doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.012

欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验

魏　博　何金银　石　阳　蒋光利　张宪宇　马　莹
(重庆邮电大学先进制造工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为实现柑橘采摘的机械化、智能化,设计了一款欠驱动式柑橘采摘末端执行器。该执行器通过三指充分抓握与偏转的融合控制,实现对不同大小及椭圆度的柑橘的稳定采摘。针对不同尺寸柑橘采摘需求,设计了双连杆并联式手指,在抓握直径差异较大的柑橘时,手指能够自动进行抓取或捏取动作,并实现被动柔顺。通过静力学分析,得到抓取力与电机输出力矩间的关系。针对不同椭圆度柑橘采摘需求,为手指根部添加旋转关节。在建立电机驱动控制系统模型的基础上,提出基于电流反馈的主动柔顺控制策略,指根能够旋转合适的角度使指面与柑橘表面紧密贴合,在防止手指棱边刮伤柑橘表皮的同时,增大接触面积、提高摩擦力。仿真结果表明,该末端执行器结构在运动学方面满足设计要求。制作物理样机并在实验室环境下进行了柑橘抓取试验,试验结果表明采摘执行器针对直径 30~100 mm 的柑橘抓取成功率为 98.3%,平均耗时 5.3 s。该末端执行器能够针对不同尺寸、不同形状的柑橘实现采摘功能,具有适应性强、抓取稳定、不损伤果实等优点。

关键词: 采摘机器人; 柑橘; 末端执行器; 欠驱动; 柔顺控制
中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0120-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Underactuated End-effector for Citrus Picking

WEI Bo　HE Jinyin　SHI Yang　JIANG Guangli　ZHANG Xianyu　MA Ying
(*School of Advanced Manufacturing Engineering*, *Chongqing University of Posts and Telecommunications*, *Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: Aiming to achieve the development of mechanized and intelligent citrus picking, an underactuated end-effector for citrus picking robot was proposed. Through the fusion control strategy of grip and deflection, the end-effector was able to achieve the stable picking of citrus with different sizes and ovality. According to the needs of picking citrus of different sizes and the analysis of human hands movement patterns, a double-link parallel finger was designed. The double-link parallel finger included two sets of four-link mechanism, which were designed for underactuated finger to enable the end-effector to adapt to different citrus sizes. On the basis of statics analysis, the motors were determined. Besides, a rotatory joint was added to the finger root to fit closely with the citrus. This design can not only protect the orange skin from being scratched by finger edges, but also can increase the contact area and thus increase the friction. In order to ensure the finger rotating correctly, the motor drive control system model was established according to the selected motor characteristics. Laying the establishment of this system model, the servo control strategy based on current feedback was proposed. Finally, the finger movement simulation and the citrus picking experiment using the end-effector were performed. Simulation results showed that the structure can satisfy the design requirements of realizing citrus picking of different sizes and ovality in terms of kinematics. A prototype of the picking end-effector was made and citrus picking experiments were carried out in the experimental environment. The experimental results showed that when the end-effector pinked citrus with diameter ranging from 30 mm to 100 mm, the average success rate was 98.3% and the average time was 5.3 s. It had the advantages of strong adaptability, stable grip, and no damage of the fruit.

Key words: picking robots; citrus; end-effector; underactuated; compliance control

收稿日期: 2020-10-31　修回日期: 2021-02-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(61703067)和重庆市大学生创新创业训练计划项目(S201910617015)
作者简介: 魏博(1987—),女,副教授,主要从事机器人技术及智能控制研究,E-mail: weiblog@foxmail.com
通信作者: 马莹(1985—),女,副教授,主要从事机器人机构设计研究,E-mail: maying@cqupt.edu.cn

0　引言

柑橘的种植在我国非常普遍，产量很大且品种多[1]。采摘方法大部分以人工采摘方式为主[2-4]，存在效率低、劳动强度大、劳动力成本高、安全性低等缺点[5-7]，人工成本占总成本的 47.71%[8]。因此，利用采摘机器人实现柑橘采摘机械化、自动化的需求十分迫切[9-12]。而采摘末端执行器作为采摘机器人的核心装置，在避免损伤前提下，实现对不同尺寸、果形的柑橘采摘是研究的关键[13-14]。

近年来，国内外学者相继针对果蔬采摘末端执行器开展了研究。对于草莓[15]、番茄[16]、黄瓜[17-18]、猕猴桃[19-20]、苹果[21]等生长特性不同的果蔬，采摘末端执行器的设计也不同。对柑橘采摘机器人来说，能够适应不同尺寸与椭圆度的柑橘采摘需求，在施加适当抓取力的前提下，增大末端执行器与果实之间的摩擦力，在防止末端执行器棱边刮伤柑橘表皮的同时，实现稳定采摘，是采摘机器人末端执行器研究的关键技术之一。

针对柑橘无损采摘问题，大多学者采用软体材料和柔性驱动器来实现[22]。但由于气压系统固有的不稳定性，可能会出现抓取不稳定而引起果实掉落问题。柑橘在自然环境下生长，会出现大小、椭圆度差异较大的情况[23-24]。而传统的欠驱动采摘执行器一方面对尺寸较小果实无法实现稳定抓取，另一方面无法实现主动柔顺抓取，刚性手指对椭圆度较大柑橘易产生划痕。

多指手控制方面，美国 NASA 与通用公司研制的机器人宇航员用灵巧手为拇指设计了弯曲与旋转自由度，并利用钢丝绳进行欠驱动柔性控制，但长时间使用后，绳的非弹性形变会导致手指锁紧力变小[25]。DLR/HIT 仿人灵巧手利用四连杆机构推动，能够通过集成的 96 个传感器实现柔顺控制[26]。目前，国内外具有弯扭复合自由度并实现主动柔顺控制的多指手绝大部分用于仿人灵巧操作，集成多个传感器、电机与驱动器，控制复杂，成本较高[27-29]。

为了给采摘机器人提供一种结构简单、成本低廉，具有一定柔顺性，适合多种尺寸柑橘采摘的末端执行器，本文设计一款欠驱动式柑橘采摘机器人末端执行器。利用手指弯曲夹持机构实现不同尺寸的柑橘抓取，在指根处添加旋转关节，提出基于电流反馈的伺服控制策略以实现指面与柑橘表面平行贴合，最后制作样机进行试验验证。

1　末端执行器总体设计

通过分析人手对柑橘的采摘方式，可以将人手的运动方式分为两种：手指内侧与柑橘表面贴合的“抓握”、指尖与柑橘表面贴合的“捏取”。综合考虑既能完成采摘任务又需使结构简单、易于控制，决定把末端机构设计为三指结构，实现两种抓取方式。抓取过程为：当末端执行器到达指定位置时，电机启动并通过机械结构带动手指做抓取动作。当抓取力达到额定值时手指停止运动，完成抓取动作；而后底座开始带动柑橘旋转，施加力螺旋，使柑橘与树枝分离。

末端执行器由 3 根手指和 1 个底座组成，主体结构如图 1 所示。整个执行器通过 4 个电机进行驱动，分别控制 3 根手指的张开与闭合以及执行器底座的轴向旋转进而摘取柑橘。为了减轻整体质量，末端执行器的手指、内壳等全部采用新型材料 3D 打印，手指内部贴有软硅橡胶，不仅可以增大与柑橘表面的摩擦力，还可以对柑橘表面起到一定的保护作用。

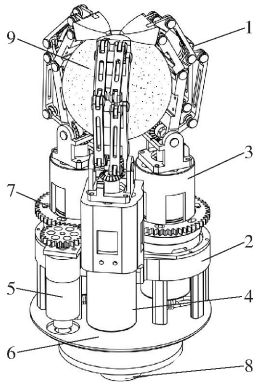


图 1　欠驱动式柑橘采摘机器人末端执行器结构图

Fig. 1　Structure drawing of end-effector of underactuated citrus picking robot

1. 手指组件　2. 执行器支架　3. 指根旋转机构　4. 抓握驱动电机　5. 指根旋转驱动电机　6. 执行器底板　7. 指根旋转齿轮　8. 手腕旋转机构　9. 柑橘

柑橘采摘机器人末端执行器结构主要由手指组件、手指弯曲机构、指根旋转机构、手腕旋转机构组成。其中手指组件是由连杆机构和指尖、指中、指底组成。抓握驱动电机的输出转矩及转速通过一对锥齿轮传递到连杆机构上，从而驱动手指弯曲并抓取果实。旋转齿轮用螺钉固定在指根旋转单元上，通过指根旋转电机驱动旋转齿轮使手指旋转至合适角度，并能完美贴合抓取果实。

2　双连杆并联式手指设计

欠驱动机构驱动器数目小于自由度数目的特性，降低了控制系统的复杂程度，并且在抓取物体时具有很好的形状自适应性。所以对单个欠驱动手指的设计，有必要在充分理解、分析人手功能特征的基础上，依据欠驱动手指的工作原理，结合所需实现的

果实采摘功能和结构紧凑的特点,设计了一种双连杆并联式欠驱动末端执行器。

2.1 手指弯曲夹持机构设计

为实现对不同尺寸的柑橘抓取,每根手指设计有 2 套四连杆机构,如图 2 所示。其中驱动连杆由电机通过锥齿轮传动驱动其运动;从动连杆机构与扭簧和机械限位配合共同作用,以维持抓取直径较小柑橘时指尖末端的指面角度不变。整个手指采用子母铆钉连接杆件和关节,整个手指一共包含 11 对子母铆钉。弯曲机构及指根旋转机构位于指根处。包络机构和扭曲机构分别在手指的内部两侧。

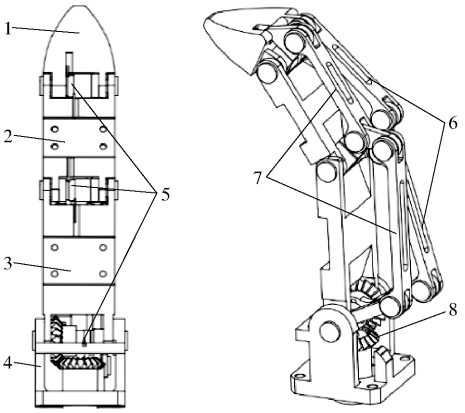


图 2 手指结构图

Fig. 2 Finger structure diagram

1. 第 1 指节 2. 第 2 指节 3. 第 3 指节 4. 手指支架 5. 扭簧 6. 驱动连杆机构 7. 从动连杆机构 8. 锥齿轮组

在实际采摘过程中,为实现对不同尺寸柑橘的抓取,需要驱动杆和从动杆相互配合完成。当抓取直径较大柑橘时,手指的第 3 指节首先接触到柑橘表面并收到反作用力,从而第 3 指节运动受到限制,而后手指的第 2 指节在驱动连杆机构的作用下靠近柑橘,最终 3 个指节依次都与柑橘表面相接触,完成包络抓取。包络抓取过程如图 3 所示。

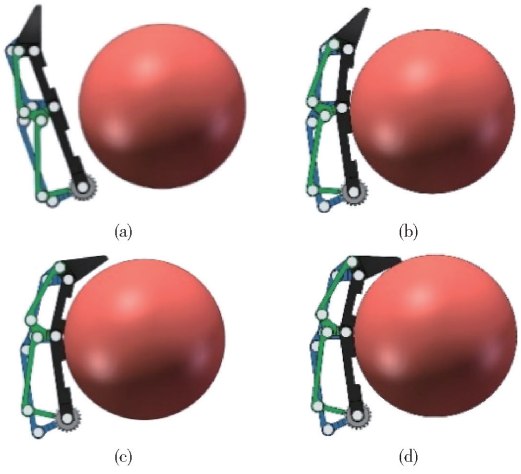


图 3 手指模型对直径 100 mm 物体的抓取

Fig. 3 Grasping object with diameter of 100 mm by finger model

由图 3 可知,欠驱动手指抓取直径为 100 mm 的球体,用以模拟最大尺寸柑橘,其中球体底部与欠驱动手指的第 1 关节处于同一水平面。如图 3a 所示,手指处于初始位置,被抓取球体体积较大,距离手指较近,手指开始运动靠近球体;如图 3b 所示,手指的第 1 指节接触到球体并停止运动,第 2 关节克服扭簧的约束向球体转动,而第 2 指节和第 3 指节此时受扭簧限制视为刚性连接一同向球体靠近;如图 3c 所示,手指的第 2 指节接触到球体并停止运动,第 3 关节则克服扭簧的约束向球体转动;如图 3d 所示,手指的第 3 指节接触到球体并停止运动,完成了对球体的抓取。

当抓取直径较小柑橘时,如果第 3 指节与第 2 指节都没有与柑橘表面相接触,没有受到柑橘的反作用力的作用,此时第 1 指节就会因从动连杆机构与弹簧和机械限位的共同作用而垂直于安装轴线的平面,最终实现利用第 1 指节完成最较小尺寸柑橘的抓取。

图 4 为欠驱动手指捏取直径为 30 mm 的球体,用以模拟最小尺寸柑橘。对于欠驱动手指的捏取来讲,只有在欠驱动手指运动的时候手指的第 3 指节与被捏取物体接触并产生一个接触点,而被捏取的物体需要在欠驱动手指的捏取空间范围内。如图 4a 所示,欠驱动手指处于初始位置,被捏取的物体相对手指较远,手指开始运动靠近;如图 4b 所示,手指做持续空载运动并经过垂直面,其中第 3 指节做平行运动;如图 4c 所示,手指的第 3 指节接触物体并停止运动,完成了对目标的捏取。

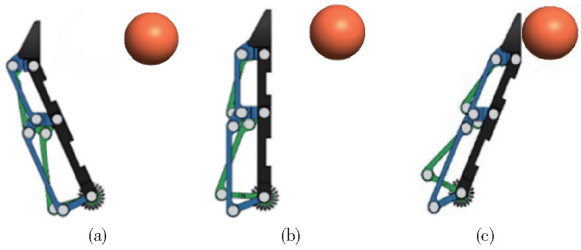


图 4 手指模型对直径 30 mm 物体的捏取

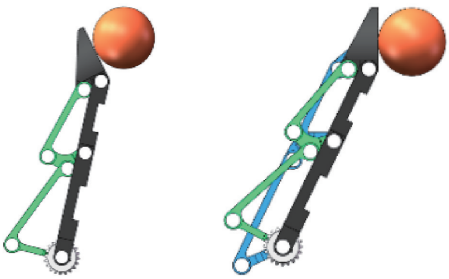
Fig. 4 Pinching object with diameter of 30 mm by finger model

若没有从动四连杆机构,手指在完成捏取动作时将出现指尖向外扩张问题,如图 5 所示。

2.2 手指弯曲静力学分析

图 6a 为抓取时手指的静力学模型,抓取物体时手指关节依次与物体相接触并受到约束力,进而整个手指的构型被确定。通过对手指的静力学分析可得输入力矩和施加到柑橘表面压力之间的关系。

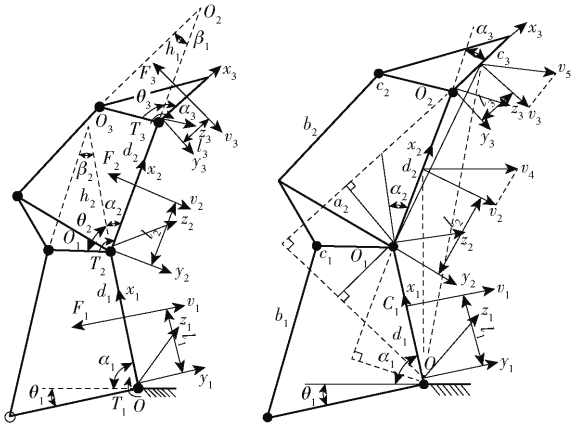
虚功原理[30]提供了各类力学系统静力学问题



(a) 无从动连杆机构　　(b) 有从动连杆机构

图 5　捏取动作对比

Fig. 5　Pinching action comparison



(a) 包络抓取静力学　　(b) 接触点速度求解

图 6　手指静力学分析

Fig. 6　Finger statics analysis

的统一观点和方法。由虚功原理得

$$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{T}=[\,T_1 \quad T_2 \quad T_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\omega}=[\,\dot{\theta}_1 \quad \dot{\alpha}_2 \quad \dot{\alpha}_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}=[\,F_1 \quad F_2 \quad F_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{V}=[\,v_1 \quad v_2 \quad v_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{T}$——手指输入力矩矢量

$\boldsymbol{\omega}$——相应的角速度矢量

$\boldsymbol{F}$——作用在手指上的外力矢量，力的方向与各指节垂直

$\boldsymbol{V}$——外力作用点在外力作用方向上的虚拟速度矢量

其中，关节的接触点速度可以写成速度雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_v$ 与关节角速度积的形式，即

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{J}_v\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{6}$$

其中

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=[\,\dot{\alpha}_1 \quad \dot{\alpha}_2 \quad \dot{\alpha}_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

根据刚体平面运动相关知识，由图 6b 及式(7)可得

$$\boldsymbol{J}_v=\begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 \\ l_2+d_1\cos\alpha_2 & l_2 & 0 \\ l_3+d_1\cos(\alpha_2+\alpha_3)+d_2\cos\alpha_3 & l_3+d_2\cos\alpha_3 & l_3 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中　l_1、l_2、l_3——各接触点 c_i 到各关节处的距离

d_1、d_2、d_3——各指节长度

α_2——d_1 与 d_2 指节间夹角

α_3——d_2 与 d_3 指节间夹角

所以得到

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 \\ l_2+d_1\cos\alpha_2 & l_2 & 0 \\ l_3+d_1\cos(\alpha_2+\alpha_3)+d_2\cos\alpha_3 & l_3+d_2\cos\alpha_3 & l_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} \tag{9}$$

为了得出 $\boldsymbol{\omega}$ 和 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 的关系，只需得知 $\dot{\alpha}_1$ 与 $\dot{\theta}_1$ 关系即可。在图 6b 中三关节均与物体接触并受到约束，由三心定理可以得出杆 a_1、c_1 的速度瞬心 O_3 与杆 a_2、c_2 的速度瞬心 O_4，d_1 与 b_1 的夹角为 α，d_2 与 b_2 夹角为 β。进而由角速度关系可得

$$\dot{\alpha}_1=\dot{\theta}_1-\dot{\alpha}_2\frac{h_1}{h_1+d_1}-\dot{\alpha}_3\frac{h_1h_2}{(h_1+d_1)(h_2+d_2)} \tag{10}$$

式中　h_1——O_1O_3 距离　　h_2——O_2O_4 距离

从而

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=\begin{bmatrix} 1 & -\dfrac{h_1}{h_1+d_1} & -\dfrac{h_1h_2}{(h_1+d_1)(h_2+d_2)} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\boldsymbol{\omega} \tag{11}$$

最后由虚功原理可得输出与输入扭矩关系为

$$\boldsymbol{F}=\frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{J}_v^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_\omega^{\mathrm{T}}} \tag{12}$$

根据结构可以得出

$$T_{a_1}=\boldsymbol{F}c \tag{13}$$

根据电机转矩与推力的关系可得

$$F_1=\frac{2\pi T}{H} \tag{14}$$

式中　H——电机导程

$$F=\frac{F_1}{c} \tag{15}$$

进而得到

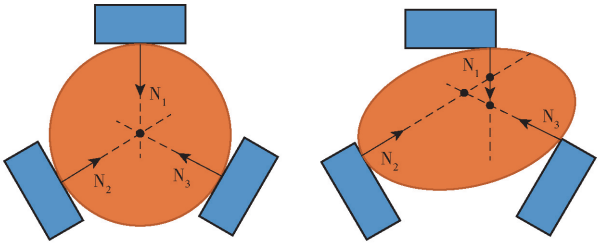
$$T_1=\frac{2\pi Td}{L\cos\theta} \tag{16}$$

式中　θ——齿轮轴线与驱动杆之间的夹角

3　基于电流反馈的指根旋转控制

柑橘果实是一个接近于椭圆形的物体。当截面椭圆度较低时，形状接近球形。3 个对称分布的手指可在圆周上均匀对称分布且指尖朝向汇交于手掌中心时，柑橘所受压力三力汇交于一点(图 7a)，合力为零。此种布局情况下，柑橘在平面上的平动即

可形成形封闭[30]。但当目标柑橘截面椭圆度较高时,若 3 根手指指尖朝向仍汇交于手掌中心(图 7b),柑橘所受压力无法汇交于一点,合力不为零,不能形成力封闭,抓取不稳定[31]。而且此种情况亦会出现手指侧面棱线与柑橘表面相交,产生划痕,甚至损伤柑橘的情况。此外,调整指尖方向,可以增大摩擦锥[32],即增大最大静摩擦力,加强对目标的约束。



(a) 抓取圆形截面 (b) 抓取椭圆截面

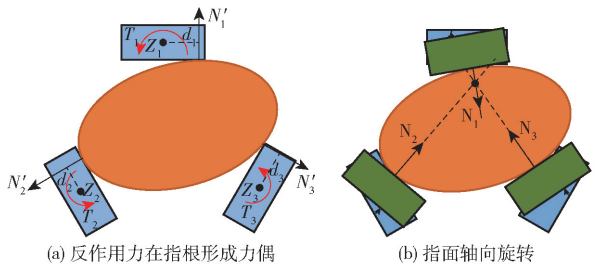
图 7 手指指根不旋转情况下的抓取情况

Fig. 7 Schematics of grasping without finger root rotation

因此,为实现对不同椭圆度柑橘的抓取,每根手指指根处设计了轴向旋转关节,增加手指自由度,使手指可以轴向转动。本关节驱动电机选取通过电流反馈调节输出力矩的控制策略。

3.1 手指扭转力学分析

当手指进行弯曲夹持动作时,手指指面施加于柑橘表面压力 $N_i(i=1,2,3)$,根据牛顿定律,柑橘表面施加于手指指面以反作用力 N_i'。若抓取柑橘果实截面为椭圆形,反作用力不通过指面截面纵向轴 Z_i,则形成对指面的轴向扭矩 T_i,如图 8a 所示。因此,在指根加入旋转自由度,抓取时根据截面形状调整指面朝向,使三指指尖朝向汇交于一点,形成稳定抓取,实现在不损伤果皮表面的前提下的稳定采摘,如图 8b 所示。



(a) 反作用力在指根形成力偶 (b) 指面轴向旋转

图 8 指根旋转情况下抓取椭圆截面示意图

Fig. 8 Schematics of grasping elliptical shaped cross-section with finger root rotation

因此,可以看出,当扭矩 $T_i=0$ 时,指面角度旋转与柑橘椭圆截面切线垂直。因此,本研究采用控制电枢电流的方式,旋转指面轴向角度,最终实现指面与柑橘截面切线方向基本垂直。

3.2 驱动电机模型

根据直流电动机传动系统,其电磁转矩、负载转矩与转速的运动方程为

$$T_e = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + T_i \tag{17}$$

其中 $\omega = 2\pi n$

$$T_e = \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} n_p F_r F_s \sin\psi_{sr} \tag{18}$$

式中 J——传动系统总转动惯量

ω——电动机角速度

n——转速

T_e——直流电动机的电磁转矩

T_i——机械的阻转矩

n_p——电机的磁极数

F_r——转子绕组产生的磁动势

F_s——定子绕组产生的磁动势

μ_0——真空磁导率

D——气隙圆周平均直径

l——气隙沿轴向长度

g——定子与转子间的宽度

ψ_{sr}——两个矢量 $\boldsymbol{F}_r$ 与 $\boldsymbol{F}_s$ 之间的夹角

每个磁极下的气隙面积 s_p 为

$$s_p = \frac{\pi D l}{2n_p} \tag{19}$$

平均磁通量密度 B_{av} 为

$$B_{av} = 2\mu_0 F_{sr}/(\pi g) \tag{20}$$

式中 F_{sr}——合成磁动势

由此 $$\Phi_{sr} = B_{av} s_p = \mu_0 D l F_{sr}/(n_p g) \tag{21}$$

式中 Φ_{sr}——每极合成磁通

代入式(18)得

$$T_e = \frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi_{sr} F_r \sin\psi_r \tag{22}$$

式中 ψ_r——F_{sr} 与 F_r 之间夹角

直流电机的结构是一种定子绕组凸极的电机,假设满足以下条件:①忽略各种饱和非线性。②电刷的位置在几何中心线上,所以 $\psi_r = 90°$。③忽略磁动势的空间谐波且电枢绕组均匀分布,节距相等,忽略槽宽。

利用毕奥-萨伐尔电磁力定理,考虑电枢反应的去磁效应,则转矩随电枢电流的转矩特性 T_e 计算式为

$$T_e = C_m I_d \tag{23}$$

其中 $$C_m = \frac{n_p Z}{2\pi a}\Phi$$

式中 C_m——额定磁通下的转矩转速比

Z——电机总有效导体数

a——支路数 I_d——电枢电流

Φ——直流电动机的每极每相下的磁通

在电枢电压、励磁电压为额定值时,有

$$E_a = C_e n \tag{24}$$

$$U_d = E_a + I_d R_a + L\frac{\mathrm{d}I_d}{\mathrm{d}t} \tag{25}$$

$$C_m = \frac{30}{\pi} C_e \tag{26}$$

式中　C_e——额定磁通下的电动势转速比

U_d——电动机两端电压

R_a——包括电枢绕组和电刷电压降等效电阻

L——电机电感

联立式(17)、(23) ~ (26)拉普拉斯变换，可得电机驱动时电流方程为

$$I_d(s) = \frac{1}{JLs^2 + JRs + C_e C_m}(JsU_a(s) + C_e T_i(s)) \tag{27}$$

当指面与椭圆面切线垂直时，阻转矩 $T_i = 0$，有

$$I_d(s) = \frac{JsU_a(s)}{JLs^2 + JRs + C_e C_m} \tag{28}$$

3.3　主动柔顺伺服控制策略

电机伺服控制系统框图如图 9 所示。与手指弯曲驱动控制不同的是，指根轴向旋转的目的是通过电流反馈旋转直面角度，从而达到消除扭转力矩，最终达到指面与椭圆截面垂直的目的。

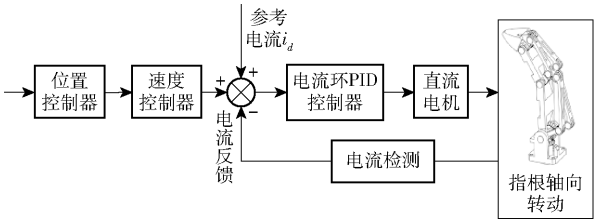


图 9　指根伺服控制策略

Fig. 9　Servo control strategy for finger root

当指面与截面不垂直时，在指根处会产生轴向阻转矩 T_i。通过式(27)、(28)可得该扭矩产生的电流为

$$\Delta I(s) = I_a(s) - I_d(s) = \frac{C_e T_i(s)}{JLs^2 + JRs + C_e C_m} \tag{29}$$

该电流差 ΔI 向电流环 PID 控制器反馈，得出 PWM 脉宽调制信号 $u(t)$，实现对指根旋转关节电机的转动调节。其中，PID 控制对象的 ΔI 与 $u(t)$ 两者之间关系为

$$u(t) = K_p\left(\Delta i + \frac{t}{T_i}\int_0^1 \Delta i\mathrm{d}t + T_d\frac{\mathrm{d}\Delta i}{\mathrm{d}t}\right) \tag{30}$$

在指根旋转关节中，为更快速准确地利用单片机实现指根旋转的控制，将采集信号数字化，进行 PID 控制，即为

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \tag{31}$$

式中　$\Delta u(k)$——第 k 个采样时刻与第 $k-1$ 个采样时刻脉宽调制信号的偏差

3.4　指根旋转机构设计

指根旋转关节如图 10 所示，首先电机输出转矩，带动装配在指根的旋转机构绕转动，而后指根旋转机构带动齿轮绕轴向旋转，从而改变手指方向至合适角度，最终贴合果实表面。

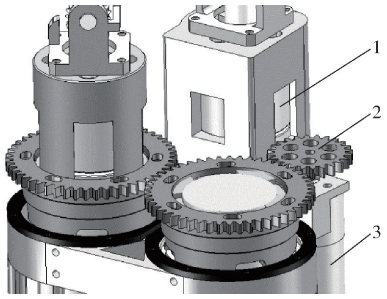


图 10　指根旋转部位结构图

Fig. 10　Structure diagram of finger rotation set

1. 指根旋转机构　2. 齿轮　3. 电机

4　系统构成与流程

4.1　硬件系统组成

该采摘执行器每根手指由运动机构、电机驱动系统及整体控制器组成，整体系统组成框图如图 11 所示。

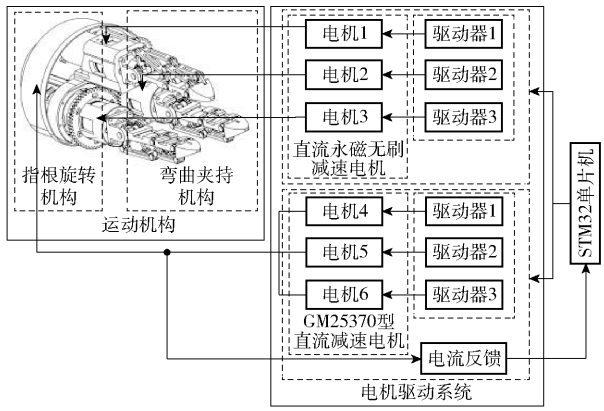


图 11　系统组成框图

Fig. 11　System structure block diagram

手指运动机构可同时进行弯曲及根部旋转运动，包含弯曲夹持机构及指根旋转机构；电机驱动系统分为弯曲驱动系统及旋转驱动系统；整体控制器负责发出抓取信号及根据指根电机电流反馈实现主动柔顺控制。

4.2　系统流程

该末端执行器系统的抓取流程包含手指弯曲和指根旋转两部分，如图 12 所示。该执行器手指同时具有手指弯曲和指根旋转两个功能。其中手指弯曲基于欠驱动机构的被动柔顺控制，具有很好的形状自适应性，在抓取尺寸较大柑橘果实时，各关节指面能够依次贴合；在抓取尺寸较小柑橘果实时，能够完成指尖的平行捏取。而手指指根旋转则是基于电流

反馈的主动柔顺控制,当抓取不同椭圆度柑橘时,根据电机电流反馈驱动关节旋转,直至轴向旋转力偶消除,指面垂直于截面切线。

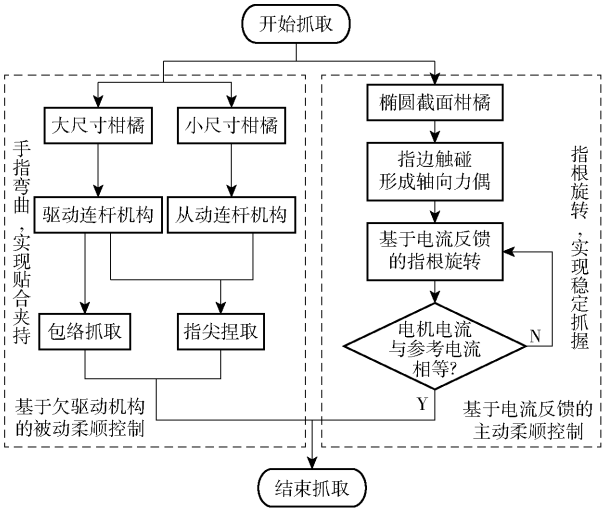


图 12 系统流程图

Fig. 12 System flow chart

5 试验

末端执行器采摘过程中柑橘与本体脱离的方法一般有两种:力脱离[33],通过拽拉、扭拧弯折等外力脱离;切割脱离[34]。付舜[35]对柑橘果柄切割力试验测定结果表明,不同粗细果柄切割时最大切割阻力差异较大,且最大切割力高达 136.94 N,故采用切割柑橘果柄方式采摘柑橘较困难。相对而言,力脱离方式结构简单易操作,且符合柑橘果柄脱离特点,因此本机构设计为拉扭采摘方式。因此,提出采摘柑橘时以适当的力抓持住柑橘并且对柑橘施加一定的拉力,通过末端执行器的旋转将柑橘果柄扭断实现柑橘的采摘,提高柑橘采摘效率,简化末端执行器复杂程度,降低生产成本。

首先通过手持设备控制 3 根手指旋转一定角度以适应不同大小形状的柑橘;确定好位置后,开始执行采摘步骤,由单片机控制的电机驱动手指夹持果实并抓牢,最后由手腕处的电机带动整个手掌连同果实一起转动,将果实旋拧下来,完成采摘。为验证本文所设计的柑橘采摘末端执行器对柑橘形状自适应能力和其最终的抓取效果,对不同形状和大小的柑橘进行了抓取试验。图 13 为执行器对尺寸较大柑橘的握取过程。可出看出,采摘过程可大致分为 4 步:末端执行器初始化、柑橘进入握取范围、进行握取和握取完成。针对尺寸较大柑橘,欠驱动手指各关节自动贴合柑橘表面,完成包络握取。

图 14 为末端执行器对较小尺寸柑橘的捏取

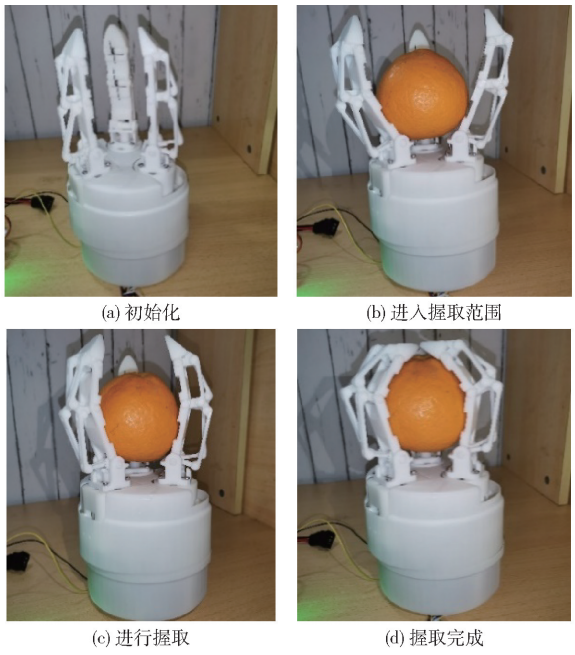


图 13 握取大尺寸柑橘

Fig. 13 Grasping citrus of large size

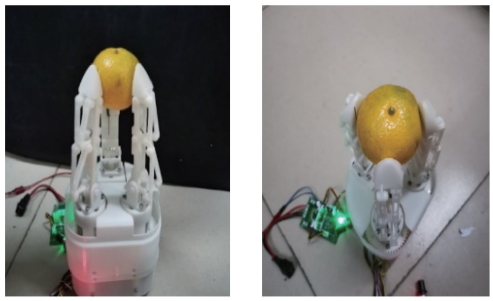


图 14 捏取小尺寸柑橘

Fig. 14 Pinching citrus of small size

结果。可看出,当柑橘直径较小且距离手掌较远时,第 1 指节、第 2 指节做空载运动,第 3 指节做平行运动,最终仅有第 3 指节与柑橘接触,完成捏取。

图 15 为末端执行器对椭圆形截面柑橘的抓取结果。可以看到,末端执行器的指根关节发生旋转,最终指面与柑橘表面平行贴合。

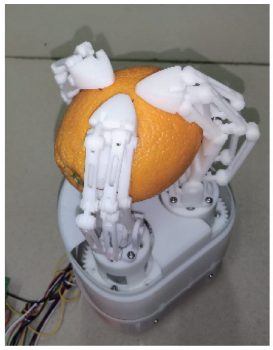


图 15 抓取椭圆形柑橘

Fig. 15 Elliptical shaped citrus picking

为验证本文所设计的柑橘采摘末端执行器对柑

橘形状自适应能力和最终的抓取效果，分 3 批购买不同产地、不同品种、不同成熟度的柑橘，进行抓取试验。计算得到所抓取果实的损坏率。抓取试验结果见表 1。

表 1　抓取试验结果

Tab. 1　Experimental data of picking

编号	采摘个数	损坏个数	抓取平均时间/s	损坏率/%
1	100	2	6.1	2.0
2	132	3	5.5	2.3
3	112	1	4.5	0.8
平均值	115	2	5.3	1.7

通过 3 组采摘数据发现，针对柑橘果实的抓取成功率为 98.3%。对损坏果实进行检测发现，导致果实损坏的原因有果实已经轻微腐坏或即将腐坏。总的试验数据来看，设计的末端执行器能够实现柑橘采摘功能。在抓取试验中抓取平均时间最快为 4.5 s，抓取时间最长为 6.1 s，单果平均抓取时间为 5.3 s。

6　结论

（1）设计了一种欠驱动式柑橘机器人用末端执行器。该末端执行器由 3 个手指组成，每个手指均能实现抓握与偏转的融合控制。能够实现对不同大小及椭圆度的柑橘的稳定采摘。

（2）设计了手指弯曲夹持机构以实现不同大小柑橘采摘时的被动柔顺，基于静力学分析得出抓取力与电机输出扭矩间的关系。

（3）为手指根部添加旋转关节，提出了基于电流反馈的指根旋转控制以实现不同椭圆度柑橘采摘需求。

（4）针对不同大小与椭圆度的柑橘进行了仿真与采摘试验，结果表明所设计的采摘末端执行器可以灵活稳定地抓取直径为 30 ~ 100 mm 的柑橘，抓取成功率为 98.3%，平均耗时 5.3 s。

参　考　文　献

[1] 农业部信息中心. 2009 年世界主要国家豆类、蔬菜、水果产量[J]. 世界农业，2012，33(1)：103 - 104.
Ministry of Agriculture Information Center. Output of beans，vegetables and fruits in the world in 2009[J]. World Agriculture，2012，33(1)：103 - 104. (in Chinese)

[2] 李秦川，胡挺，武传宇，等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报，2008，39(3)：175 - 179.
LI Qinchuan，HU Ting，WU Chuanyu，et al. Review of end- effector in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2008，39(3)：175 - 179. (in Chinese)

[3] 高焕文. 农业机械化生产学[M]. 北京：中国农业出版社，2002.

[4] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京：中国农业出版社，2003.

[5] 李会宾，史云. 果园采摘机器人研究综述[J]. 中国农业信息，2019，31(6)：1 - 9.
LI Huibin，SHI Yun. Review on orchard harvesting robots[J]. China Agricultural Informatics，2019，31(6)：1 - 9. (in Chinese)

[6] 段洁利，陆华忠，王慰祖，等. 水果采收机械的现状与发展[J]. 广东农业科学，2012，39(16)：189 - 192.
DUAN Jieli，LU Huazhong，WANG Weizu，et al. Present situation and development of the fruit harvesting machinery[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2012，39(16)：189 - 192. (in Chinese)

[7] 袁志英，陈进. 果蔬采摘机器人的发展现状、问题及对策分析[J]. 四川农业与农机，2014，37(6)：16 - 18.
YUAN Zhiying，CHEN Jin. Development，problem and countermeasure analysis offruit and vegetable picking robots[J]. Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery，2014，37(6)：16 - 18. (in Chinese)

[8] 国家发展和改革委员会. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京：中国统计出版社，2019.

[9] 陈昕，华超，朱银龙，等. 水果采摘机器人末端执行器的研究进展[J]. 林业机械与木工设备，2020，48(9)：4 - 10.
CHEN Xin，HUA Chao，ZHU Yinlong，et al. Research progress in fruit picking robot end effectors[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment，2020，48(9)：4 - 10. (in Chinese)

[10] 姜丽萍，陈树人. 果实采摘机器人的研究综述[J]. 农业装备技术，2006，32(1)：8 - 10.
JIANG Liping，CHEN Shuren. The overview of fruit harvesting robot[J]. Agricultural Equipment & Technology，2006，32(1)：8 - 10. (in Chinese)

[11] 刘凡，杨光友，杨康. 农业采摘机器人柔性机械手研究[J]. 中国农机化学报，2019，40(3)：173 - 178.
LIU Fan，YANG Guangyou，YANG Kang. Research on flexible manipulator for agricultural picking robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(3)：173 - 178. (in Chinese)

[12] 卢伟，宋爱国，蔡健荣，等. 柑橘采摘机器人结构设计及运动学算法[J]. 东南大学学报，2011，41(1)：95 - 100.
LU Wei，SONG Aiguo，CAI Jianrong，et al. Structural design and kinematics algorithm research for orange harvesting robot[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2011，41(1)：95 - 100. (in Chinese)

[13] 伍德林，傅立强，曹成茂，等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(11)：176 - 182，195.
WU Delin，FU Liqiang，CAO Chengmao，et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for camellia fruit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：176 - 182，195. http：//www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201119&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.019. (in Chinese)

[14] 王克奇，张维昊，罗泽，等. 击打式松果采摘机器人设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(8)：26 - 33.
WANG Keqi，ZHANG Weihao，LUO Ze，et al. Design and experiment of hitting pine cone picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(8)：26 - 33. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200803&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.003. (in

Chinese)
[15] SHIGEHIKO H, KENTA S, SATOSHI Y, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2):160 - 171.
[16] 刘继展, 李萍萍, 李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):66 - 70.
LIU Jizhan,LI Pingping,LI Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CASE,2008,24(12):66 - 70. (in Chinese)
[17] 钱少明, 杨庆华, 王志恒,等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010,26(7):107 - 112.
QIAN Shaoming, YANG Qinghua, WANG Zhiheng, et al. Research on holding characteristics of cucumber and end-effector of cucumber picking[J]. Transactions of the CASE, 2010, 26(7): 107 - 112. (in Chinese)
[18] 赵云伟,耿德旭,刘晓敏,等. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):31 - 42.
ZHAO Yunwei,GENG Dexu,LIU Xiaomin, et al. Kinematics analysis and experiment on pneumatic flexible fruit and vegetable picking manipulator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):31 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190804&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.004. (in Chinese)
[19] SCARFE A J, FLEMMER R C, BAKKER H H C, et al. Development of an autonomous kiwifruit picking robot[C]// International Conference on Autonomous Robots & Agents. IEEE, 2009.
[20] 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):1 - 8.
FU Longsheng,ZHANG Fanian,GEJIMA Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150301&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.001. (in Chinese)
[21] 李建伟, 陈艳艳. 苹果采摘机器人末端执行器的原理及试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(9):139 - 142.
LI Jianwei,CHEN Yanyan. Structural principle and experimental research on theend effector of apple picking robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9):139 - 142. (in Chinese)
[22] ARMADA M A, MUSCATO G, PRESTIFILIPPO M, et al. A prototype of an orange picking robot: past history, the new robot and experimental results[J]. Industrial Robot an International Journal, 2005, 32(2):128 - 138.
[23] 陈燕, 谈建豪, 蒋志林,等. 柑橘机器人夹持损伤有限元预测及试验验证[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5):98 - 102.
CHEN Yan,TAN Jianhao,JIANG Zhilin, et al. Finite element prediction and experimental verification for damage on citrus fruit from robot clamping[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(5):98 - 102. (in Chinese)
[24] 徐丽明,刘旭东,张凯良,等. 脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12):53 - 61.
XU Liming, LIU Xudong, ZHANG Kailiang, et al. Design and test of end-effector for navel orange picking robot[J]. Transactions of the CASE,2018,34(12):53 - 61. (in Chinese)
[25] BRIDGWATER L B, IHRKE C A, DIFTLER M A, et al. The Robonaut 2 hand-designed to do work with tools[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN, 2012: 3425 - 3430.
[26] 刘伊威,金明河,樊绍巍,等. 五指仿人机器人灵巧手 DLR/HIT Hand Ⅱ[J]. 机械工程学报,2009,45(11):10 - 17.
LIU Yiwei,JIN Minghe,FAN Shaowei, et al. Five-finger dexterous robot hand DLR/HIT Hand Ⅱ[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(11):10 - 17. (in Chinese)
[27] LIN Y, SUN Y. Grasp planning based on strategy structed from demonstration[C]// Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2014.
[28] 张文增, 陈强, 孙振国. 拟人机器人手的设计与实现[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5):123 - 126.
ZHANG Wenzeng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo. Design and realization of humanoid robot hand[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005, 41(5):123 - 126. (in Chinese)
[29] 李涛,骆敏舟,张志华,等. 基于欠驱动机构的仿人机器人手爪设计[J]. 机电一体化,2010,16(1):29 - 33.
LI Tao, LUO Minzhou, ZHANG Zhihua, et al. Design of a humanoid robot hand based on underactuated mechanism[J]. Mechatronics,2010,16(1):29 - 33. (in Chinese)
[30] 熊有伦. 点接触约束理论与机器人抓取的定性分析[J]. 中国科学, 1994,24(8):874 - 883.
XIONG Youlun. Point contact constraint theory and qualitative analysis of robot grasping[J]. Science in China, SER. A, 1994,24(8):874 - 883. (in Chinese)
[31] 秦志强,赵锡芳,李泽湘. 机器人多指抓取的力封闭判别[J]. 上海交通大学学报, 1999,33(7):858 - 861.
QIN Zhiqiang,ZHAO Xifang,LI Zexiang. On the force closure of robotic multifingered grasp[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999,33(7):858 - 861. (in Chinese)
[32] KRUGER H,FRANK V D S A. Independent contact regions for local force closure grasps[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation,2013,9(1): 1588 - 1594.
[33] 李国利, 姬长英, 翟力欣. 果蔬采摘机器人末端执行器研究进展与分析[J]. 中国农机化学报, 2014,35(5):231 - 236,240.
LI Guoli,JI Changying,ZHAI Lixin. Research progress and analysis of end-effector for fruits and vegetables picking robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2014,35(5):231 - 236,240. (in Chinese)
[34] 张水波, 鲍官军, 杨庆华,等. 基于机器人采摘的柑橘机械特性研究[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 39(3):340 - 344.
ZHANG Shuibo,BAO Guanjun,YANG Qinghua,et al. Study on mechanical properties of citrus based on robotic harvesting [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2012,39(3):340 - 344. (in Chinese)
[35] 付舜. 柑橘采摘机器人末端执行器设计与研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2017.
FU Shun. Design and research on end-effector of citrus harvesting robot[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017. (in Chinese)