用于抓取杂乱食品的可更换夹持头夹爪

Prashant Kumar、Yukiyasu Domae、Weiwei Wan 和 Kensuke Harada

arXiv:2601.00305v1 [cs.RO] 1 Jan 2026

摘要——**食品包装行业中的食品种类及其重量变化迅速。这些食品从易于抓取的单件食物，到柔软、细长且杂乱的食品不等。我们提出了一种可更换夹持头夹爪系统，以应对杂乱食品基于重量的处理难题。该夹爪配备了专用食品夹持头（咬齿），可增强其抓取能力；传送带更换系统则可在包装作业期间切换处理不同食品。它提供丰富的控制选项，能够抓取并放下特定重量的颗粒状、杂乱及缠结类食物。我们专门针对两种形状各异的柔软食品设计了咬齿：鲑鱼籽和意大利面。它们分别代表了具有挑战性的黏性颗粒状食品，以及细长、黏性且杂乱的食品类别。**

夹爪成功抓取了意大利面和鲑鱼籽，并展示了按重量投放这些食品的能力，准确度分别超过 80% 和 95%。夹爪系统还能快速切换不同的咬齿，从而处理种类繁多的食品。

一、引言

AUTOMATED 食品处理系统日益受到关注，这主要是因为市场对稳定、高通量食品包装的需求不断增长。然而，便当制作的自动化仍面临重大挑战 [1]。便当盒是日本传统的单人份餐食，通常精心摆放着种类丰富的食品，例如米饭、鱼、蔬菜和配菜，它们的质地、形状和机械特性各不相同。便当盒自动化尤其困难，主要有三个因素：（1）便当盒中的相当一部分食材，如鲑鱼籽、意大利面和切碎的蔬菜，容易破损、变形、打滑或缠绕，因此难以可靠地抓取和摆放；（2）对高难度食品进行精准的重量控制对于确保份量一致性至关重要，尤其是在商业包装和热量控制方面；（3）食物类型种类繁多，要求夹爪能够快速适应不同的物理特性，而且每种食物的目标重量可能因便当盒而异，使处理过程更加复杂。

关于食品处理和食品盒包装，已有大量研究。一项广受关注的研究方向是开发软体夹持器，以最小的接触力温和地拾取食品 [2]–[5]。然而，这些方法通常仅限于处理在受控环境中分开放置的单件食物（例如浆果、炸鸡）。随后，进一步的研究利用视觉和基于学习的方法，将这一能力扩展到杂乱场景中的单个食品拾取 [6]。Ummadisingu 等人采用机器学习方法，从复杂、杂乱环境中识别并抓取孤立的食品。尽管

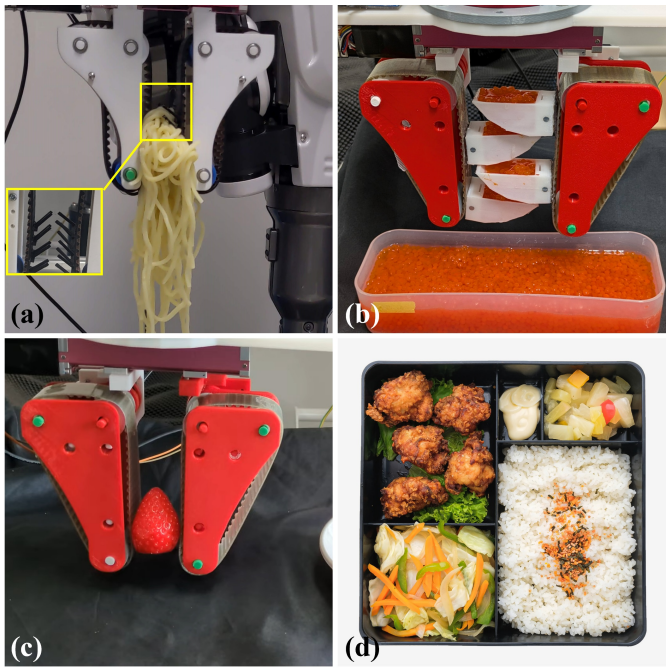

图 1. 使用适用于特定食物的咬齿夹取食物。(a) 夹取意大利面。(b) 夹取鲑鱼籽。(c) 夹取草莓。(d) 标准日式便当。

这些策略对于离散且彼此分离良好的食品十分有效，但这类食物类型仅占便当盒内容物的一小部分。大多数便当盒组成部分都具有颗粒状、相互缠绕或可变形的特点，例如卷心菜丝、香草或面条，因而带来了独特的操作挑战。一些研究人员通过设计能够适应不规则颗粒状食物的自适应夹爪，解决了这一问题。 [7]–[9]。这些方法主要尝试利用夹爪装置的适应性和柔软性，以抓取切碎的卷心菜、香草等颗粒状食物。然而，它们通常缺乏控制拾取或放下的食品数量的能力，尤其难以实现目标重量。

另一种常见方法是利用深度学习训练平行夹爪装置，以精确的重量夹取食物 [10], [11]。虽然这些方法在有限的场景中有效，但难以扩展到便当盒中通常包含的各种食物。对大型训练数据集和长时间训练的需求，限制了这些方法在动态食品包装环境中的实际应用。

为了满足便当盒自动化的独特需求，解决方案必须同时做到：(1) 对具有挑战性的食物类型进行可靠夹取；(2) 以受控且精准的重量放下食品；(3) 在各种食材之间快速适应。我们提出了一种以硬件为核心的机器人夹爪系统，能够应对这三项挑战。

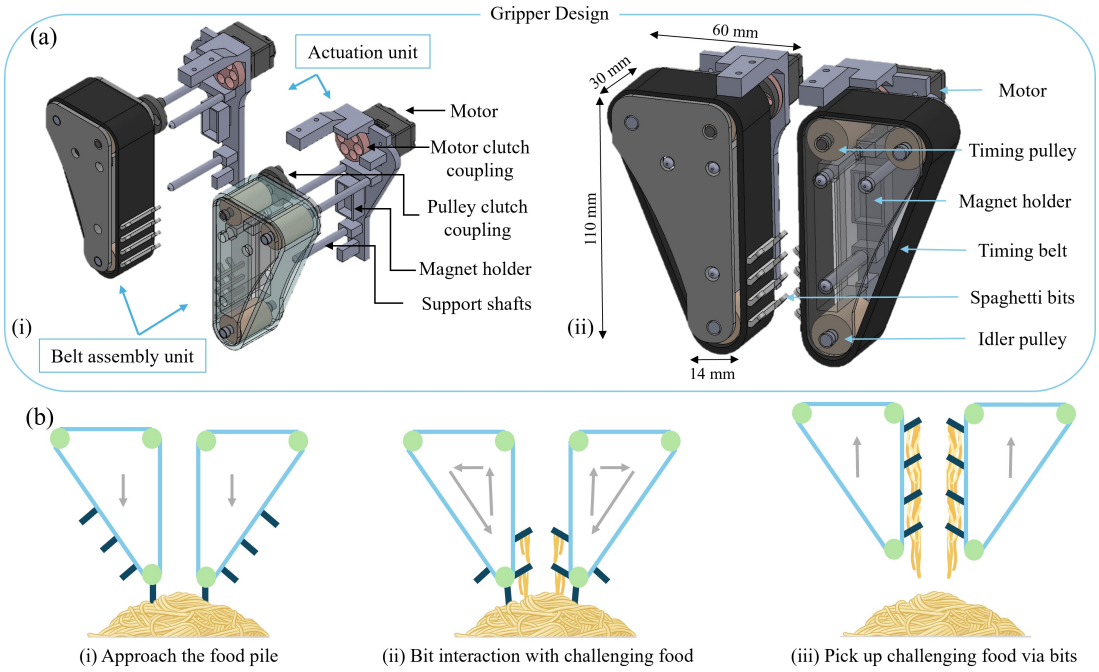

图 2。（a）夹爪设计：（i）夹爪装置的两个不同部分：驱动单元和皮带组件单元。（ii）皮带组件单元的组成部分。（b）夹爪的工作过程：（i）夹爪靠近食物堆，咬齿朝向食物，以便更容易插入。（ii）电机带动传送带转动，咬齿向上移动，与高难度食品相互作用并将其拾起。（iii）咬齿确保食物被牢固夹持，并在夹爪移开时保持原位。

受采用可移动皮带表面进行物体操作的松下夹持器设计启发 [12], , 我们的夹爪将食品专用附件（以下简称咬齿）集成到主动式传送带表面上。这种混合设计使夹爪能够以受控且符合重量要求的方式，拾取和释放复杂、易变形或缠结的食品——例如意大利面或鲑鱼籽。此外，我们还开发了自动换工具机构，可在不同食品专用附件之间快速切换。夹爪的全被动机构实现了轻松的工具切换，确保在不同食品类别之间平稳过渡，无需主动干预。

本文的贡献总结如下：1. 提出一种基于咬齿的夹爪，可有效处理高难度食品。2. 按重量定量投放食品，准确度超过 87%。3. 提出一种被动式快速换工具机构，用于在食品专用夹持器模块之间切换。4. 构建一套统一系统，能够按目标数量包装多种高难度、可变形食品，实现便当制作自动化。

II. 相关研究

食品盒包装研究主要包括单件食品拾取、颗粒状及难以处理的食品拾取，以及基于重量的食品拾取。这些研究共同使系统能够拾取所需重量的食物物品，并将其放入指定的便当盒中。我们在以下两个小节中总结了这些研究。

A. 机器人食物处理

机器人食品操作的尝试可追溯至数十年前。食品柔软且易损的特性一直使拾取工作颇具挑战 [13]。食品处理研究中很大一部分都在探索如何拾取单件食物。最受欢迎的方法之一是利用软体夹持器的适应性来处理易损食品 [1]–[5], [14]。[2]Kanegae 等人开发了一种圆形外壳状软体夹持器，可抓取各种形状的物体。Kumar 等人 [3] 开发了一种多模态夹持器，通过让软体夹持器环绕豆腐块，将其等易损物品拾起。另一种常见方法是利用触觉感知来观察食品的硬度或柔软程度，并相应调整抓取力，以便在不损坏食品的情况下完成抓取 [15],[16]；还有以操作策略为核心的食物获取策略，例如舀取 [17]。Ummadisingu 等人 [6] 更进一步，采用基于训练的方法，从杂乱环境中识别并抓取单件食物。

已开发的方法仅适用于单件食物。细长缠绕食物、黏性或易滑散粒状食物等具有挑战性的类别仍未得到探索。针对缠绕的颗粒状食物[8], [9], [18]–[20]，研究者采用了多种方法。Wang 等人 [8] 通过开发一种能够舀取切碎的卷心菜块的舀取夹爪，应对了这一挑战。Kuriyama 等人 [19] 开发了一种包裹式夹爪，可抓取玉米、豆类等小颗粒物品，甚至粉末。Ray 等人 [9] 采用基于 FGE（快速可抓取性评估） [21] 的方法，从一堆缠绕的香草中评估单株香草的最佳拾取点。虽然这些方法能够处理小颗粒状

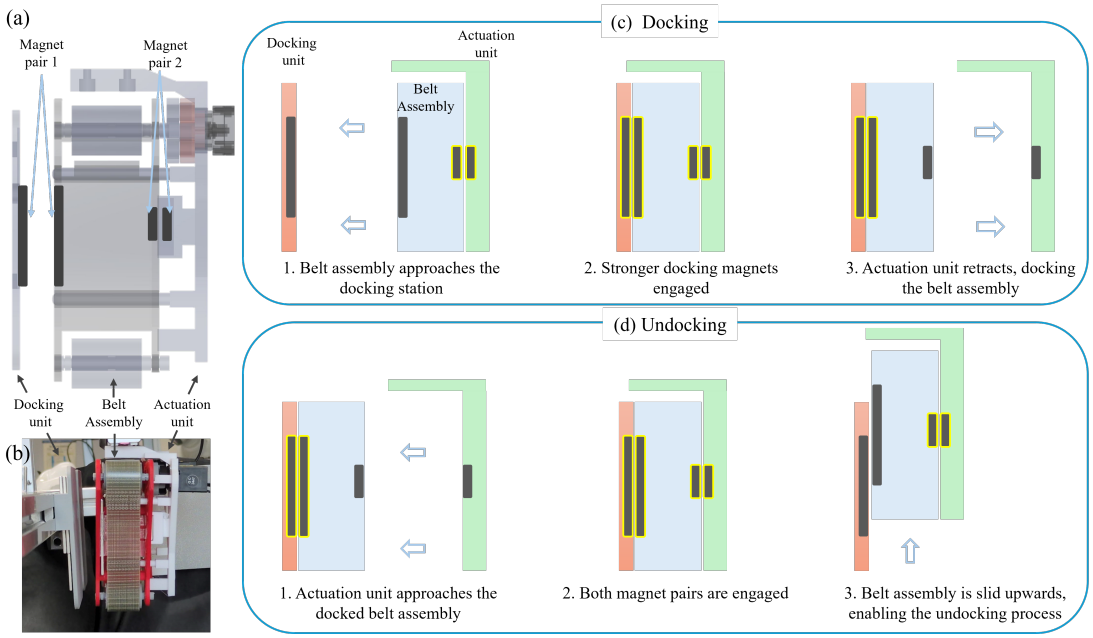

图 3. 皮带组件更换机构的工作过程。(a) 皮带组件更换装置三个部件的计算机辅助设计图。(b) 实际装置的图像。(c) 对接过程，即从夹爪上取下皮带组件并将其放置在对接站上。(d) 脱离对接过程，即将皮带组件从对接站转移到机械臂夹爪装置上。

食品，但它们在很大程度上仅适用于细粒材料以及缠绕程度较轻的食物类型。更重要的是，这些方法缺少一个关键因素：根据食品的重量进行拾取。

B. 基于重量的食品拾取

基于重量的食品拾取研究仍鲜有探索，成功案例也寥寥无几。这凸显了开发有效且实用的解决方案、应对这一关键挑战的必要性。Takahashi 等人 [10]采用深度学习方法，构建了一套系统，仅凭米饭容器的 RGB-D输入即可拾取所需重量的米饭。Takahashi 等人 [11] 进一步推进了这项研究，通过增加抓取前和抓取后的步骤，拾取卷心菜、豆类等短小的颗粒状食品物品。这些方法取得了良好效果，但针对每种食品物品都需要大量数据；而便当盒种类繁多，因此实施起来可能颇为棘手。

尽管以往的研究在食品抓取方面取得了显著进展，但大多数系统要么专用于单个食品物品，要么在处理可变形或颗粒状食品时缺乏精准的重量控制。此外，基于学习的系统需要大量训练时间，灵活性也不足。我们的工作采用模块化、以硬件为中心的设计，克服了这些局限，能够可靠地抓取多种高难度食品，并实现精准的重量控制和快速的工具切换。

III. 可更换夹持头夹爪

本节介绍我们开发的基于 Bit 的夹爪系统，该系统能够拾取高难度食品并放下指定重量的食品。移动表面上的食品专用附件组合使夹爪能够拾取这些食品。它还能适应种类繁多的食品，因此适合处理食品盒中常见的各种高难度食品。该夹爪解决了食品盒包装自动化的难题，其中涉及处理种类繁多的食品，并根据重量将这些食品精准地放入不同的盒子中。

所开发的夹爪具有两项主要特性和功能：1. 夹持头式夹爪能够确保抓取高难度食品

2. 皮带组件更换机构扩大了夹爪可处理的食品范围。

具体内容将在以下两个小节中说明：

A. 夹持头式夹爪

1）设计：所开发的夹爪由两部分组成：一个主驱动单元和一个针对特定食品设计的皮带组件（图 2）。主驱动单元包括一台伺服电机以及与机械臂连接的安装接口，用作皮带组件的驱动机构。动力通过销联轴器离合轴传递（见图 2），从而能够快速、安全地连接各种皮带组件模块。

皮带组件采用模块化设计，可针对特定食品类别进行定制。它由一条绕在三个滑轮上的同步带组成，其中两个滑轮位于顶部，一个位于底部。这种三角形构型在底部形成狭窄的锥形结构，有助于尽量减少干扰，并顺畅地伸入食物碗或容器中。

最重要的是，同步带本身嵌入了食品专用附件，称为咬齿。它们的作用是增强夹爪抓取、拾起和放下

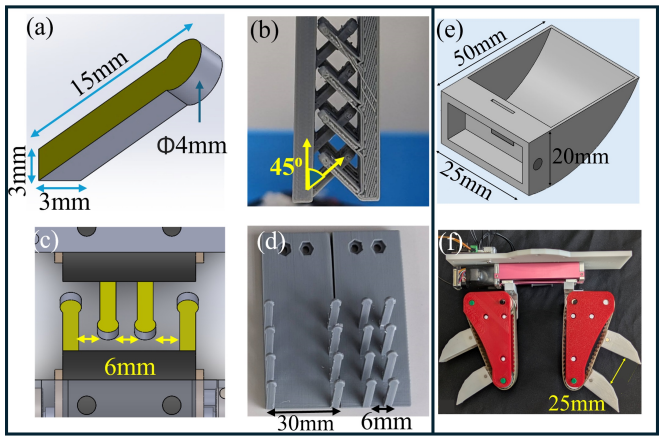

图4. 意大利面的尖齿参数。(a) 受意大利面勺启发的单个咬齿。(b) 咬齿相对于传送带呈45°排列。(c) 夹爪俯视图中的咬齿排列。(d) 尖齿密度（低）：各夹持板上的咬齿间距为6毫米。夹持器宽度为30毫米。(e) 鲑鱼籽的尖齿参数。(f) 鲑鱼籽咬齿之间的间距为25毫米。

高难度食品的能力，例如缠结、黏性或颗粒材料。由驱动单元控制的传送带运动会带动这些咬齿，从而有效拾起和释放此类食品。咬齿的形状和结构灵感源自现实中常用于处理具有类似质地和行为特性的物体的工具。

如前所述，我们评估了夹爪在两类食品上的性能。选择这两类食品，是因为它们带来了显著的交互挑战，并涵盖了食品盒中常见且具有高难度的广泛食品。以下是这些食品的咬齿选择信息：

1.1 细长缠绕食物：为代表日本日式便当中常见的细长缠绕食物类别，我们选择意大利面作为测试对象。意大利面专用咬齿的设计灵感来自传统意大利面勺的辐条 [22]，，其形状经过优化，可处理易滑且缠结的股。咬齿长度与标准意大利面勺辐条的长度一致，以确保与这些股充分接触。我们将咬齿角度设为45°，这是拾取和放下时的中性角度（图4(b)）。

为确定最佳尖齿参数，我们使用不同夹持器宽度和尖齿密度组合的静态夹持器配置进行了实验评估。每种配置均在相同条件下对真实意大利面执行相同的拾取和放下动作（每种配置各进行 10 次试验）。我们测试了三种夹持器宽度——20 mm、30 mm 和 40 mm，发现宽度对掉落重量影响不大。我们选择 30 mm，因为它足够紧凑，适用于小型食物碗，同时也提供了足够的面积来尝试不同的尖齿密度。我们测试了三种尖齿密度：2 咬齿/cm2（高）、1.5 咬齿/cm2（中）和 1 咬齿/cm2（低），如表 1 所示。

本次评估旨在找出能够有效夹取并放下意大利面的配置，在转移过程中不意外掉落，并尽量减少面条损伤。我们测量了三个结果：成功放入目标碗中的重量、转移过程中意外掉落的股数，以及被咬齿损伤的股数（表 1）。评分体系如下：

$$\text{评分}_{\text{spaghetti}} = w_1 \cdot \text{掉落重量} - w_2 \cdot \text{意外跌落} - w_3 \cdot \text{受损面条}$$

表 I 意大利面咬齿选择实验参数

夹爪宽度（mm）	尖齿密度（咬齿/cm^2）	掉落重量（克）	意外跌落（股）	意大利面条股已损坏	性能评分
20	高（$2/cm^2$）	42	1	4.8	31.4
30	高（$2/cm^2$）	39.3	0.5	5.83	27.14
40	高（$2/cm^2$）	45.2	0.6	6.8	31
30	中（$1.5/cm^2$）	41	0.14	2.28	36.3
30	低（$1/cm^2$）	48.42	0.8	0.14	47.34

表 II Ikura 咬钩选择实验参数

鲑鱼籽咬钩勺的曲线	掉落重量（克）	咬钩上剩余的鲑鱼籽数	脱落难易度（脱落角度）	性能得分
锥形	7.401	2.6	3.62（115°）	9.7
椭圆形	12.28	5.8	3.3（122°）	12.68
圆形	11.206	3.5	4.3（103°）	13.756

其中重量为 $w_1 = 1$、$w_2 = 1$ 和 $w_3 = 2$，因为我们非常重视不损坏意大利面。宽度为 30 mm、尖齿密度较低的夹爪获得了最高的性能评分，其掉落重量较大，且咬齿间距较宽，能够安全地抓取而不造成损坏。

1.2 颗粒状、易滑食品：为了呈现日式便当中的颗粒状易滑食品，我们选取鲑鱼籽作为测试对象。用于抓取鲑鱼籽的咬齿设计灵感来自碎石输送系统和挖掘机中使用的斗式机构 [23]，这些机构擅长舀取和运输细小、松散的物料。
宽度和长度分别设为 25 mm 和 50mm，与现有传送带系统的宽度相匹配（图 4e）。我们尝试了三种不同的铲取曲线轮廓：锥形、椭圆形和圆形。我们进行了评估测试，让这三种配置各自抓取并放下鲑鱼籽（10 次试验）。我们评估了抓取和放下鲑鱼籽的难易程度及效果，并据此给出性能评分。再次按照以下方式评估评分：

$$\text{得分}_{\text{ikura}} = w_1 \cdot \text{掉落重量} - w_2 \cdot \text{剩余鲑鱼籽} + w_3 \cdot \text{脱落难易度}$$

其中重量为 w_1，$w_3 = 1$ 且 $w_2 = 0.5$，因为拾取量和脱落难易度是最重要的要求。圆形轮廓得分最高，表明它能有效兼顾较高的拾取重量、平稳释放以及较小的倾斜角度。因此，我们选择了宽 25 毫米、长 50 毫米、带圆形曲线轮廓的桶状结构，用于处理颗粒状且易滑的食物。

1.3 单件食物物品：我们选择炸鸡来代表单件食物，这是以往研究的常见关注对象[6], [24]。与颗粒状或相互缠绕的物品相比，这类物品的处理难度较低，但在食品包装中仍至关重要。我们的夹爪仅使用基础配置——平行夹爪结构中的一条移动传送带——即可处理这些物品，无需针对特定食物进行改装

（图 1c），展现了夹爪适应多种食物类型的能力，涵盖从最具挑战性的到相对简单的食物。

我们还对这些类别中的其他食品进行了拾取测试（缠结类食物：胡萝卜丁、豆芽、卷心菜丝、粗乌冬面；颗粒类食物：玉米、豌豆、花生、红豆等），以展示该方法在处理多种食品时的有效性和易于实现性（补充视频）。需要指出的是，本文提出的整体概念是在移动传送带上安装特定食物刀头，以实现对食品的可控拾取和投放。该概念不依赖于任何特定刀头，可以轻松扩展并应用于任何食品类别。

2）工作原理：夹爪从初始位置开始工作，此时特定食物刀头位于平行夹爪闭合区域之外（图 2b(i)）。首先，使用名为种子执行器的线性执行器闭合夹爪的夹臂，引导食物从两侧向中心移动。需要指出的是，即使不进行这种水平闭合，夹爪也能拾取食物；但这一步可确保设备使用时间更长，因为食物会不断从两侧被收集到中间。

电机旋转带动传送带，使特定食物刀头向上移动，并从源碗中拾取食物。拾取的食物会分散开来，分别留在各个咬齿上。食物处于这种分隔状态，使夹爪系统最终能够进行可控投放。

意大利面缠绕紧密且长度较长，因此难以拾取特定重量的食物，所以夹爪通常会尽可能拾取至最大重量，之后再投放所需重量的食物。

要将食物放入指定容器，夹爪会移动到目标碗上方，并以小幅、可控的增量转动传送带（通常每步转动 20°）。放在容器下方的数字秤会提供实时反馈，使系统能够精确监测已投放食物的重量。

移动传送带上的特定食物刀头对于实现这种程度的控制至关重要。食物挡片可确保牢牢夹住高难度食品，而沿传送带分隔排列的挡片则会将拾取的食物分散到多个隔间中。这种空间分隔使夹爪能够逐步释放食物，从而实现精细的重量控制，这是传统夹爪难以做到的。夹爪会将目标重量的食物投放到指定容器中，然后继续为另一个容器执行这一操作。

B. 传送带更换机构

如前所述，夹爪能够精准抓取和放下少量高难度食品。然而，由于食品包装行业不仅需要处理不同重量的产品，还要处理种类繁多的食品，因此夹爪还设计了被动式快速皮带组件更换功能。这使得操作人员可以在

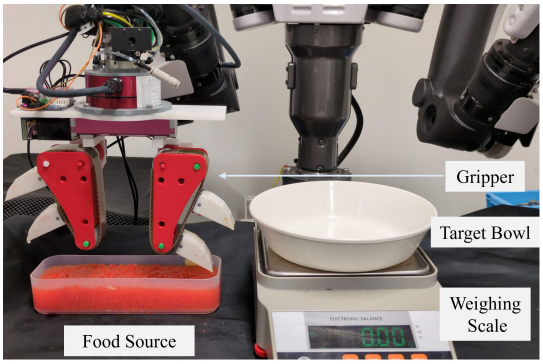

图 5. 基于重量的投放实验装置：按所需重量拾取并投放鲑鱼籽（Ikura）和意大利面（图中未显示）。实验使用了 Nextage开放式机械臂和数字秤。

不到四十秒内切换工具，以处理不同的食品。这项功能不仅支持处理各种食品，还能防止交叉污染，保持每种食品的风味和新鲜度。

1）设计：传送带组件更换器的一项关键设计考量，是确保其不依赖执行器、操作快捷且控制简单。这些特性对于系统轻松扩展至关重要，使其能够集成更多传送带组件或工具，同时不会增加复杂性或成本。

更换器的第一个组件是一个对接站（图 3），其中嵌有一块 $50 \times 10 \times 3$ 毫米、30 牛顿的磁体。传送带组件内侧也嵌有一块尺寸相同的对应磁体（图 3B）。这些长条磁体可提供牢固可靠的磁性连接，同时能在连接过程中于对接表面平面内实现自对准。该设计无需主动对准机构，即可实现快速、牢靠且可重复的连接。

主驱动单元（图 2）的设计兼容不同尺寸和连接类型的传送带组件，前提是安装孔的位置保持一致。该驱动单元包括一个 Dynamixel XL330-M288-T 伺服电机、三根支撑轴，以及一个尺寸为 $20 \times 10 \times 2$ mm、吸力为 10 N 的强力对准磁体。传送带组件中嵌有一个对应的磁体，用于在连接时对准并稳定组件。三根轴负责机械对准，而磁体可防止横向移位，确保夹爪运行时连接稳固。

重要的是，传送带组件本身完全是被动式的，由滑轮、滚轮和同步带组成（如第 3.A 节所述）。这免去了对额外执行器的需求，使系统保持轻量、经济、易于维护且可扩展。

2）工作原理：当需要处理不同的食物物品时，机械臂便会启动皮带组件更换流程。首先，机械臂将当前皮带组件与对接站同轴对齐，然后缓慢移动至停靠座（图 3.c.1）。皮带组件接近停靠座时，两个部件中嵌入的长条磁体之间的磁吸力开始生效。这些磁体会自动将皮带组件吸引并对准到位（图 3.c.2）。对接站中的磁体经过特意设计，具有更强的磁力

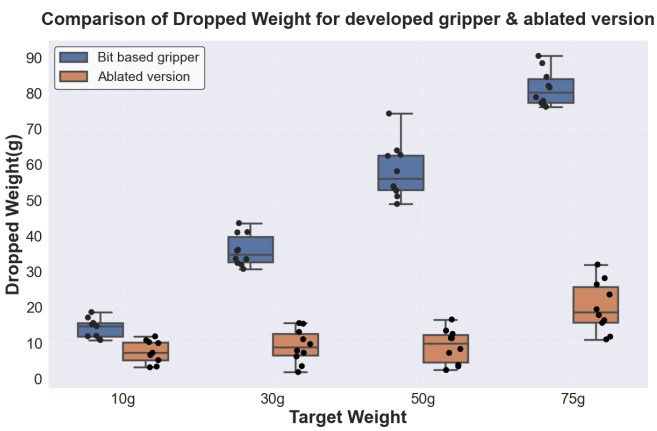

图 6. 所开发夹爪与其消融版本在处理意大利面时基于重量的掉落准确率比较

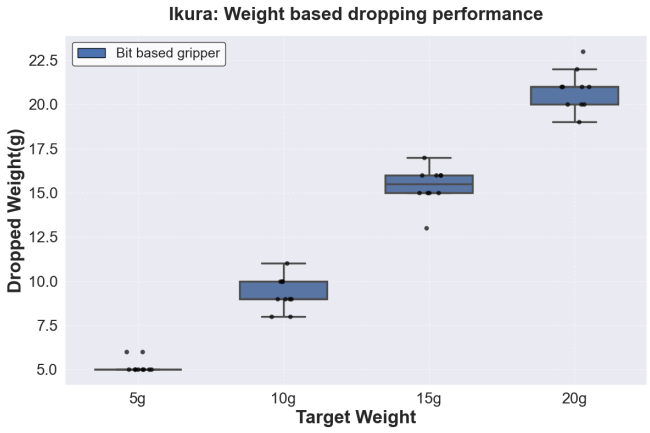

图 7. 夹爪处理鲑鱼籽时基于重量的掉落准确率

表 III 基于重量的投放性能：意大利面

目标重量（克）	平均投放重量（克）	准确度（%）	标准差	消融：掉落重量（克）	消融：准确度%	消融标准差
10	14.18	59%	2.81	7.67	67%	3.76
30	36.185	79.4%	4.21	9.22	31%	4.137
50	59.558	81%	7.73	9.127	19.3%	5.03
75	80.894	92.2%	5.02	20.79	28%	7.069

以确保驱动单元缩回时，皮带组件仍与停靠座保持连接（图 3.c.3）。至此，当前皮带组件的对接或脱离流程完成。

为了接合新的皮带组件，机械臂将驱动单元与装有目标特定食物组件的另一个对接站同轴对准。随后，驱动单元朝新组件推进，直到三个对准轴完全插入各自的孔中（图 3.d.1）。与此同时，小型内置磁体相互吸合，牢固连接两者（图 3.d.2）。

在此步骤中，系统会持续监测力传感器数据，确保插入力保持在安全范围内。连接建立后，机械臂以受控速度向上滑动新的皮带组件。在这一提升过程中，滑动动作会减小磁力——磁体转入摩擦力较大、强度较低的状态，使驱动单元能够轻松地将皮带组件与停靠座分离（图 3.d.3）。安装好新组件后，机器人系统即可使用为下一个物品设计的特定食物刀头恢复运行。

表 IV 基于重量的投放性能：鲑鱼籽

目标重量（克）	平均投放重量（克）	准确度（%）	标准差
5	4.8	96%	0.42
10	9.3	93%	0.95
15	15.4	97.4%	1.07
20	20.8	96%	5.93

IV. 性能评估

为评估所开发夹爪的有效性，我们使用Nextage Open机器人的右臂（图5）进行了两项核心实验和一项演示。以下是详细情况和结果。

A. 基于重量的投放

本实验评估夹爪处理高难度食品并准确投放指定重量食品的能力。系统采用闭环设置，并在目标容器下方放置数字秤。

夹爪能够以分离且受控的方式投放食品，再结合数字秤的反馈，使系统能够准确投放缠结、颗粒状的高难度食品。我们使用意大利面（细长、易缠结且黏稠）和鲑鱼籽（颗粒状、易滑落）进行测试。这两种食品常见于日本便当盒中，且因难以进行基于重量的处理，目前尚无有效的基于重量的解决方案。实验中，夹爪首先从一个大型源碗中抓取食品，然后将目标重量的食品投放到工作空间中央的指定碗中（图 5）。

我们根据日本便当盒中常见的份量，测试了意大利面的四种重量等级——10 克、30 克、50 克和 75 克，每种等级进行十次试验。由于整个测试过程中意大利面的缠结程度和黏性不断变化，相同的抓取条件往往会导致抓取量不同。然而，夹爪的分离式抓取方法即使面对这些变化，仍能实现准确、可控的投放。为评估稳健性，每种等级的前五次试验在测试初期进行，其余五次则在后期进行，以确保在不同食物状态下评估性能。

为了评估咬齿的实际效果，我们对夹爪的一个消融版本进行了相同的测试。移除了食物挡片，仅使用带有皮带装置的夹爪作为

用于对比的消融夹爪。对于 10g 组，所开发的夹爪平均误差为 4.18g；考虑到每根意大利面重 3–6g，这一结果是合理的。随着重量等级提高，准确度也有所提升，误差分别为 6.19g（30g）、9.5g（50g）和 5.8g（75g）（表 III）。相比之下，消融夹爪无法牢固夹住意大利面，无论夹取深度或夹爪宽度如何，通常只能夹取 10–12g。此外，在释放阶段，消融夹爪无法控制释放过程；夹取的全部负载会一次性掉落，无法实现细粒度控制。因此，对于 10g、30g、50g 和 75g 目标组，误差显著增大，分别达到 2.33g、20.78g、40.87g 和 54.21g。这些结果凸显了特定食物刀头在牢固夹取和精准、逐步释放难夹取物品方面的关键作用，并显著增强了夹爪的交互控制能力和基于重量的处理能力，即使在困难条件下亦是如此。

在鲑鱼籽实验中，我们使用明胶鲑鱼籽套件制备所需数量的鲑鱼籽。实验采用了专为夹取易滑、颗粒状、黏性或半液态食物设计的桶形食物夹持件（见第 3.A.1 节）。作为参考，每颗鲑鱼籽约重 1 克。根据便当盒的典型使用情况，我们测试了四种重量等级——5 克、10 克、15 克和 20 克 [25]。夹爪在所有重量等级下的平均误差均低于 1 克（表 IV），准确度超过 95%，这表明该系统能够高精度地处理这类易碎且易滑的食物。由于不存在严重缠结，其精度高于处理意大利面时的表现。消融后的夹爪因鲑鱼籽表面易滑而无法将其夹起，因此无法记录对比数据；因此，我们无法展示对比数据。尽管如此，四种重量等级下 95% 的放置准确度，充分验证了桶形咬齿和整体夹爪设计的有效性。

总之，本实验验证了所提出夹爪系统的有效性，并突出了特定食物刀头在实现高难度食品的精准拾取和基于重量释放方面所发挥的关键作用。

B. 最小重量释放能力

所开发夹爪的一项关键优势是能够对高难度食品进行受控、渐进式释放，即使食品在操作过程中其物理特性——例如黏性、缠结或滑溜性——发生显著变化。这一能力使系统能够通过一系列小幅、自适应的释放步骤逐步接近目标释放重量，而无需预先了解食品的确切物理状态。

为评估夹爪的重量控制能力，我们测试了两种高难度食物类型：意大利面（缠结、黏性）和鲑鱼籽（颗粒状、滑溜）。夹爪通过以 20° 为步进旋转伺服电机，逐步释放食品，同时测量释放食品的重量，以观察控制的细粒度和一致性。

对于意大利面，该系统展现出释放少至 3.47 克的能力，相当于一根面条。尽管

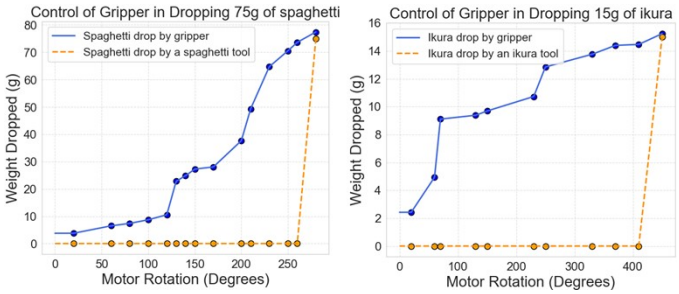

图 8. 夹爪对高难度食品小重量释放的控制。长条状缠结食品（左）和颗粒状、黏性食品（右）

由于缠结和黏性存在一定的自然变化，夹爪仍表现出通过多次旋转分小步释放食物的明确能力（图 8）。

对于鲑鱼籽，记录到的最小掉落量为 2.42 克，约由 2–3 颗鱼籽颗粒组成（图 8）。鉴于鲑鱼籽容易打滑且呈颗粒状，这再次体现了夹爪的精确性和适应能力。

相比之下，作为基线比较的标准意大利面工具只能一次性放下夹取的全部份量，无法进行中间控制。大多数传统食品夹持器也有类似表现，缺乏逐步释放的能力。

该实验表明，所开发的夹爪能够对高难度食品的释放进行精细的交互控制。与一次性放下全部夹取份量的传统夹爪不同，我们的系统能够稳定地放下极少量食品，有时甚至只需放下一根意大利面或几颗鱼籽颗粒。这种控制能力在实际包装任务中尤为有利，因为食品特性无法始终得到保证，而且需要实时调整。

C. 皮带组件更换性能

系统更换皮带组件、进而更换与之接触的食物部件的能力，对于处理种类繁多的食品至关重要。该系统的稳健性极为重要。

我们通过连续进行 10 次切换试验，评估了被动换带机构的稳健性。在试验中，机械臂执行固定的点到点运动来更换皮带组件。系统在所有试验中均成功完成操作，成功率达到 100%，且没有发生错位或机械故障。每次切换操作约耗时 40 秒；由于运动具有确定性，所需时间始终保持一致。切换过程可以更快完成，但测试期间特意将时长设为 40 秒，以确保操作安全可靠。

切换过程不使用主动执行器，仅依靠机器人的精准运动和被动设计。这种简洁性最大限度地减少了潜在故障点，并有助于提高系统的可重复性。唯一的要求是机器人保持位置精度在 2 mm 的公差范围内。

这些结果证实了换带器的速度、可靠性和稳健性。其被动设计和简单的驱动方式使其

非常适合在需要快速适应多种食物类型的自动化工作流中频繁使用。

D. 食品盒包装任务

为验证所开发系统的食品盒包装能力，我们进行了一项演示实验（补充视频）。机器人需要准备两种不同的食品盒：一种装有 50 克意大利面和 5 克鲑鱼籽；另一种装有 10 克意大利面和 20 克鲑鱼籽。实验评估了夹爪处理高难度食品、准确投放目标重量以及切换不同食品专用夹爪的能力。系统成功完成了任务，整体准确度为 91.25%，总耗时约 3.5 分钟（每盒 70 秒，更换工具 40 秒）。这一场景与现实中的便当盒包装十分相似。根据这些结果，可以得出结论：所开发的系统能够自动完成便当盒包装，具备精准的重量控制能力、有效处理高难度食品的能力，并且能够快速更换传送带组件，以适应各种食品。

V. 结论

本文提出了一种以硬件为中心的方法，用于应对自动化便当盒包装的挑战。所提出的夹爪采用三角形框架，并配备主动式传送带表面，其上安装了称为咬齿的模块化食品专用部件。该设计能够与各种高难度食品进行有效交互，包括易变形、易滑动和相互缠绕的食材。该系统的一项关键优势是在食品交互过程中具备精准的控制能力，能够持续释放特定的目标重量，满足商业食品包装所要求的关键份量精度。此外，快速的被动式传送带组件切换机制能够在不同食品类别之间实现无缝切换，从而适应便当盒内容物的高度多样性。

通过实验对性能进行了评估：该夹爪对意大利面的准确度超过80%，对鲑鱼籽的准确度超过95%。它能够释放极少量的食品，最少可释放一根意大利面或2–3粒鲑鱼籽，从而通过小幅度的自适应步骤实现精细的重量控制。传送带更换机制的成功率达到100%，证实其已具备处理多种食品的能力。

该系统通过分次释放少量食物来确保重量精度，但这也导致每件食物的平均供餐时间达到 15 秒。未来的工作将致力于在不牺牲精度的前提下提高速度。除技术层面外，还可采取多项措施来确保食品安全和卫生。在 ICRA 2024 食品配料挑战赛期间，食品接触区域使用食品安全胶带覆盖，以满足卫生要求。其他可行方法包括涂覆符合 FDA 标准的食品安全涂层（例如硅胶、聚四氟乙烯），或使用可拆卸的食品级罩套。未来的工作将着重优化供餐速度，并提高对易滑或缠结食物的准确度。

参考文献

[1] Z. Wang 和 S. Hirai，“用于日式便当包装的软体机器人夹爪。”[2] R. Kanegae、Z. Wang 和 S. Hirai，“可轻松制造的壳式夹爪，可同时包装多个黄瓜”，载于 2020年 IEEE 国际实时计算与机器人会议 (RCAR)。IEEE，2020年，第 188–192 页。[3] P. Kumar、W. Wan 和 K. Harada，“温度驱动的多模态/单执行器软手指”，arXiv 预印本 arXiv:2501 07216，2025年。。[4] Z. Wang、K. Or 和 S. Hirai，“用于食品包装的双模软体夹爪”，《机器人与自主系统》，第 125 卷，103427，2020年，第 。[5] Z. Wang、R. Kanegae 和 S. Hirai，“用于处理食品的圆形壳式夹爪”，《软体机器人》，第 8 卷，第 5 期，第 542–554 页，2021。[6] A. Ummadisingu、K. Takahashi 和 N. Fukaya，“使用自适应手指和合成数据训练的目标检测抓取杂乱食物”，载于 2022年 国际机器人与自动化会议 (ICRA)。IEEE，2022年，第 8290–8297 页。[7] Y. Kuriyama、Y. Okino、Z. Wang 和 S. Hirai，“用于包装切碎及颗粒状食材的包裹式夹爪”，载于 2019年第二届 IEEE 软体机器人国际会议 (RoboSoft)，2019年，第 114–119 页。[8] Z. Wang、H. Furuta、S. Hirai 和 S. Kawamura，“用于处理各类食品的舀取式捆绑机器人夹爪”，《机器人与人工智能前沿》，第 8 卷，640805 页，2021。[9] P. Ray 和 M. J. Howard，“使用平行夹爪机器人解开香草和沙拉食材”，载于 2020年 IEEE/RSJ 智能机器人与系统国际会议 (IROS)。IEEE，2020年，第 2624–2629 页。[10] K. Takahashi、N. Fukaya 和 A. Ummadisingu，“通过预抓取和后抓取，对缠结食物进行目标质量抓取”，《IEEE 机器人与自动化快报》，第 7 卷，第 2 期，第 1222–1229 页，2021。[11] K. Takahashi、W. Ko、A. Ummadisingu 和 S. i. Maeda，“面向颗粒类食物的具不确定性感知能力的自监督目标质量抓取”，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议论文集 (ICRA)，2021年，第 2620–2626 页。[12] 松下新闻中心。（2024年6月）设计能够轻柔处理食品的机器人——来自“人手”的经验。访问日期：2025年7月21日。 [在线]。链接：https://news.panasonic.com/global/stories/15082
[13] Z. Qiu、H. Paul、Z. Wang、S. Hirai 和 S. Kawamura，“机器人末端执行器食品处理能力评估系统”，《食品》，第 12 卷，第 22 期，4062 页，2023。[14] Z. Wang、Y. Torigoe 和 S. Hirai，“预应力软体夹爪：用于食品处理的设计、建模、制造与测试”，《IEEE 机器人与自动化快报》，第 2 卷，第 4 期，第 1909–1916 页，2017。[15] R. Ishikawa、M. Hamaya、F. Von Drigalski、K. Tanaka 和 A. Hashimoto，“从破坏中学习：机器人食品操作中的食品断裂预测”，IEEE Access，第 10 卷，99 329，2022年 99 321页–。[16] R. Yagawa、R. Ishikawa、M. Hamaya、K. Tanaka、A. Hashimoto 和 H. Saito，“不使用食品也能学习食品拾取：通过破坏可重复使用的易碎物体来预测断裂”，载于 2023年 IEEE 国际机器人与自动化会议 (ICRA)，2023年，第 917–923 页。[17] J. Grannen、Y. Wu、S. Belkhale 和 D. Sadigh，“学习用于食品获取的双臂舀取策略”，arXiv 预印本 arXiv:2211.14652，2022年。[18] C. Schenck、J. Tompson、S. Levine 和 D. Fox，“学习颗粒介质的机器人操作”，载于机器人学习会议。PMLR，2017年，第 239–248 页。[19] Y. Kuriyama、Y. Okino、Z. Wang 和 S. Hirai，“用于包装切碎及颗粒状食材的包裹式夹爪”，载于 2019年第二届 IEEE 软体机器人国际会议 (RoboSoft)。IEEE，2019年，第 114–119 页。[20] Y.-L. Tai、Y. C. Chiu、Y.-W. Chao 和 Y.-T. Chen，“Scone：具有主动感知的食品舀取机器人学习框架”，载于机器人学习会议。PMLR，2023年，第 849–865 页。[21] Y. Domae、H. Okuda、Y. Taguchi、K. Sumi 和 T. Hirai，“基于单张深度图快速评估通用夹爪的抓取能力，以用于料箱拣选”，载于 2014年 IEEE 国际机器人与自动化会议 (ICRA)。IEEE，2014年，第 1997–2004 页。[22] Museum of Old Techniques (MOT)，“意大利面勺”，https://www.mot.be/resource/Tool/pasta-spoon?lang=en，无日期，访问日期：2025年7月22日。[23] J. Kim、J. Seo、D. Um 和 D. Lee，“使用物质点法进行二维土壤铲斗仿真，以实现高效土方工程建模”，《国际可持续建筑技术与城市发展期刊》，第 12 卷

[24] Y. Nishina 和 T. Hasegawa，《用于非刚性物体和不规则形状物体料箱抓取的无模型抓取点估计》，欧姆龙技术，第 52 卷，第 1–8 页，2020年。
[25] Slism 热量数据库，《鲑鱼籽（鲑鱼籽）的热量》，无日期，访问日期：2025年7月22日。 [在线]。网址：https://calorie.slism.jp/110140/