形物体。然而，轻质和几何受限的部件仍然具有挑战性，原因包括在斜面上发生弹跳、摩擦或困住。

虽然简单的干预措施如润滑和振动改善了结果，但这些措施是临时性的，需要系统性的解决方案。

另一个限制来自于用于姿态检测的 AR 标记，这会改变重心，并可能无法完全反映实际部件的行为。

未来的工作将解决这些限制并扩展夹具辅助装配规划。我们旨在将柔性夹具集成到考虑部件间和部件与夹具关系的序列优化框架中 [22], [23]，将其与姿态估计相结合 [24]，并探索自适应生成凸三角锥压紧工具，其尺寸和几何形状根据目标零件的稳定性分析来

选择。这些方向将进一步提高装配自动化中柔性重新抓取的通用性和鲁棒性。

## REFERENCES

- [1] W. Wan and K. Harada, "Regrasp planning using 10,000s of grasps," in *Proc. IEEE/RSJ IROS*, 2017, pp. 1929–1936.
- [2] Z. Hu, W. Wan, K. Koyama, and K. Harada, "Reducing uncertainty using placement and regrasp planning on a triangular corner fixture," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 652–670, 2024.
- [3] T. Tsuji, K. Harada, and K. Kaneko, "Easy and fast evaluation of grasp stability by using ellipsoidal approximation of friction cone," in *Proc. IEEE/RSJ IROS*, 2009, pp. 1830–1837.
- [4] M. A. Roa and R. Suarez, "Regrasp planning in the grasp space using independent regions," in *Proc. IEEE/RSJ IROS*, 2009, pp. 1823–1829.
- [5] M. Bauza, A. Bronars, Y. Hou, I. Taylor, N. Chavan-Dafle, and A. Rodriguez, "SimPLE, a visuotactile method learned in simulation to precisely pick, localize, regrasp, and place objects," *Science Robotics*, vol. 9, no. 91, 2024.
- [6] K. Wada, S. James, and A. J. Davison, "ReorientBot: Learning object reorientation for specific-posed placement," in *Proc. IEEE ICRA*, 2022, pp. 8252–8258.
- [7] F. von Drigalski, K. Kasaura, C. C. Beltran-Hernandez, M. Hamaya, K. Tanaka, and T. Matsubara, "Uncertainty-aware manipulation planning using gravity and environment geometry," *IEEE RA-L*, vol. 7, no. 4, pp. 11 942–11 949, 2022.
- [8] Z.-Y. Chiu, F. Richter, E. K. Funk, R. K. Orosco, and M. C. Yip, "Bimanual regrasping for suture needles using reinforcement learning for rapid motion planning," in *Proc. IEEE ICRA*, 2021, pp. 7737–7743.
- [9] Y. Qin, A. Escande, F. Kanehiro, and E. Yoshida, "Dual-arm mobile manipulation planning of a long deformable object in industrial installation," *IEEE RA-L*, vol. 8, no. 5, pp. 3039–3046, 2023.
- [10] P. M. Grippio, M. V. Gandhi, and B. S. Thompson, "The computer-aided design of modular fixturing systems," *The Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, vol. 2, no. 2, pp. 75–88, 1987.
- [11] K. Whybrew and B. K. A. Ngoi, "Computer aided design of modular fixture assembly," *The Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, vol. 7, pp. 267–276, 1992.
- [12] A. Mo and W. Zhang, "A novel universal gripper based on meshed pin array," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 16, no. 2, 2019.
- [13] P. Shi, Z. Hu, K. Nagata, W. Wan, Y. Domae, and K. Harada, "Development of a shape-memorable adaptive pin array fixture," *Adv. Robot.*, vol. 35, no. 10, pp. 591–602, 2021.
- [14] J. W. Park, J. Park, H. Kim, N. Kim, and D. Y. Kim, "Assembly part positioning on transformable pin array fixture by active pin maximization and joining point alignment," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 1047–1057, 2022.
- [15] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, and H. M. Jaeger, "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," *PNAS*, vol. 107, no. 44, pp. 18 809–18 814, 2010.

- [16] T. Kiyokawa, T. Sakuma, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, "Soft-jig-driven assembly operations," in *Proc. IEEE ICRA*, 2021, pp. 3466–3472.
- [17] T. Sakuma, T. Kiyokawa, J. Takamatsu, T. Wada, and T. Ogasawara, "Soft-jig: A flexible sensing jig for simultaneously fixing and estimating orientation of assembly parts," in *Proc. IEEE ICRA*, 2022, pp. 10 945–10 950.
- [18] Y. Kemmotsu, K. Tadakuma, K. Abe, M. Watanabe, and S. Tadokoro, "Balloon pin-array gripper: Two-step shape adaptation mechanism for stable grasping against object misalignment," *IEEE RA-L*, vol. 9, no. 11, pp. 9223–9230, 2024.
- [19] H. Aoyama, Z. Wang, and S. Hirai, "Shell gripper inspired by human finger structure for automatically packaging agricultural product," in *Proc. IEEE Humanoids*, 2022, pp. 90–95.
- [20] T. Hu, X. Lu, and D. Xu, "A dual-mode and enclosing soft robotic gripper with stiffness-tunable and high-load capacity," *Sens. Actuators A: Phys.*, vol. 354, 2023.
- [21] C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps," in *Proc. IEEE ICRA*, 1992, pp. 2290–2295.
- [22] K. Tariki, T. Kiyokawa, T. Nagatani, and J. Takamatsu, "Generating complex assembly sequences from 3D CAD models considering insertion relations," *Adv. Robot.*, vol. 35, no. 6, pp. 337–348, 2021.
- [23] T. Kiyokawa, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, "Assembly sequences based on multiple criteria against products with deformable parts," in *Proc. IEEE ICRA*, 2021, pp. 975–981.
- [24] T. Sakuma, T. Kiyokawa, T. Matsubara, J. Takamatsu, T. Wada, and T. Ogasawara, "Jamming gripper-inspired soft-jig for perceptive parts-fixing," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 62 187–62 199, 2022.