

# 面向中餐的助餐机器人末端欠驱动型夹取机构设计与仿真分析

高兴<sup>1</sup>, 张琳<sup>1</sup>, 周洲<sup>1</sup>, 胡冰山<sup>1,2\*</sup>, 喻洪流<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学康复工程与技术研究所, 上海

<sup>2</sup>上海康复器械工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2023年5月19日; 录用日期: 2023年7月17日; 发布日期: 2023年7月24日

## 摘要

本文介绍了一种基于柔性夹持筷子的欠驱动型夹取机构, 用于面向中餐的助餐机器人智能辅具中。本文先基于研究现状分析了目前研究的各类助餐机器人的优劣, 提出了2自由度的欠驱动型平面四连杆机构。接着通过理论建模求得了接触力 $f$ 的算法。随后使用Adams仿真软件模拟机构运动轨迹, 并测得了在给定食物尺寸和输入角度的情况下接触力 $f$ 与食物刚度 $K$ 的关系, 结果表明该机构设计满足设计要求, 证明了本文欠驱动型夹持机构的可行性。

## 关键词

助餐机器人, 欠驱动型夹持装置, 柔性夹持, 仿真

# The Design and Simulation Analysis of the End-Underactuated Gripper Mechanism of the Meal-Assistance Robot for Chinese Food

Xing Gao<sup>1</sup>, Lin Zhang<sup>1</sup>, Zhou Zhou<sup>1</sup>, Bingshan Hu<sup>1,2\*</sup>, Hongliu Yu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Engineering Research Center of Assistive Device, Shanghai

Received: May 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 24<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This paper introduces an underactuated gripper mechanism based on flexible gripper chopsticks,

\*通讯作者。

文章引用: 高兴, 张琳, 周洲, 胡冰山, 喻洪流. 面向中餐的助餐机器人末端欠驱动型夹取机构设计与仿真分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(4): 3959-3967. DOI: 10.12677/mos.2023.124361

which is used in Chinese meal-assistance robot intelligent auxiliary tools. This paper first analyzes the advantages and disadvantages of various types of meal-assisting robots based on current research status, and proposes a 2 DOF underdriven planar four-link mechanism. Then the algorithm for the contact force  $f$  was derived by theoretical modeling. The trajectory of the mechanism was then simulated using Adams simulation software, and the relationship between the contact force  $f$  and the food stiffness  $K$  was measured for a given food size and input angle. The results show that the design of the mechanism meets the design requirement, proving the feasibility of the underactuated gripper mechanism.

## Keywords

Meal-Assistance Robot, Underactuated Gripper Mechanism, Flexible Gripper, Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

由于残疾导致的功能障碍，不仅给残疾人的生活带来了极大的麻烦和不便，也给其家庭和社会带来不小的负担[1]，其中因残疾而不能自主进食的残疾人占比较大[2]。作为一种新型的辅助器具，助餐机器人[3]的出现能够为残疾人提供更加方便、快捷的饮食服务，为解决残疾人的主动进食问题提供了新的思路和可能。

目前，国内外的助餐机器人在实验领域已经取得了一定成果。现阶段的研究有英国史丹佛大学 Handy1 辅具及日本 SECOM 公司于 2020 年提出的 My Spoon [4]。其中 Handy1 是 1998 年 Topping M.和 Smith J.研发的较早的一个辅助机器人系统，根据用户需求的不同，它可以同时操控不同的托盘供用户选择所需的食物。My Spoon 由一个带有 5 自由度的机械臂和一个由操纵杆控制的末端组成[5]，能够实现使用末端的一个勺子和叉子一起充当钳子拾取食物并将其举到嘴边。在 2012 年则有一款能够处理韩国食物的 6 自由度双臂机械手构成的助餐机器人被引入[6]。但目前大部分机构喂食时餐勺动作仍缺乏人性化，或者需要使用者拥有一定的专业素质，使用起来较为繁冗，且末端的轨迹规划也仍待研究[7] [8]。从助餐机器人的实际使用促进残障人士独立进食的角度来看，降低机械设计的复杂性、系统的总成本和功耗及对安全性、使用的便携性是目前主要的研究方向。

在对于中餐机器人的设计方面，实验研究可以更直接地模拟真实场景，更容易获得真实数据。而在夹持设计及末端处理方面，各类助餐机器人的实验研究成果较多，但是仿真成果相对匮乏。在仿真过程中，可以随时地调整所设计机构的尺寸以适应不同的人群，并对力矩、扭矩等进行快速分析。而在实验中，研究人员无法实时的对机构进行尺寸等的调整，信息的交换具有一定的迟滞性。因此基于上述原因，本文将基于中餐的饮食方法采用仿真建模设计一款欠驱动式的单电机型中餐助餐机器人，以更好适应进食功能障碍者需求。

本文拟采用 Adams 建立动力学仿真模型对助餐机器人进行仿真研究。第一章讲述了国内外对于助餐机器人的研究现状以及发展前景，指出了目前市面上各类助餐机器人的优势及不足之处，并提出本文所要设计的面向中餐的助餐机器人机构。第二章则介绍了本文的助餐机器人的结构设计理念，以四杆机构及单电机的欠驱动夹持装置组成，并指出该种设计的合理性，实现了机构的紧凑设计和高效能量利用。第三章通过建立夹持装置的动力学和运动学模型，确定了机构的设计参数和控制算法，指出食物的尺寸

$w$  是根据接触力  $f$  进行迭代的, 通过分析, 得到了抓取机构的接触力、食物的尺寸和刚度以及接触位置之间的关系, 从而提出了一个抓取规划, 以实现精确的夹取操作及力学性能。第四章则通过仿真分析了机构的运动轨迹, 测试了机构对于不同食物刚度的接触力, 验证了机构设计的合理性。

## 2. 机构设计

考虑到结构和功能的便捷性等原因, 本文提出了欠驱动型四连杆机构进行构建。相较于已有的完全驱动型机构, 欠驱动型需要更少的驱动力, 并具有较好的运动稳定性。并且相较于上文中所提到的 My Spoon [7]等具有多自由度的辅具, 本文采用了 2 自由度的平面机构, 拥有更为简单的结构和控制。因此本文拟议的机构为具有 2 自由度的欠驱动型平面四连杆机构, 如图 1 所示。夹持机构的欠驱动单元包括被动四杆机构、主动四杆机构和驱动机构, 扭簧安装于被动四杆机构的第一连杆 BC 中, 电机 O 驱动主动四杆机构, 在扭簧的作用下使得被动四杆机构的形状发生改变, 从而控制工作单元进行夹取。工作单元包括上连杆工作元件和下连杆工作元件, 上连杆工作元件安装于被动四杆机构的第二连杆 CD, 下连杆工作元件与底座相连接, 固定于输出底座。

当电机驱动时, OA 杆与水平面夹角发生改变, 位于连杆 BC 及 CD 处的扭簧会提供柔性驱动改变使食物和夹持装置之间产生适当的接触力。当夹持机构与食物发生接触时, 被动四杆机构 ABCD 的形状会随着扭簧的变形而运动, 主动四杆机构 OADE 则通过驱动主动关节 O 进行确定性运动。根据该机构的这种组成, 在驱动关节 O 的特定位移处, 接触力会根据食物的大小而增加。

基于人因工程学[9]的考虑, 效应器末端的夹持元件设计与日常所用勺子的尺寸相似, 且效应器壳体选择较为适宜的圆角。机构整体的尺寸应在适配于机械臂的前提下, 保持所述夹持装置和所述四杆机构的尺寸平衡。

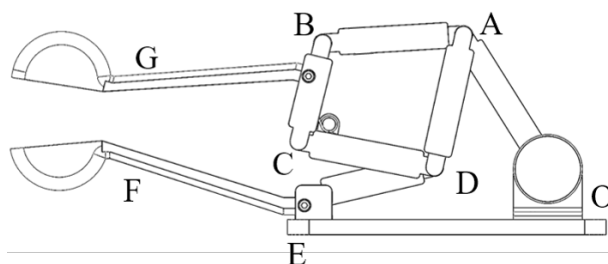


Figure 1. Sketch of the gripping mechanism  
图 1. 夹持机构简图

## 3. 理论建模

送餐机器人的夹持机构需要根据食物调整其夹持力。每种食物都有其大小、质量和硬度, 因此调整现有的夹持机构的抓取力大小是研究的首要问题。而使用力传感器来控制抓取力会提高系统的成本和复杂性, 使得用户无法负担得起高昂的价格。此外, 为控制机构的抓取力而准备一个食物物理特性的数据库已然是十分困难的, 再加之中餐庞大的食品类型。因此, 需要一种能够根据食物的大小和硬度调整抓取力的夹持装置, 而无需用力传感器。本文提出并分析了一种基于欠驱动概念的夹持机构, 以实现在使用弹性元件时调整其抓取力。本文的理论建模以 T. Oka 等人所设计欠驱动筷子式夹持机构[10] [11]为基础, 制定了机构的运动学和静力学控制方程。如图 1 所示, 假设食物是一个弹性体, 食物与夹持机构的接触点为沿连杆 BG 的一个可移动点 P。考虑到食物与夹持装置之间的相对运动, 本文在食物和连杆 BG 之间增加了一个转动副和一个移动副。BG 之间的距离以及 BG 与 EF 之间的相对角度分别记为  $L$  和  $\varphi$ ,  $f$  代表接触力, 其方向是垂直于连杆 BG 的, 大小用  $f$  [N]表示。假想夹取的食物是一个固定在 EF 杆上的垂直

弹簧，弹簧常数为  $K$  [N/m]。食物的初始大小和变形量分别用  $w_0$  [mm]和  $\Delta w$  [mm]表示。

假设机构在水平面作准静态运动，本文忽略了食物的惯性、重力和粘度。当给定了食物位置、初始尺寸  $w_0$  和食物的刚度  $K$ ，便可以根据程序得到给定输入角  $\theta_{in}$  的接触力和机构结构。 $w$  的大小可以通过静力分析得到的预估接触力与来自食物的反作用力之间的平衡来确定，得到  $f$  和  $w$  的值，以满足机构的几何和力学条件。因此在分析过程中， $w$  通过  $\delta w$  减少，当两种力的差值大于阈值  $\delta f$  时进行更新并迭代计算，直至结果收敛。图 2 为计算分析的流程图。

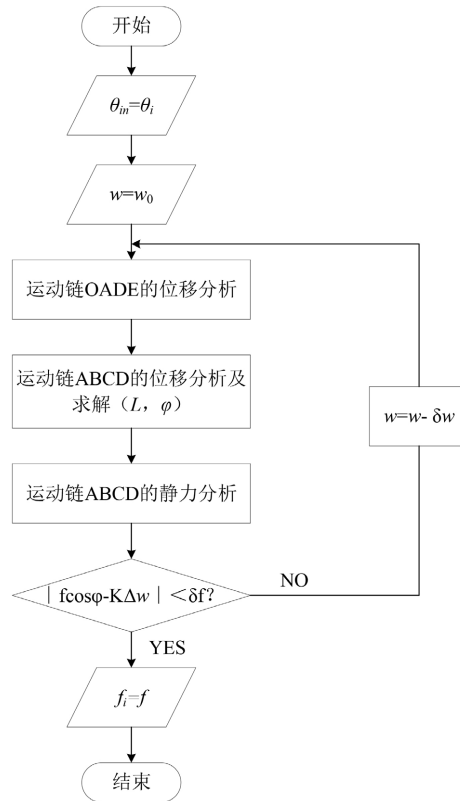


Figure 2. Flow chart for displacement analysis considering elastic deformation of food  
图 2. 考虑食物弹性形变的位移分析流程图

给定输入位移  $\theta_{in}$  后，就可以确定 A 和 D 在 X-O-Y 坐标系的位置。考虑在链接 BG 上的移动坐标系 X'-O'-Y'，只要给定了 P 点的位置  $(x_p, w)$ ，A 点和 D 点在 X'-O'-Y' 坐标系上的位置便可以用  $\varphi$  表示。

$$A' = \begin{bmatrix} (x_A - x_p) \cos \varphi + (y_A - w) \sin \varphi \\ -(x_A - x_p) \sin \varphi + (y_A - w) \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D' = \begin{bmatrix} (x_D - x_p) \cos \varphi + (y_D - w) \sin \varphi \\ -(x_D - x_p) \sin \varphi + (y_D - w) \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

点 B 和点 C 在 X'-O'-Y' 坐标系上的位置分别为  $B' = [L, l_{BC}]^T$ ， $C' = [L, 0]^T$ 。由于连杆 AB 和 CD 长度的限制，应满足下列条件：

$$\|B' - A'\| = l_{AB} \quad (3)$$

$$\|C' - D'\| = l_{CD} \quad (4)$$

利用公式(1)、(2)、(3)、(4)可以得到以下非线性同步方程。

$$\begin{aligned} & \left\{ L - (x_A - x_p) \cos \varphi - (y_A - w) \sin \varphi \right\}^2 \\ & + \left\{ l_{AD} + (x_A - x_p) \sin \varphi - (y_A - w) \cos \varphi \right\}^2 = l_{AB}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ L - (x_D - x_p) \cos \varphi - (y_D - w) \sin \varphi \right\}^2 \\ & + \left\{ (x_D - x_p) \sin \varphi - (y_D - w) \cos \varphi \right\}^2 = l_{CD}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

通过对这组方程的数值求解,可以得到解 $(L, \varphi)$ 。

运动链 ABCD 的自由体图如图 3 所示。关于每个链接的相应平衡方程用方程(7)、(8)、(9)表示,其中  $\tau_k$  是扭簧在 C 处的扭矩。

链接 AB:

$$\begin{aligned} F_A - F_B &= 0 \\ (y_B - y_A)F_{B,x} - (x_B - x_A)F_{B,y} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

链接 BCG:

$$\begin{aligned} F_B - F_C + F &= 0 \\ \tau_k + (x_B - x_C)F_{B,y} - (y_B - y_A)F_{B,x} + (x_P - x_C)f_y - (w - y_C)f_x &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

链接 CD:

$$\begin{aligned} F_C - F_D &= 0 \\ -\tau_k - (x_D - x_C)F_{D,y} + (y_D - y_C)F_{D,x} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

从接触力的模型来看,假设其方向是 CG 的法线方向,  $\mathbf{f}$  可以用幅值  $f$  和一个方向矢量  $\mathbf{e}$  表示。

$$f = fe = f \begin{bmatrix} \frac{w - y_C}{\sqrt{(x_P - x_C)^2 + (w - y_C)^2}} \\ -(x_P - x_C) \\ \frac{-}{\sqrt{(x_P - x_C)^2 + (w - y_C)^2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过方程(7)、(8)、(9)、(10)可以衍生出线性联立方程,解出这些方程便可得到接触力  $f$ 。

Figure 3. Free body diagram of kinematic chain ABCD

图 3. 运动链 ABCD 自由体示意图

## 4. 仿真分析

本文基于上述模型通过 Adams 软件对上文所提夹持机构模型进行了数值模拟,分别从连杆的运动(无食物)和夹持食物时接触力大小等方面对机构模型进行模拟计算。

### 4.1. 连杆运动分析

本文根据表 1 的参数给定了各连杆的长度,并且将输入角度  $\theta_m$  设定为  $117.5^\circ$ ,对连杆的运动过程进行了分析。

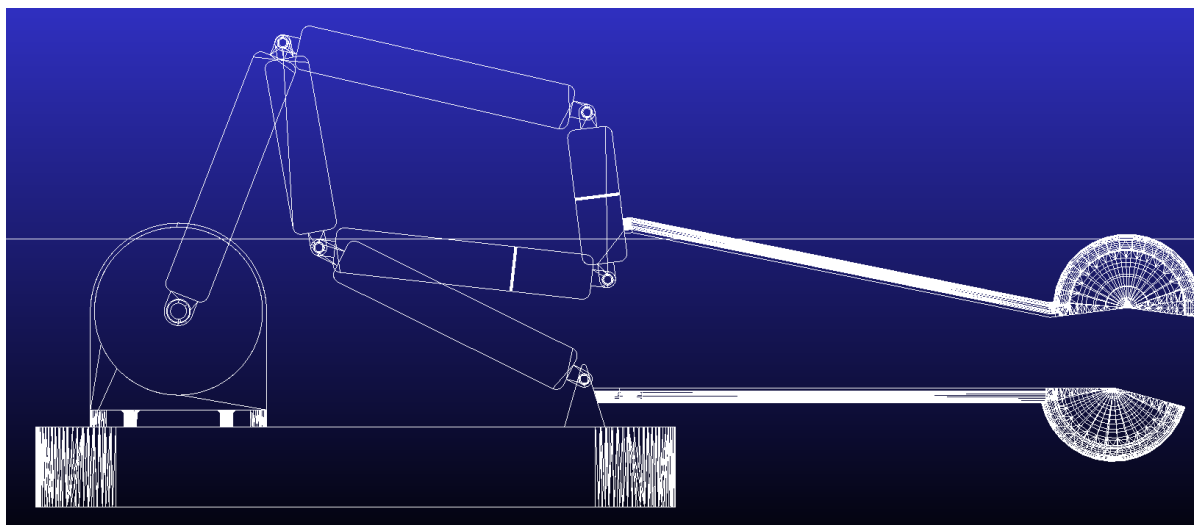
**Table 1.** Institution parameters

**表 1.** 机构参数

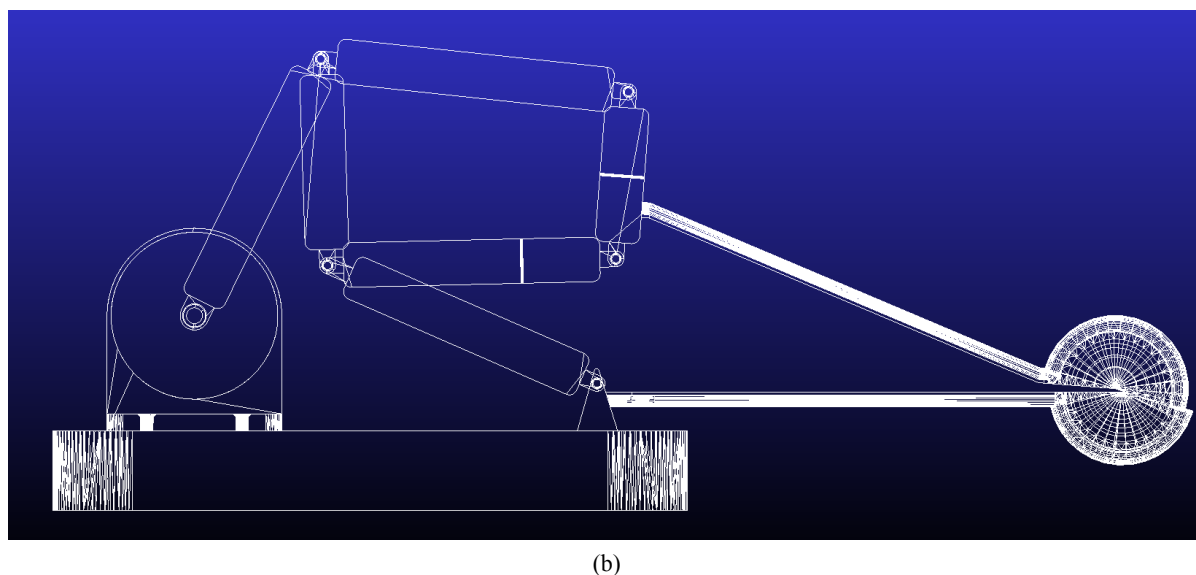
连杆	长度(mm)
$l_{OA}$	31
$l_{AD}$	24
$l_{DE}$	22
$l_{EO}$	34.5
$l_{AB}$	24
$l_{BC}$	12
$l_{CD}$	22
$l_{CG}$	115.5

为研究机构运动特性,本文对机构模型的运动过程的初始和末端位置进行了分析,如图 4(a)和图 4(b)所示。当  $\theta_m$  为  $117.5^\circ$  时,初始状态为图(a),当电机开始驱动时,  $\theta_m$  发生改变,驱动四杆机构运动,导致上连杆向下运动,最终与下连杆闭合,如图 4(b)所示。机构的闭合证明了其符合夹持特性。

为更清楚地研究上连杆夹持时的运动特性,本文选取了上连杆上的一个参考点 M 进行分析, M 点的高度为 99.128 mm,其在连杆上的位置如图 5 所示。



(a)



(b)

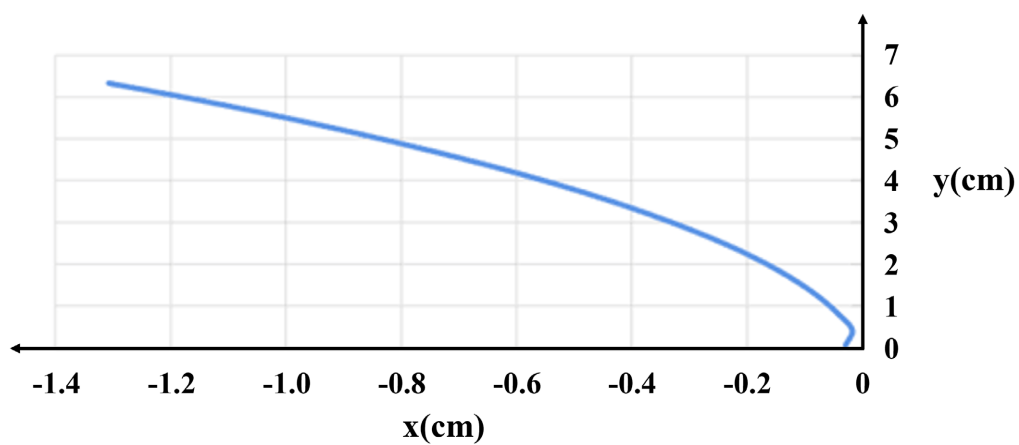
**Figure 4.** Adams model for different states: (a) initial state; (b) terminal state

**图 4.** 不同状态的 Adams 模型: (a) 初始状态; (b) 末状态



**Figure 5.** Initial position of the reference point M

**图 5.** 参考点 M 的初始位置



**Figure 6.** Trajectory diagram of the upper linkage

**图 6.** 上连杆运动轨迹图

本文对参考点 M 在上连杆闭合过程的高度和运动轨迹进行了分析, 如图 6 所示(参考系原点为下连



杆末端)。基于理论分析,随着机构的运动,连杆 OA 与 AB 的夹角会逐渐增大,四杆机构 ABCD 向下运动的同时给上连杆施加向右的推力,使连杆向右运动, M 点高度下降。当四杆机构 ABCD 运动到一定程度时,会给上连杆一个向左的力,此时 ABCD 对上连杆的作用力为拉力,使连杆向左运动。图 6 中 M 点的运动轨迹与理论结果基本一致,证明模型能正确模拟夹持动作时机构的运动过程。

#### 4.2. 食物夹持接触力分析

在给定的初始食物尺寸  $w_0$  为 15 mm, 给定的最终输入角度  $\theta_{in}$  达到  $120^\circ$  时, 分析接触力大小  $f$  与食物刚度  $K$  的关系。根据仿真分析, 如图 7 所示, 当食物刚度  $K$  小于  $0.2 \times 10^{-3}$  N/m 时, 接触力  $f$  会随着  $K$  值的增加而显著增长, 而当食物刚度  $K$  大于  $0.2 \times 10^{-3}$  N/m 时, 接触力  $f$  增大趋势缓慢, 并逐渐趋近于一个定值。图 8 为 T. Oka 等人的计算结果, 根据图 7 与图 8 的对比, 本文的模拟结果与验证的计算结果基本一致, 验证了本文所建立模型的有效性, 并证明了夹持的接触力会随食物刚度的变化而变化。

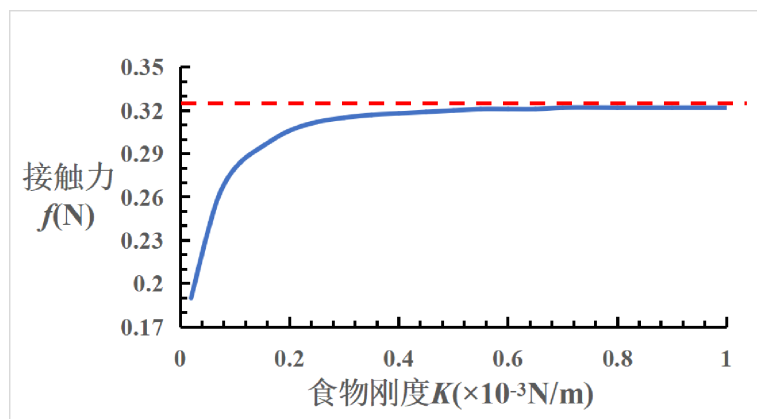


Figure 7. The relationship between contact force  $f$  and the stiffness  $K$  of the food

图 7. 接触力大小  $f$  与食物刚度  $K$  的关系

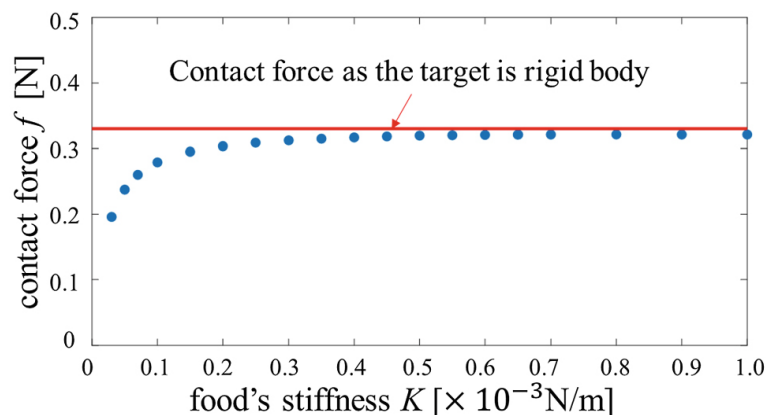


Figure 8. Relation between contact force and the food's elasticity for  $w_0 = 15$  mm [10]

图 8. 当  $w_0 = 15$  mm 时接触力和食物刚度的关系[10]

## 5. 结论

本文基于数字模拟建立了一种基于柔性夹持筷子的欠驱动型夹取机构, 可用于送餐机器人等智能辅具中。通过建立夹持装置的力学模型, 本文得出了在给定输入角度  $\theta_{in}$  的情况下接触力  $f$  的算法。接着本



文采用 Adams 软件进行仿真分析, 测定了上连杆的运动轨迹以及在给定食物初始尺寸  $w_0$  和输入角度  $\theta_m$  的条件下接触力大小  $f$  与食物刚度  $K$  的关系, 证明了模型的有效性。

## 基金项目

国家重点研发计划 2022YFC3601400, 上海市生物医药科技支撑专项 22S31901400 资助。

## 参考文献

- [1] Nyberg, M., Olsson, V., Pajalic, Z., Örtman, G., Andersson, H.S., Blücher, A., Wendin, K. and Westergren, A. (2015) Eating Difficulties, Nutrition, Meal Preferences and Experiences among Elderly: A Literature Overview from a Scandinavian Context. *Journal of Food Research*, 4, 22-37. <https://doi.org/10.5539/jfr.v4n1p22>
- [2] 周兰姝. 我国老龄化背景下残疾态势分析及基于健康老龄化理论的预防策略思考[J]. 解放军护理杂志, 2022, 39(1): 1-3.
- [3] 王岚, 裴立坤, 李彦涛, 等. 助餐机器人的机构设计与控制模式研究[J]. 机电一体化, 2007, 13(5): 42-64.
- [4] Soyama, R. (2003) The Development of Meal-Assistance robot "My Spoon". *Proceedings of the 8th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Taejon, 23-25 April 2003, 88-91.
- [5] Dune, C., Leroux, C. and Marchand, E. (2007) Intuitive Human Interaction with an Arm Robot for Severely Handicapped People—A One Click Approach. 2007 *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, 13-15 June 2007, 582-589. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428484>
- [6] Song, W.K. and Kim, J. (2012) Novel Assistive Robot for Self-Feeding. *Robotic Systems—Applications, Control and Programming*, 1, 43-60. <https://doi.org/10.5772/25756>
- [7] Secom. (2020) My Spoon. <https://www.secom.co.jp/english/myspoon/>
- [8] 张立勋, 李彦涛, 高峻, 等. 助餐机器人轨迹规划研究[J]. 系统仿真学报, 2010(5): 1232-1236.
- [9] 马广韬. 人因工程学与设计应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [10] Oka, T., Solis, J., Lindborg, A.L., et al. (2020) Kineto-Elasto-Static Design of Underactuated Chopstick-Type Gripper Mechanism for Meal-Assistance Robot. *Robotics*, 9, 50. <https://doi.org/10.3390/robotics9030050>
- [11] Oka, T., Matsuura, D., Sugahara, Y., et al. (2020) Chopstick-Type Gripper Mechanism for Meal-Assistance Robot Capable of Adapting to Size and Elasticity of Foods. [https://www.researchgate.net/publication/328510438\\_Chopstick-type\\_Gripper\\_Mechanism\\_for\\_Meal-Assistance\\_Robot\\_Capable\\_of\\_Adapting\\_to\\_Size\\_and\\_Stiffness\\_of\\_Foods](https://www.researchgate.net/publication/328510438_Chopstick-type_Gripper_Mechanism_for_Meal-Assistance_Robot_Capable_of_Adapting_to_Size_and_Stiffness_of_Foods)