

面向球果抓取的主动式三指手爪设计与试验

秦欢欢¹ 赖虹妃² 刘坤² 陈光明² 卢伟¹ 薛金林² 李佩娟³

(1. 南京农业大学人工智能学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031;

3. 南京工程学院工业中心, 南京 211167)

摘要:为解决球形果实快速、稳定抓取问题,设计了一种主动式三指手爪。该手爪指部机构末端安装有球状主动滚轮,主动滚轮外附着柔性膜以增加手爪柔顺性与摩擦力。每个指部机构具有2个自由度,可实现手指开合以及主动滚轮旋转。工作时3根手指相互配合,在摩擦力作用下球果向手爪内部运动,可在仅接触球果条件下实现球果快速、稳定抓取,无需精确控制手爪位置和姿态。为阐述抓取过程中主动式手爪与球果的交互关系,推导了主动式手爪-球果交互模型。选取番茄、苹果以及橙子为典型球形抓取对象,开展了3款手爪(主动式手爪、鳍状软爪以及平行刚爪)的抓取试验。抓取试验结果表明,所设计主动式手爪平均首次抓取成功率为96.7%,平均抓取无损率为98.3%,平均任务时间为5.9 s,在抓取成功率、抓取质量以及抓取效率3方面均有较好表现,验证了该主动式手爪的有效性。

关键词: 农业机器人; 球果抓取; 主动滚轮; 主动式手爪; 柔顺性

中图分类号: TP241.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)07-0067-08

OSID:



Design and Experiment of Active Gripper for Spherical Fruit Grasping

QIN Huanhuan¹ LAI Hongfei² LIU Kun² CHEN Guangming² LU Wei¹ XUE Jinlin² LI Peijuan³

(1. College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

3. Industrial Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to solve the problem of fast and stable spherical fruit grasping, a novel active three-finger gripper was proposed. A spherical active roller was installed at the end of the finger mechanism. A flexible silicone membrane was attached to the active roller to increase the compliance and friction of the gripper. Each finger mechanism had two degrees of freedom, which can realize the opening and closing of the finger and the rotation of the active roller. The three fingers cooperated with each other during work, and the spherical fruit can be translated toward the gripper under the friction. The spherical fruit can be grasped quickly and stably by only touching it, without the need to precisely control the position and posture of the gripper. In order to illustrate the interactive relationship between the designed active gripper and the spherical fruit, an interaction model between them was derived. Finally, in order to verify the effectiveness of the gripper, tomatoes, apples and oranges were selected as typical spherical grasping objects, and a grasping experiment based on three types of grippers (the active gripper, the fin-ray soft gripper and the parallel rigid gripper) was conducted. The experimental results showed that the active gripper had an average first-time grasping success rate of 96.7%, an average grasping intact rate of 98.3%, and an average task time of 5.9 s, achieving relatively good performance in terms of grasping success rate, grasping quality and grasping efficiency.

Key words: agricultural robot; spherical fruit grasping; active roller; active gripper; compliance

收稿日期: 2024-02-18 修回日期: 2024-04-28

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20210408)、中央高校基本科研业务费产业协同创新项目(KYCYXT2022020)和江苏省重点研发计划项目(BE2021016-5)

作者简介: 秦欢欢(1989—),男,讲师,主要从事农业智能机器人技术研究,E-mail: qhuanhuan1001@njau.edu.cn

通信作者: 陈光明(1967—),男,副教授,主要从事农业机器人与智能农业装备研究,E-mail: gmchen@njau.edu.cn

0 引言

机械手爪(又称末端执行器)是农业机器人的关键部件,手爪与目标果实直接接触,其性能直接影响果实操作(如采摘、分拣等)效率和损伤率^[1-3]。目前,针对水果抓取问题,国内外研究人员和相关机构开展了大量研究。根据手爪-果实的交互形式,手爪大致可以分为:夹持型、包裹型和吸附型手爪^[4]。

通常,夹持型手爪通过执行器驱动手指对目标果实建立力封闭来实现水果稳定抓取,手爪与果实间的仿形结构大多为点仿形。如金波等^[5]设计的三指九关节欠驱动机械手爪;傅隆生等^[6]针对猕猴桃抓取问题提出了基于钳式组合手指的手爪;尹建军等^[7]提出的欠驱动双指四指节葡萄抓取手爪,Festo公司设计了用于抓取苹果的双指平行手爪^[8],YAGUCHI等^[9]设计了用于番茄收获的两指手爪。响应快速和夹持力可控是夹持型手爪的两大优势。然而,该型手爪内部大多带有刚性结构,与环境相容性不高。与柔软、易损果实交互时,需引入力传感器以增加手爪柔顺性^[10]。包裹型手爪通常由柔性材料制成,当驱动包裹型手爪运动时,手爪会与目标果实表面逐渐顺应互容,最终对果实建立形封闭/力封闭。包裹型手爪与果实间的仿形结构一般为面仿形。包裹型手爪的典型实例包括:田辉等^[10]提出的基于刚度增强型软体执行器的多腔体型手爪;刘晓敏等^[11]设计的基于气动柔性驱动器的三指柔性手爪;赵云伟等^[12]设计的无系留智能软体手爪;贾江鸣等^[13]借鉴藤萝卷曲原理提出的气动软体手爪;李健等^[14]开发的基于弧线型气道的新型四叶片软体手爪;庄煜等^[15]构建的光固化一体成型软体手爪;PARK等^[16]设计的结合柔性/刚性材料的三指复合手爪;HOHIMER等^[17]基于气动执行器设计的三指柔性手爪;SHEA等^[18]针对易损果蔬提出的基于弹性体的两指柔性手爪。包裹型手爪具有形变能力强、环境相容性高以及具有无限自由度的优点,但其抓取力通常不大,需要在手爪上集成力传感以实现抓取状态的实时感知。吸附型手爪通过在手爪与果实表面之间建立负压来固定和移动果实^[19]。王晓楠等^[20]面向番茄果实设计的真空吸附手爪、BAC等^[21]基于真空吸盘设计的甜椒抓取末端执行器以及SILWAL等^[22]面向苹果抓取设计的末端执行器等都是吸附型手爪的典型代表。吸附型手爪抓取速度快,对果实位置、姿态不敏感。但其工作时需要将负压控制在一个合适的范围内,以免对柔软、易损果实造成冲击。另外,果实表面灰尘、枝叶遮挡等因素

也会影响手爪抓取成功率。

总体来说,夹持型手爪和包裹型手爪需要精确控制手爪位置和姿态以顺利抓取果实赤道面及附近区域,限制了抓取效率并对机器人控制器提出了更高的要求。吸附型手爪虽可极大缩短果实抓取所需时间,但其与果实交互时易受多余枝叶、果实表面灰尘等因素影响。本文以带有主动机构^[23-26]的夹持器为灵感,设计一种面向球形果实抓取的新型主动式三指手爪,推导手爪-球果交互模型。以番茄、苹果和橙子为典型球形作业对象,开展抓取试验,以验证所设计手爪的有效性。

1 主动式手爪设计

1.1 手爪机械结构

以番茄、苹果和橙子为典型球形抓取对象,这3类成熟果实直径为40~120 mm,单果质量为80~400 g^[27-28],主动式手爪在设计过程中需充分考虑抓取对象规格,确定抓取力合理范围。

设计的主动式手爪机械结构如图1所示,手爪为三指结构,由底座、指部机构以及柔性膜组成。底座为2层结构,上层与指部机构的智能执行器相连,下层与有机械臂相连的安装孔位,中间区域放置整个手爪控制器。控制器控制整个手爪运动,主要由电源模块、直流电机驱动模块、电平转换模块以及微处理器模块(ATmega2560, Microchip)等部分组成。手爪包含3个指部机构,每个指部机构具有2个自由度,由智能执行器、执行器连接件、连杆和主动滚轮组成。智能执行器(XM430-W350-R型, DYNAMIXEL)一端固定于底座,一端通过连接件与连杆相连,其提供指部机构开合自由度。连杆末端安装有球状主动滚轮,滚轮内配有微型直流电机(GA12-N20型, ASLONG),接触球果后可主动旋

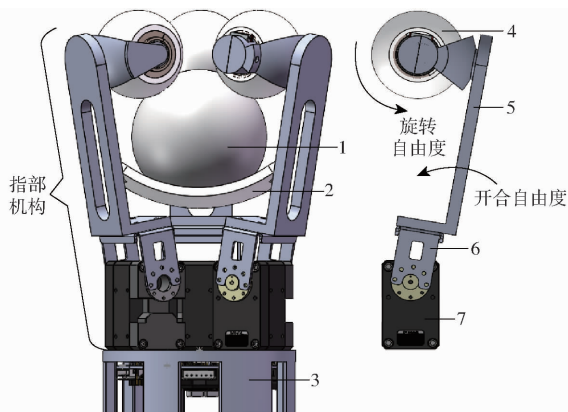


图1 手爪机械结构

Fig.1 Mechanical structure of gripper

1. 球果 2. 柔性膜 3. 底座 4. 主动滚轮 5. 连杆 6. 执行器连接件 7. 智能执行器

转,提供指部机构旋转自由度。通过驱动智能执行器,由执行器连接件、连杆以及主动滚轮向目标球果施加压力,加之主动滚轮旋转(提供摩擦力),便可实现球果可靠、稳定抓取。柔性膜由邵氏硬度为 15 的硅胶倒模而成,其 3 个角分别固定于指部机构连杆上,用于在球果完全进入手爪时向球果提供支撑和约束。

球状主动滚轮爆炸图如图 2 所示,其主要由微型直流电机、电机外壳、电机轴连接件、球壳、球膜以及轴承等部分组成。直流电机壳体通过外壳固定,并通过大轴承固定在球壳内部。电机轴连接件安装于直流电机轴上,再嵌入球壳凹槽内,用于向外传递转速与扭矩。球壳外侧由球膜包裹,球膜同样由邵氏硬度为 15 的硅胶倒模而成,用于增加手爪柔顺性与摩擦力。在主动滚轮装配完毕后,电机外壳和轴承内圈与电机壳体保持相对静止,电机轴连接件、球壳、球膜以及轴承外圈与电机轴同步旋转。

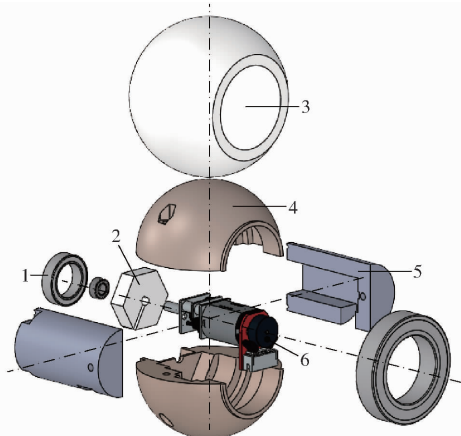


图 2 主动滚轮爆炸图

Fig.2 Exploded view of active roller

- 1. 轴承 2. 电机轴连接件 3. 球膜 4. 球壳 5. 电机外壳
- 6. 直流电机

1.2 手爪工作原理

传统刚体/软体手爪一般通过力封闭或形封闭方式对目标球果建立约束,在与球果交互过程中极大依赖机器人控制器的位姿控制精度。以刚体手爪抓取球果为例,控制器需要精确控制刚体手爪位置以使其可顺利夹持果实赤道面。所设计主动式手爪优势在于无需精确控制手爪位置和姿态,可在仅接触果实表面条件下实现球果快速、稳定抓取。整个抓取过程大致可分为:接触阶段、运送阶段以及约束阶段(图 3)。

首先,手爪张开,主动滚轮转动,机械臂运动以使手爪接触目标球果,接触后摩擦力将球果向手爪内部运送(图 3a);其次,随着球果运送,手爪开合角度进一步增大,在运送球果赤道面时达到最大,之后

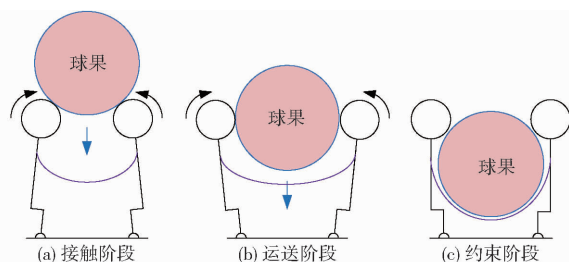


图 3 手爪抓取球果流程

Fig.3 Grasping process of gripper

又慢慢减小,直至球果被完全运送进手爪中(图 3b);最后,在球果被完全运送进手爪之后,主动滚轮停止转动,柔性膜被拉伸直至充分适应果实表面,并和滚轮一起对果实建立约束(图 3c)。约束阶段手爪闭合范围由手爪阻抗控制器确定,智能执行器实时反馈闭合位置、速度和电流。需要注意的是,图 3 中的手爪为实际所设计手爪的简化示意,图 3c 中手爪合拢状态并不反映实际合拢情况。试验中手爪合拢状态与抓取对象尺寸相关。

1.3 手爪-果实交互模型

球果的顺利抓取依赖于手爪智能执行器和直流电机配合,与手爪开合角、主动滚轮摩擦因数以及执行器力矩等有关。在分析整个手爪对球果的作用之前,先分析手爪单根手指对球果的作用。在仅考虑手爪单根手指对球果作用的前提下,手指对果实施加 2 个力:主动滚轮对球果的压力 F_n 和两者间的摩擦力 f (图 4)。这两个力可沿着运送方向和聚拢方向分别分解为 F_{no} 和 F_{nr} 以及 f_i 和 f_r 。设主动滚轮和球果半径分别为 R_l 和 R_g ,则单根手指对球果的作用可表示为运送力 F_t 和聚拢力 F_r 。 F_t 使球果在运送方向上运动, F_r 使球果往聚拢方向移动,两个力计算式为

$$\begin{cases} F_t = f_i - F_{no} = f \sin \delta - F_n \cos \delta \\ F_r = f_r + F_{nr} = f \cos \delta + F_n \sin \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中 δ —— F_{no} 与 F_n 的夹角

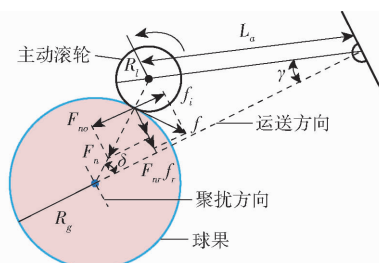


图 4 手爪单根手指对球果的作用

Fig.4 Effect of single gripper finger on spherical fruit

只有 $F_t > 0$ 时,球果才会向手爪方向运动,即表现为运送引力。反之,表现为运送斥力,无法实现球果顺利抓取。设 $F_t = 0$ 时手爪张角为 γ_0 ,记为临界角,只有当手爪张角大于该角度时,才有可能实现球

果顺利抓取。临界角 γ_0 求解需引入

$$\begin{cases} (R_l + R_g) \sin \delta = L_a \sin \gamma \\ f = \mu_l F_n \end{cases} \quad (2)$$

式中 γ ——手爪张角

L_a ——手指等效长度

μ_l ——滚轮与球果间摩擦因数

联立式(1)和式(2)临界角 γ_0 可表示为

$$\gamma_0 = \arcsin \frac{R_l + R_g}{L_a \sqrt{1 + \mu_l^2}} \quad (3)$$

在静力学平衡状态下主动滚轮受力情况如图5所示, F_{nc} 和 f_c 为图4中的反作用力, F_p 为连杆对滚轮的拉力, F_r 为智能执行器力矩 M_r 通过连杆作用在滚轮上的力, F_r 与连杆垂直, 且满足 $M_r = F_r L_a$ 。将这4个力沿运送方向和聚拢方向分解, 可得

$$\begin{cases} F_{nc} \cos \delta + F_p \cos \gamma = f_c \sin \delta + F_r \sin \gamma \\ F_{nc} \sin \delta + f_c \cos \delta = F_p \sin \gamma + F_r \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

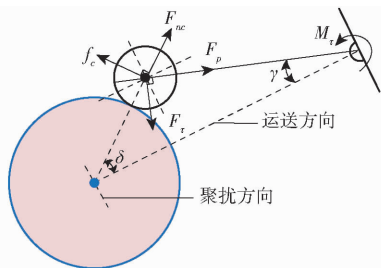


图5 主动滚轮静力学平衡状态

Fig. 5 Static equilibrium state of active roller

考虑一般情况, 设手爪手指数量为 n , 且这 n 根手指均匀分布在底座上。手指间聚拢力相互抵消, 因此, 聚拢力合力 $F_R = 0$ 。运送力合力记为 F_T , 为单根手指运送力 F_{T_i} 的 n 倍: $F_T = nF_{T_i}$ 。设手爪倾角为 β , 该角度也是 F_T 与水平方向的夹角(图6), 为手爪成功实现球果抓取, 须满足

$$F_T \sin \beta \geq G \quad (5)$$

式中 G ——球果重力

图6中 O_0 和 O 分别为球果起始和当前位置。

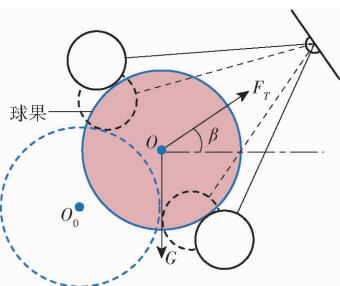


图6 手爪对球果的作用

Fig. 6 Effect of gripper on spherical fruit

在给定智能执行器力矩 M_r 、手爪张角 γ 以及手爪和抓取对象参数 (L_a 、 R_l 和 R_g) 时, F_n 、 F_t 和 F_r 可表示为

$$\begin{cases} F_n = \frac{F_r}{\sin \gamma \cos \delta - \mu_l \sin \gamma \sin \delta + \cos \gamma \sin \delta + \mu_l \cos \gamma \cos \delta} \\ F_t = \frac{(\mu_l \sin \delta - \cos \delta) F_r}{\sin \gamma \cos \delta - \mu_l \sin \gamma \sin \delta + \cos \gamma \sin \delta + \mu_l \cos \gamma \cos \delta} \\ F_r = \frac{(\mu_l \cos \delta + \sin \delta) F_r}{\sin \gamma \cos \delta - \mu_l \sin \gamma \sin \delta + \cos \gamma \sin \delta + \mu_l \cos \gamma \cos \delta} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad \delta = \arcsin \left(\sin \gamma \frac{L_a}{R_l + R_g} \right)$$

可抓取球果极限尺寸如图7所示, 球果尺寸再大则手爪将无法约束果实。图中, 点 A 为主动滚轮中心位置, 点 B 为主动滚轮与球果接触点, 点 C 为球果中心, 点 D 为手爪底座中心, 点 E 为手爪与连杆相切点。根据三角关系可得到

$$\begin{cases} (L_{AB} + L_{BC})^2 = L_{AE}^2 + L_{CE}^2 \\ L_{CE}^2 + L_{ED}^2 = L_{CD}^2 \\ (L_{AE} + L_{ED}) L_{CE} = (L_{AB} + L_{BC}) L_{CD} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $L_{AB} = R_l$, 考虑到微型直流电机以及装配零件尺寸, L_{AB} 为 30 mm; $L_{BC} = R_g$, 考虑到最大抓取球果尺寸为 120 mm, L_{BC} 为 60 mm; $L_{CE} = L_{BC}$, 为 60 mm。将以上参数代入式(7), 可计算得等效连杆长度 $L_{AD} = L_{AE} + L_{ED}$, 约为 120 mm。

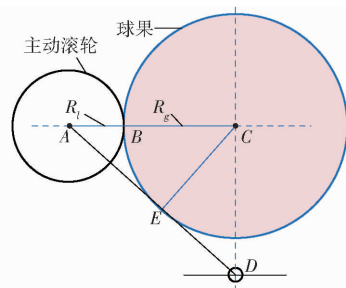


图7 手爪抓取球果范围

Fig. 7 Spherical fruit range of gripper

1.4 手爪仿真分析

通过对手爪施加速度、力等激励, 模拟激励下球果位移、速度等运动特性, 验证手爪对球果的作用。所设计主动式手爪动力学仿真在 ADAMS 平台开展, 主要仿真步骤为: ①建立仿真模型, 按照手爪属性设置材料, 采用球体模型代替理想球果, 质量设置为 150 g。②参考手爪零件连接关系和运动特性, 为模型添加约束、驱动和激励, 主动滚轮与球果间静摩擦因数设为 0.55, 动摩擦因数设为 0.3, 主动滚轮转速设为 120 r/min, 智能执行器力矩设为 800 mN·m。③启动仿真, 观察仿真结果(图8)。

仿真较好展示了手爪抓取球果流程(图8a), 手爪接触球果后, 球果在摩擦力作用下逐渐上升, 直至最终完全进入手爪内部。整个仿真过程中(图8b),

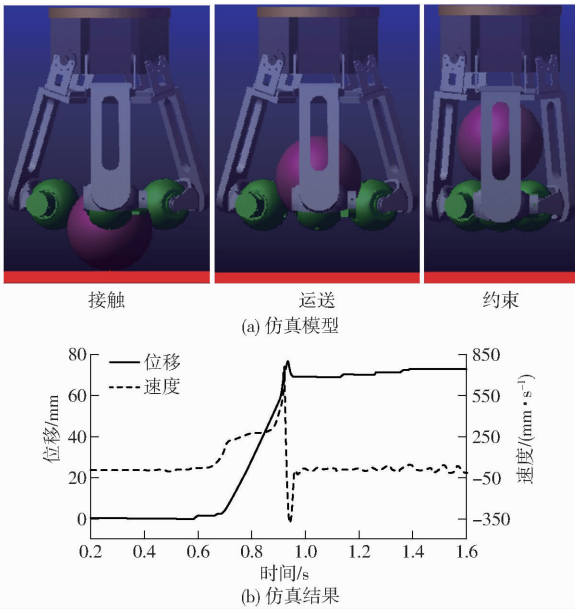


图 8 ADAMS 手爪动力学仿真

Fig. 8 ADAMS dynamic simulation of gripper

手爪抓取球果耗时不到 1 s, 球果位移约为 70 mm, 最大速度约为 730 mm/s。由于仿真过程中重力的作用, 在球果完全进入手爪后观察到球果位移和速度下降, 最终稳定约束在手爪内。

手爪除智能执行器、直流电机以及标准件之外, 大部分零件通过 3D 打印加工而成, 材料为树脂。手爪参数见表 1, 实物图如图 9 所示。

表 1 手爪参数

Tab.1 Gripper specifications

参数	数值
连杆有效长度/mm	120
抓取球果直径/mm	20 ~ 120
手爪质量/g	800
手爪尺寸/(mm × mm × mm)	124 × 138 × 210



图 9 手爪实物图

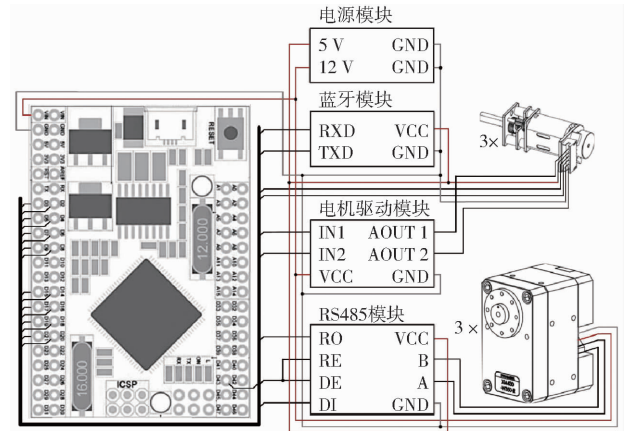
Fig. 9 Gripper prototype

2 手爪柔顺控制与抓取试验

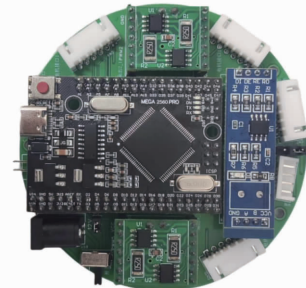
2.1 柔顺控制器设计

手爪硬件连接与硬件 PCB 如图 10a、10b 所示,

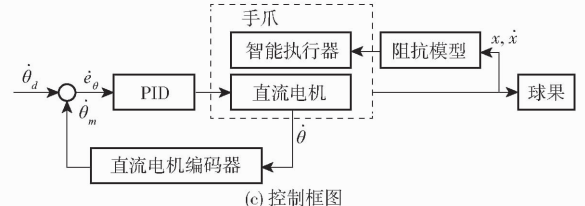
电源模块给微控制器、蓝牙模块、电机驱动模块、RS485 电平转换模块以及直流电机和智能执行器供电, 手爪(微控制器)与机械臂之间的通讯由蓝牙模块完成, 微控制器发出控制指令, 经电机驱动模块驱动 3 个直流电机运动以及 RS485 电平转换模块控制 3 个智能执行器运动。



(a) 硬件连接



(b) 硬件PCB



(c) 控制框图

图 10 手爪控制系统

Fig. 10 Control system of gripper

手爪柔顺控制框图如图 10c 所示。在该柔顺控制器中, 采用 PID 控制器对直流电机速度进行控制, 以使主动滚轮同时达到期望转速 $\dot{\theta}_j^d (j = 1, 2, 3)$, 实际主动滚轮转速由直流电机编码器反馈, $\dot{\theta}$ 为连续转速信号, $\dot{\theta}_m$ 为测量转速信号, $\dot{\theta}_d$ 为理想转速信号, $e_{\dot{\theta}}$ 为误差转速信号; 手爪交互对象限定为球果, 考虑到部分球形果实柔软, 且非标准球体, 采用阻抗模型对手爪 - 果实交互力进行约束, 交互力计算式为

$$F = kx + b\dot{x} \quad (8)$$

式中 x ——手指位置 \dot{x} ——速度信号

k ——刚度, N/m

b ——阻尼系数, N·s/m

手指位置与速度信号可通过智能执行器 API 接口实时反馈。

2.2 抓取试验

为评估所设计主动式手爪的有效性,选取成熟番茄、苹果以及橙子各 60 个,将其随机分为 3 组(每组番茄、苹果以及橙子各 20 个),开展抓取试验。设置 2 个对照组(平行刚爪和鳍状软爪)进行对比,如图 11 所示。试验球果直径为 60~90 mm(考虑平行刚爪有效行程 26 mm),质量为 130~300 g。

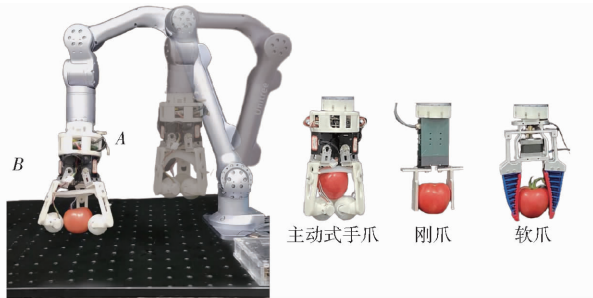


图 11 球果抓取试验场景(以番茄为例)

Fig. 11 Experimental setup (taking tomato as example)

将机械臂(Z1型,Unitree)固定于水平桌面上,其末端分别安装刚爪(PGE-50型,DH Robotics)、鳍状软爪以及所设计主动式手爪。试验开始时,机械臂首先运动到设定初始位置(图 11 中点 A);其次,机械臂运动到球果上方(图 11 中点 B),手爪启动并对球果进行抓取;之后,机械臂向上运动设定距离以使球果成功离开桌面;最后,手爪张开释放球果,机械臂重新运动到设定初始位置以准备进行下一次抓取。抓取过程中,若球果成功离开桌面且未发生掉落,则该次抓取为成功,记为 1;若球果未离开桌面或发生掉落,则该次抓取为失败,记为 0。抓取失败时,机械臂和手爪会复位以进行再次抓取,直至成功完成一次抓取为止。每次成功抓取之后观察球果表面是否有破损、不可逆形变或者明显凹痕,如没有则标记为无损(无损记为 1,反之记为 0)。此外,记录每次抓取过程中机械臂从设定初始位置到再次回到该位置的时间。由于试验所用 3 种手爪工作模式各不相同,在正式试验开始前进行预试验,以确定最佳手爪控制参数。为在抓取成功率和无损率之间取得平衡,所设计主动式手爪柔顺控制器中 k 为 220 N/m, b 为 150 N·s/m,直流电机转速为 80 r/min;软爪设置为位置控制模式,其手指运动到 $D-3$ mm 处停止, D 为果径;刚爪设置为力控模式,抓取力为 10 N。试验结束后,计算 3 种手爪首次平均抓取成功率、平均无损率以及平均任务时间,并采用统计学方法验证对照组之间是否具有统计学差异。

如图 12 所示,所设计主动式手爪、软爪以及刚爪首次平均抓取成功率分别为 96.7%、73.3% 以及 100%。由于首次抓取成功率未通过 Shapiro-Wilk 正态性检验,因此使用 Friedman 检验进行统计学分析。检验结果表明,3 款手爪首次抓取成功率之间的差异具有统计学意义($\chi^2(2) = 19.000, p < 0.001, \alpha = 0.05$)。进一步地,经过 Bonferroni 校正后,成对比较分析结果显示,刚爪首次抓取成功率显著高于软爪($p = 0.034$),而主动式手爪和刚爪首次抓取成功率没有显著性差异。

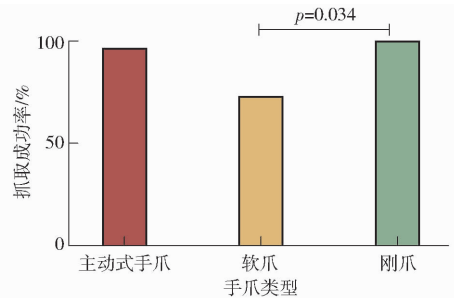


图 12 抓取成功率结果

Fig. 12 Results of success rate

如图 13a 所示,主动式手爪、软爪和刚爪平均无损率为 98.3%、100%、71.7%。由于此 3 项数据仍然未通过 Shapiro-Wilk 正态性检验,同样使用 Friedman 检验进行统计学分析。检验结果表明,在主动式手爪、软爪和刚爪平均无损率之间存在显著性差异($\chi^2(2) = 21.412, p < 0.001, \alpha = 0.05$),且经 Bonferroni 校正后成对比较分析结果表明,主动式手爪、软爪抓取无损率与刚爪抓取无损率之间存在显著性差异。其中,主动式手爪抓取无损率显著高于刚爪($p = 0.034$),软爪抓取无损率也显著

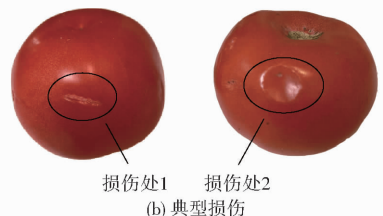
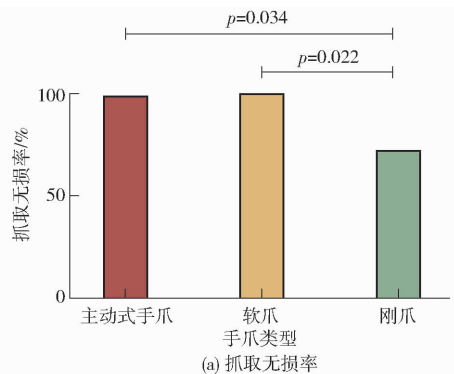


图 13 抓取无损率结果和典型损伤

Fig. 13 Results of intact rate and typical damage image

高于刚爪 ($p = 0.022$)。由于番茄果实较柔软、果皮较为脆弱,番茄在 3 种球果中较容易发生损伤,典型损伤图像如图 13b 所示。试验所选取番茄成熟度有差异,抓取力无法适应所有番茄是发生损伤的主要原因。

主动式手爪、软爪和刚爪任务平均所需时间为 5.9、6.8、6.2 s (图 14)。时间数据通过 Shapiro-Wilk 正态性检验 (主动式手爪: $p = 0.896$; 软爪: $p = 0.740$; 刚爪: $p = 0.462$) 以及球形度检验 ($p = 0.722$)。使用方差分析揭示 3 款手爪任务时间上的统计学意义。结果表明,主动式手爪、软爪和刚爪任务时间之间具有显著性差异 ($F = 137.013$, $p < 0.001$, $\alpha = 0.05$)。经 Bonferroni 校正后成对比较分析结果显示,3 款手爪任务时间两两之间均具有显

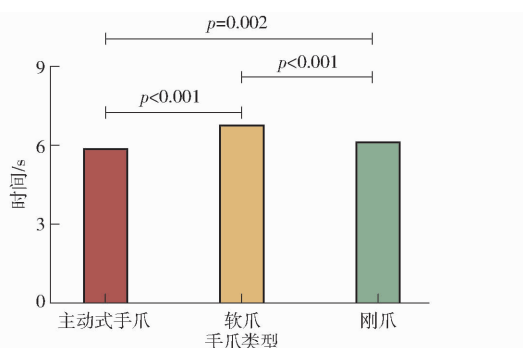


图 14 任务时间结果

Fig. 14 Results of task time

著性差异,即:主动式手爪任务时间显著低于软爪 ($p < 0.001$),软爪任务时间显著高于刚爪 ($p < 0.001$),刚爪任务时间显著高于主动式手爪 ($p = 0.002$)。

结合首次抓取成功率、无损率以及抓取时间统计学分析结果,表明本文所提出的主动式手爪在抓取成功率、抓取质量以及抓取效率 3 方面均有较好表现。

3 结束语

提出了一种主动式手爪设计方案。手爪为 3 指结构,由底座、指部机构以及柔性膜等部分组成。指部机构一端通过智能执行器与底座相连,一端安装有主动滚轮。工作时,手爪张开,主动滚轮转动,摩擦力将球果向手爪方向运送;在球果被完全运送进手爪后,主动滚轮停止转动,柔性膜被拉伸以充分适应果实表面,并和滚轮一起对果实建立约束。为评估所设计主动式手爪的有效性,开展了面向典型球果抓取试验。试验结果表明,3 款手爪(该主动式手爪、软爪以及刚爪)抓取桌面上番茄、苹果以及橙子各 20 个,并记录抓取成功率、无损率以及任务时间。抓取结果的统计学分析表明,相较于软爪和刚爪,所提出的主动式手爪在抓取成功率、抓取质量以及抓取效率 3 方面均有较好表现。

参 考 文 献

- [1] ZHOU H, WANG X, AU W, et al. Intelligent robots for fruit harvesting: recent developments and future challenges[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(5): 1856 - 1907.
- [2] 王飞涛, 樊春春, 李兆东, 等. 机器人在设施农业领域应用现状及发展趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 93 - 98, 120.
WANG Feitao, FAN Chunchun, LI Zhaodong, et al. Application status and development trend of robots in the field of facility agriculture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 93 - 98, 120. (in Chinese)
- [3] 彭艳, 刘勇敢, 杨扬, 等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 11 - 20.
PENG Yan, LIU Yonggan, YANG Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 11 - 20. (in Chinese)
- [4] 韦雨桦, 袁嫣红, 李正军. 复合式手爪设计及应用[J]. 建模与仿真, 2023(12): 717.
WEI Lihua, YUAN Yanhong, LI Zhengjun. Design and application of composite gripper[J]. Modeling and Simulation, 2023(12): 717. (in Chinese)
- [5] 金波, 林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 1 - 8.
JIN Bo, LIN Longxian. Design and force control of an underactuated robotic hand for fruit and vegetable picking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 1 - 8. (in Chinese)
- [6] 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1 - 8.
FU Longsheng, ZHANG Fanian, YOSHINORI Gejima, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1 - 8. (in Chinese)
- [7] 尹建军, 陈永河, 贺坤, 等. 抓持-旋切式欠驱动双指手葡萄采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 12 - 20.
YIN Jianjun, CHEN Yonghe, HE Kun, et al. Design and experiment of grape-picking device with grasping and rotary-cut type of underactuated double fingered hand[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 12 - 20. (in Chinese)
- [8] ZHANG B, XIE Y, ZHOU J, et al. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications

in agricultural robots: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177: 105694.

- [9] YAGUCHI H, NAGAHAMA K, HASEGAWA T, et al. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016: 652–657.
- [10] 田辉, 张驻军, 王玲, 等. 果蔬采摘刚度增强型软体抓手设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(10): 1–6. TIAN Hui, ZHANG Zhujun, WANG Ling, et al. Design and experiment of a soft gripper with enhanced rigidity for fruit and vegetable picking[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(10): 1–6. (in Chinese)
- [11] 刘晓敏, 田德宝, 宋懋征, 等. 气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 30–43. LIU Xiaomin, TIAN Debao, SONG Maozheng, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 30–43. (in Chinese)
- [12] 赵云伟, 黄浩然, 刘晓敏, 等. 无系留气动自适应球果采摘软体手爪设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 74–84. ZHAO Yunwei, HUANG Haoran, LIU Xiaomin, et al. Design and grasping experiments on untethered adaptive pneumatic soft gripper for globose fruit picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 74–84. (in Chinese)
- [13] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 26–34. JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 26–34. (in Chinese)
- [14] 李健, 戴楚彦, 王扬威, 等. 面向草莓抓取的气动四叶片软体抓手研制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(1): 105–113. LI Jian, DAI Chuyan, WANG Yangwei, et al. Development of pneumatic four blade soft grasp for grabbing strawberry[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(1): 105–113. (in Chinese)
- [15] 庄煜, 王海涛, 王金峰, 等. 光固化果蔬采摘气动软体抓手设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 65–73. ZHUANG Yu, WANG Haitao, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment of pneumatic soft claw for SLA fruit and vegetable picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 65–73. (in Chinese)
- [16] PARK W, SEO S, BAE J. A hybrid gripper with soft material and rigid structures[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 4(1): 65–72.
- [17] HOHIMER C J, WANG H, BHUSAL S, et al. Design and field evaluation of a robotic apple harvesting system with a 3d-printed soft-robotic end-effector[J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(2): 405–414.
- [18] SHEA H, SHINTAKE J, FLOREANO D. Soft compliant gripper for safe manipulation of extremely fragile objects[M]//Tech. rep. SPIE Newsroom, 2016.
- [19] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(4): 1–15. CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(4): 1–15. (in Chinese)
- [20] 王晓楠, 伍萍辉, 冯青春, 等. 番茄采摘机器人系统设计与试验[J]. *农机化研究*, 2016, 38(4): 94–98. WANG Xiaonan, WU Pinghui, FENG Qingchun, et al. Design and test of tomatoes harvesting robot[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(4): 94–98. (in Chinese)
- [21] BAC C W, HEMMING J, VAN TUIJL B A J, et al. Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(6): 1123–1139.
- [22] SILWAL A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(6): 1140–1159.
- [23] KAKOGAWA A, KAIZU Y, MA S. Sensor-less and control-less underactuated grippers with pull-in mechanisms for grasping various objects[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, 8: 631242.
- [24] YUAN S, EPPS A D, NOWAK J B, et al. Design of a roller-based dexterous hand for object grasping and within-hand manipulation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 8870–8876.
- [25] YUAN S, SHAO L, YAKO C L, et al. Design and control of roller grasper v2 for in-hand manipulation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020: 9151–9158.
- [26] MA R R, DOLLAR A M. In-hand manipulation primitives for a minimal underactuated gripper with active surfaces[C]//International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 50152: V05AT07A072.
- [27] 刘继展, 李智国, 李萍萍. 番茄采摘机器人快速无损作业研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [28] RUSSO M, CECCARELLI M, CORVES B, et al. Design and test of a gripper prototype for horticulture products[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 44: 266–275.