

DOI: 10.3901/JME.2014.19.001

果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制*

金 波 林龙贤

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310007)

摘要: 为了实现果蔬的无损采摘, 采用欠驱动原理设计出一种结构更简单、通用性更强的末端执行器。欠驱动机构是指驱动器数目少于机构本身自由度数目的机构, 基于欠驱动原理设计的机械手结构简单可靠, 抓取物体时具有形状自适应能力, 手指可完全包围物体, 可以通过最大接触力的闭环力反馈控制来实现无损采摘。基于这一设计思想设计出仅靠一个电动机驱动三个手指的机械手爪, 通过理论分析、手爪机构设计与建模、结构参数优化, 确定设计尺寸制出机械手爪, 设计控制电路结合力反馈控制进行抓取试验。试验结果表明该手爪能实现期望的抓取与最大接触力控制功能, 并具有控制简单可靠、抓取稳定、不损伤果实等特点。

关键字: 果蔬采摘; 机械手爪; 欠驱动; 抓取试验; 最大接触力控制

中图分类号: TP 241

Design and Force Control of an Underactuated Robotic Hand for Fruit and Vegetable Picking

JIN Bo LIN Longxian

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310007)

Abstract: To achieve non-destructive fruit and vegetable picking, an end-actuator with a simpler and more versatile structure is designed based on underactuated principle. The underactuated mechanism refers to machine that has fewer drivers compared with the number of degrees of freedom. The robotic hand designed by adopting the underactuated principle is simpler and more reliable. Due to simple structure and better adaptability to shape of objects, the robotic hand can fold the object completely with its fingers. Non-destructive harvesting is achieved by using a closed-loop force-feedback control algorithm which controls the maximum contact forces. Based on this design idea, a three-finger gripper which is driven by only one motor is designed. Through theoretical analysis, mechanism design and modeling, and structural optimization, the final model size is determined and physical production is completed. A control circuit combined with force-feedback control is designed for grasping experiments. The experimental results show that the robotic hand can achieve the desired grasping function, maximum contact force control and has such features as simple and reliable control, stable grasping and non-damaging.

Key words: fruit and vegetable picking; robotic hand; underactuated; grasping experiments; maximum contact force control

0 前言

21 世纪农业机械化已经向智能化方向发展。果蔬采摘是果蔬生产链中最耗时费力的环节, 采摘自动化能提高劳动生产率, 确保适时采收果蔬。采摘机器人作为农业机器人的重要类型, 具有极大的发展潜力。

末端执行器是采摘机器人实现果蔬采摘的关键执行部分, 由于其作业对象具有柔韧、不规则和复杂多变等特征, 因此对于末端执行器具有更高的智能化和特殊性的要求^[1]。日本早在 20 世纪 90 年代已经对水果采摘的末端执行器开始研究, KONDO 等^[2]基于番茄的物理特性设计了一种带有软衬垫吸引器的双手指末端执行器; MONTA 等^[3]为了适应新的番茄生产体系, 开发了一种末端执行件。HAYASHI 等^[4]设计了一种复杂的草莓采摘末端执行器并进行了田间试验; RYU 等^[5]设计了一种

* 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51221004)。
20131027 收到初稿, 20140701 收到修改稿

两指气动夹持器。在国内江苏大学的 ZHAO 等^[6]设计一种用于采摘苹果的二指夹持机器人；中国农业大学刘长林等^[7]设计了一种茄子采摘的末端执行器。

理想的末端执行器应该具备以下特点：① 适用于多种果蔬，通用性强；② 构造简单，易于操控；③ 实现果蔬的无损采摘。本文对末端执行器进行创新设计，采用了欠驱动原理设计出一种结构更为简单、通用性更强的末端执行器。该果蔬采摘欠驱动机械手爪能实现期望的抓取功能，易于控制，并能实现无损采摘。

国外早已开展欠驱动机械手爪的研究，研究欠驱动多指手处于领先水平的加拿大 Laval 大学 GOSSELIN 研究组开发了 10 自由度欠驱动三指手^[8]；BEGOC 等^[9]研制了气动驱动的欠驱动手；JOHAN 等^[10]研制了 KTH 三指欠驱动手。MATHIEU 等^[11]研制了腱驱动的欠驱动手；HANGYUN 等^[12]研制了滑轮绳索结构的欠驱动手。

1 欠驱动手爪机械设计

1.1 欠驱动原理及特点

全驱动方式是指机构在正常工作条件下 n 自由度机器人就需要 n 个驱动器，即机构自由度与驱动器数目相同。欠驱动方式是指在机构驱动器数目少于机构本身自由度数目时，仍然可以依靠机构自身的动力约束条件来正常工作^[13]。

多指手的手指通常有很多关节，在全驱动方式下，手指上每个关节都必须加装驱动器；而在欠驱动方式下，通过较少的驱动器驱动，依靠弹簧和机械限位机构正常工作。以一个两关节欠驱动手指为例，其工作原理如图 1 所示^[14]。虽然该手指机构具有 2 个自由度，开始工作时只有第一个关节具有工作自由度，第二个关节转动自由度被约束，整个手指绕基座转动，直到第一个关节接触物体，受到接触封闭力的约束作用，该自由度被约束，而第二个关节的转动自由度则在不断增大的驱动力作用下被释放，变成工作自由度，机构自由度仍为 1，手指能按确定的运动规律工作，直到第二个关节也接触到物体，完成抓取过程。

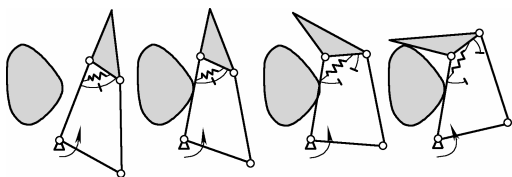


图 1 两关节欠驱动手指工作原理

1.2 欠驱动机械手机构设计

根据欠驱动原理，研制了一种新型的果蔬采摘欠驱动机械手爪。该手爪的机械本体部分由 3 个手指、机架和驱动传动机构和驱动电动机构成，主要用于抓取球状果实(如番茄，苹果等)。该机械手共有 9 个自由度，采用一个电动机同时驱动 3 个手指，完成包络抓取，整个机构的材料为铝，总装配图如图 2 所示。

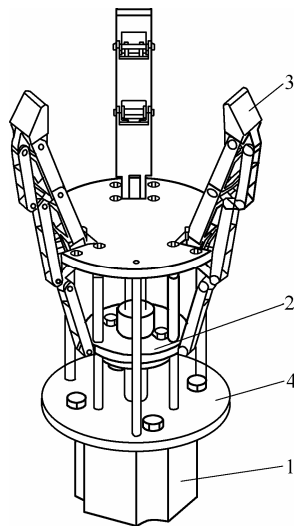


图 2 手爪总装配图

1. 电动机 2. 驱动传动机构 3. 手指 4. 机架

手指有三个关节，由上到下依次为远指、中指和近指关节，传动形式采用两个串联的四连杆机构作为驱动传动机构，具有传动效率高，产生的抓持力大等特点，采用扭簧作为动力约束机构。驱动采用一个带螺杆的步进电动机，并有配套的螺母和螺杆配合形成螺旋传动副，从而将电动机的转动转化成螺母的直线运动，通过连杆的传动进而驱动手指的开合，手指各关节接触面均安装了贴片式压力传感器。具体手指结构如图 3 所示。

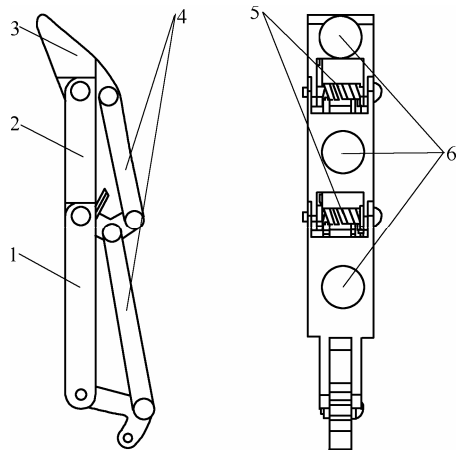


图 3 手指结构图

1. 近指关节 2. 中指关节 3. 远指关节 4. 四连杆机构 5. 扭簧 6. 传感器

1.3 力学分析

抓取物体时, 手指三个关节按照抓取顺序依次被约束以后, 整个手指的构形也被确定下来。通过静力学分析计算出一个手指和物体接触时三个关节接触力 F_1 、 F_2 、 F_3 。图 4 所示为欠驱动手指几何模型和静力学模型。

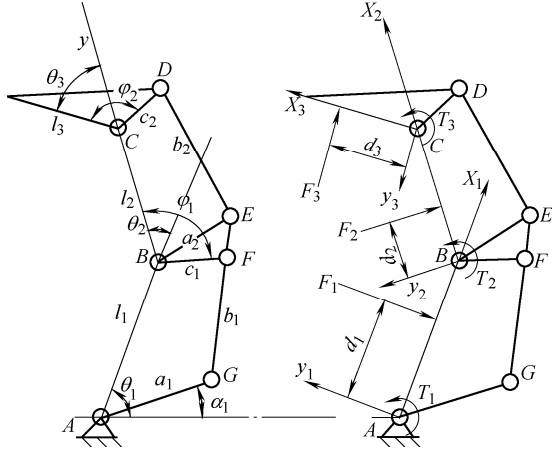


图 4 欠驱动手指几何模型和静力学模型

根据虚功原理可得^[15]

$$\mathbf{T}^T \boldsymbol{\omega} = \mathbf{F}^T \mathbf{v} \quad (1)$$

式中, \mathbf{T} 为手指机构的输入转矩矢量, 由驱动力矩 T_1 以及扭簧力矩 T_2 、 T_3 组成; $\boldsymbol{\omega}$ 为手指机构各关节与力矩相关的连杆的虚拟角速度矢量, 由驱动连杆的角速度 $\dot{\alpha}_1$ 以及中指关节、远指关节加速度 $\dot{\theta}_2$ 和 $\dot{\theta}_3$ 构成; \mathbf{F} 为作用在手指上的外力组成的矢量, 由接触力 F_1 、 F_2 、 F_3 构成; \mathbf{v} 为外力作用点在外力作用方向上的虚拟速度矢量, 由各接触点的 y 方向的速度分量构成, 即

$$\mathbf{T} = (T_1 \quad T_2 \quad T_3)^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\dot{\alpha}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = (F_1 \quad F_2 \quad F_3)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{v} = (v_{o_1 y_1} \quad v_{o_2 y_2} \quad v_{o_3 y_3})^T \quad (5)$$

各关节的接触点速度可以通过雅可比矩阵 \mathbf{J}_v 用各关节的角速度来表示, 即

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_v \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (6)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = (\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3)$$

再建立一个转换矩阵 \mathbf{J}_ω , 使得

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_\omega \boldsymbol{\omega} \quad (7)$$

计算可得

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_v^{-T} \mathbf{J}_\omega^{-T} \mathbf{T} \quad (8)$$

把三个关节看成是连动的, 虚拟速度 \mathbf{v} 可以按式(9)求得

$$\begin{pmatrix} v_{o_1 y_1} \\ v_{o_2 y_2} \\ v_{o_3 y_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ l_1 C_{\theta_2} + d_2 & d_2 & 0 \\ l_1 C_{\theta_2 \theta_3} + l_2 C_{\theta_3} + d_3 & l_2 C_{\theta_3} + d_3 & d_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$C_{\theta_i \theta_j} = \cos \left(\sum_{l=i}^j \theta_l \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_v = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ l_1 C_{\theta_2} + d_2 & d_2 & 0 \\ l_1 C_{\theta_2 \theta_3} + l_2 C_{\theta_3} + d_3 & l_2 C_{\theta_3} + d_3 & d_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

求 \mathbf{J}_ω 时, 如图 5 所示, 对于四边形 $ABFG$ 分析, 可以得到如下的角速度关系

$$\dot{\theta}_{\alpha_1} = \dot{\theta}_1 + \frac{h_1}{h_1 + l_1} \dot{\theta}_{\alpha_2} \quad (12)$$

式中, h_1 为 AB 与 FG 延长线交点 O_1 到 B 点的距离。

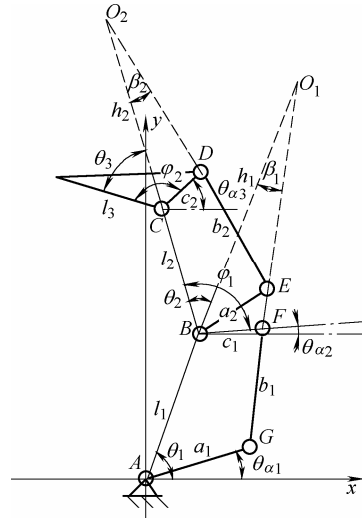


图 5 四连杆参数模型

同理, 对于四边形 $BCDE$, 也可以得到如下的角速度关系

$$\dot{\theta}_{\alpha_2} = \dot{\theta}_2 + \frac{h_2}{h_2 + l_2} \dot{\theta}_{\alpha_3} \quad (13)$$

合并式(12)、(13)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\alpha_1} &= \dot{\theta}_1 + \frac{h_1}{h_1 + l_1} \dot{\theta}_{\alpha_2} = \\ &= \dot{\theta}_1 + \frac{h_1}{h_1 + l_1} \left(\dot{\theta}_2 + \frac{h_2}{h_2 + l_2} \dot{\theta}_{\alpha_3} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中计算 h_i 有如下公式

$$h_i = c_i [\cos(\theta_{i+1} - \varphi_i) - \sin(\theta_{i+1} - \varphi_i) \cot \beta_i] \quad (15)$$

$$\cot \beta_i = \frac{c_i S_{\theta_{i+1}-\varphi_i} \sqrt{4a_i^2 b_i^2 - N_i^2} + M_i (l_i + c_i C_{\theta_{i+1}-\varphi_i})}{-(l_i + c_i C_{\theta_{i+1}-\varphi_i}) \sqrt{4a_i^2 b_i^2 - N_i^2} + M_i c_i S_{\theta_{i+1}-\varphi_i}}$$

$$M_i = -l_i [l_i + 2c_i \cos(\theta_{i+1} - \varphi_i)] + a_i^2 - b_i^2 - c_i^2$$

$$N_i = l_i [l_i + 2c_i \cos(\theta_{i+1} - \varphi_i)] - a_i^2 - b_i^2 + c_i^2$$

式中, S_α 和 C_α 分别代表 $\sin \alpha$ 和 $\cos \alpha$, 可以求得

$$J_\omega = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{h_1}{h_1 + l_1} & -\frac{h_1 h_2}{(h_1 + l_1)(h_2 + l_2)} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

将式(11)、(16)代入式(8)可得

$$F = \begin{pmatrix} \frac{l_1 U T_1}{d_1 d_2 d_3 (h_1 + l_1)(h_2 + l_2)} - \frac{(d_2 + l_1 \cos \theta_2) T_2}{d_1 d_2} + \frac{l_1 V T_3}{d_1 d_2 d_3} \\ \frac{h_1 l_2 (d_3 - h_2 \cos \theta_3) T_1}{d_2 d_3 (h_1 + l_1)(h_2 + l_2)} + \frac{T_2}{d_2} - \frac{(d_3 + l_2 \cos \theta_3) T_3}{d_2 d_3} \\ \frac{h_1 h_2 T_1}{d_3 (h_1 + l_1)(h_2 + l_2)} + \frac{T_3}{d_3} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$U = d_2 d_3 h_2 + d_2 d_3 l_2 - h_1 d_3 l_2 \cos \theta_2 +$$

$$h_1 h_2 l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - h_1 h_2 d_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$V = l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + d_2 \cos \theta_2 - d_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

2 手指结构参数设计

式(17)得出的三个指节的接触力计算模型具有变量多和参数多两个特点, 接触力的计算非常复杂, 难以辨别每一个参数对接触力的影响程度, 这使得确定手指机构的设计参数成为一个关键性问题^[16]。

2.1 手指各结构参数确定

从仿生学来看, 人手能够抓取的物体大小是与手指长度密切相关的。因此, 手指各关节长度可由所需要抓取的物体尺寸来确定。用于抓取一般大小的苹果之类的物体, 参考人手指的结构尺寸, 现确定手指各关节的长度分别为 $l_1=50$ mm, $l_2=35$ mm, $l_3=28$ mm。

确定手指机构各关节基本长度之后, 还需要确定手指机构其他结构参数。对于抓取稳定状态下的手指机构, 其基本要求: 具有良好的传力特性; 手指各关节受力尽可能均匀; 尽可能实现手指机构的紧凑。

由机械原理可知: 机构在传动压力角为零时,

力的传递效率最高。因此, 只要 b_1 和 a_1 、 b_1 和 c_1 、 b_1 和 a_2 以及 b_2 和 c_2 之间分别相互垂直, 手指机构就能够保证最好的力的传递效果, 于是就得到了图6所示的手指机构的抓取状态。为保证手指机构在其整个抓取范围内都具有较高的力的传递效果, 特将此状态设定在指节相对转角的中间值状态, 即 $\psi_1=\psi_2=135^\circ$ 。

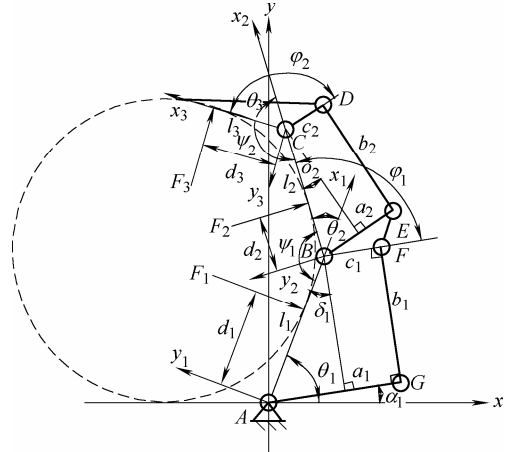


图6 理想抓取状态示意图

2.2 优化目标函数及设计变量

根据手指机构应尽量实现各关节接触力均匀分布的设计要求, 令

$$f_1 = \max(F_1, F_2, F_3)$$

$$f_2 = \min(F_1, F_2, F_3)$$

则手指结构参数优化的目标函数为

$$f = \text{abs}(f_1 - f_2) \quad (18)$$

式中, $\text{abs}(f_1 - f_2)$ 表示绝对值函数, 并有以下的几何约束

$$\begin{cases} \delta_1 = \arcsin \frac{a_1 - c_1}{l_1} \\ \delta_2 = \arcsin \frac{a_2 - c_2}{l_2} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = 1.5\pi - \delta_1 - \psi_1 \\ \varphi_2 = 1.5\pi - \delta_2 - \psi_2 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} b_1 = \sqrt{l_1^2 - (a_1 - c_1)^2} \\ b_2 = \sqrt{l_2^2 - (a_2 - c_2)^2} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} T_2 = -(k \times \pi/4 + \tau) \\ T_3 = -(k \times 5\pi/36 + \tau) \end{cases} \quad (22)$$

由于手指机构所处的特定位置状态, 角度参数 φ_1 、 φ_2 以及连杆长度参数 b_1 、 b_2 都可以用手指关节长度参数以及 a_1 、 a_2 、 c_1 、 c_2 表示出来, T_2 、 T_3 由

弹簧刚度 k 以及初始扭矩 τ 决定。所以根据目标函数中接触力表达式, 将 a_1 、 a_2 、 c_1 、 c_2 、 k 、 τ 作为手指机构的设计变量。使用 Matlab 中遗传算法工具箱进行分析计算, 已知参数 $l_1=50$ mm, $l_2=35$ mm, $l_3=28$ mm, $d_1=32.5$ mm, $d_2=d_3=17.5$ mm。 $(a_1, a_2, c_1, c_2, k, \tau)$ 约束范围为 $[(15, 12, 8, 5, 3, 50); (20, 16, 12, 10, 5, 100)]$, 种群数选择为 5 000, 设置停滞代数为 50, 适应度函数的加权平均变化小于 10^{-6} , 满足任一条件算法停止运行。独立运行多次选取如下 10 组数据, 得出表 1 所示的设计参数。选取第七组数据作为设计参数, 取整得到 $a_1=18$ mm, $a_2=15$ mm, $c_1=10$ mm, $c_2=8$ mm, $K=4.5$ N·mm/(°), $\tau=60$ N·mm。假设驱动力矩 $T_1=1\ 000$ N·mm, 通过计算可得 $F_1=8.83$ N, $F_2=7.28$ N, $F_3=7.77$ N。基本符合均匀受力的条件, 符合设计的要求, 可以作为结构设计的依据。

表 1 手指各关节结构参数

| | 关节长度/mm | | | | 弹簧刚度 $k/[\text{N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})]$ | 初始扭矩 $\tau/(\text{N}\cdot\text{mm})$ | 目标函数 $f/\times 10^{-7}\text{N}$ |
|----|---------|-------|-------|-------|---|---|------------------------------------|
| | a_1 | a_2 | c_1 | c_2 | | | |
| 1 | 19.0 | 13.9 | 10.5 | 7.39 | 4.06 | 52.5 | 18.2 |
| 2 | 17.6 | 14.7 | 10.2 | 7.99 | 3.49 | 98.2 | 2.32 |
| 3 | 18.8 | 13.7 | 11.1 | 7.77 | 4.57 | 86.7 | 7.56 |
| 4 | 18.9 | 12.3 | 10.9 | 6.81 | 4.76 | 54.5 | 6.98 |
| 5 | 18.9 | 10.8 | 11.1 | 6.10 | 4.81 | 76.1 | 21.3 |
| 6 | 16.9 | 11.5 | 10.3 | 6.59 | 4.64 | 93.0 | 3.62 |
| 7 | 18.3 | 14.9 | 10.6 | 8.22 | 4.68 | 58.3 | 1.84 |
| 8 | 19.5 | 13.1 | 11.3 | 7.34 | 4.71 | 68.6 | 5.74 |
| 9 | 19.1 | 14.5 | 10.7 | 7.81 | 3.91 | 71.6 | 3.12 |
| 10 | 17.4 | 13.9 | 10.2 | 7.64 | 4.26 | 74.6 | 23.2 |

3 欠驱动手爪抓取试验

3.1 系统构成

完成手爪的机械设计之后, 需要设计相应的控制系统使手爪具备抓取功能。手爪控制系统硬件主要由单片机、步进电动机以及配套的驱动器、力传感器、按键输入和上位机组成, 控制系统简图如图 7 所示。

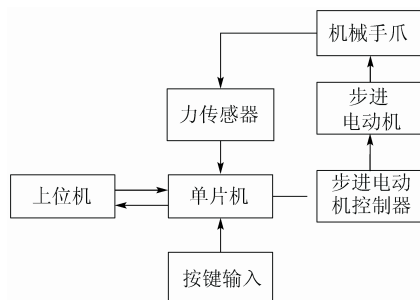


图 7 控制系统简图

通过单片机发送速度脉冲信号和方向信号驱

动步进电动机工作, 并可以通过力传感器的电压信号反馈进行力控制, 还可以将压力信号传至上位机进行显示监控。

3.2 PID 闭环力控制抓取试验

为了使关节的抓取力稳定在给定值, 对步进电动机驱动系统进行闭环控制(图 8), 一方面对步进电动机的步距角进行细分驱动, 改善步进电动机性能, 另一方面引入力反馈闭环控制。该系统采用贴片式压力传感器来获得各个手指抓取时的接触力, 将信号反馈给控制器, 进行处理得到控制量, 本系统直接通过 PID 控制器计算需要发送的脉冲频率和方向, 步进电动机对脉冲个数有积分作用, 系数为 K_F/s 。电动机的转角与接触力的关系是非线性, 传递函数为 $G_F(s)$, 反馈通道的输入为实际测得的接触力数值, 是一比例环节, 比例系数 $K_F=1$ 。

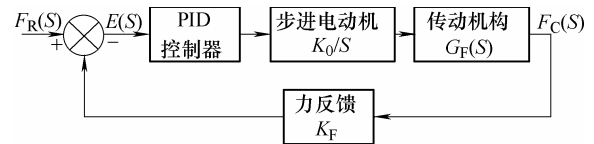


图 8 控制系统结构图

本文设计的欠驱动机械手爪仅有单个驱动输入但是有 9 个输出量, 不可能全部进行控制, 一般仅能对中一个力进行控制, 本文对控制远指关节最大接触力和所有关节最大的接触力分别进行试验, 并比较控制效果。

3.2.1 远指关节最大接触力的力控制抓取试验

设定远指关节最大接触力控制目标值为 10 N, 进行抓取试验。在每次接触力采样之后, 需要判断将哪个远指关节的接触力并作为控制量, 将三个远指关节接触力数值存入 F_3 、 F_6 、 F_9 , 程序判断流程如图 9 所示, 试验抓取效果和试验数据如图 10、11 所示, $F_1 \sim F_3$ 分别依次代表第一个手指的近指、中指和远指关节上的接触力, 与此类似 $F_4 \sim F_6$ 、 $F_7 \sim F_9$ 分别代表第二和第三个手指的近指、中指和远指关节上的接触力。从试验结果可以看到由于抓取的苹果形状不规则, 各手指受力情况也不同。第二个手指的远指关节接触力得到了控制, 稳定在 10 N, 其余 2 个关节的接触力大小与 10 N 较为接近, 与理论分析较为符合, 三个关节均匀受力是比较理想的情况。第一和第三个手指的受力情况较为类似, 远指关节接触力都偏小, 接触不够完全, 近指关节上的接触力在中指关节接触到果实之后开始减小, 直至脱离接触, 最终状态下, 均只有中指和远指关节

受力。手爪尽管实现了包络抓取，可以确保抓取的稳定性，但是这样的控制方法不能控制近指、中指关节的最大接触力。实际上抓取过程中最大的接触力产生在中指关节，尽管最大值也没有超过 15 N，但是抓取中面对形状大小不同的果实，中指接触力过大的情况仍可能出现，苹果可能受到损伤。

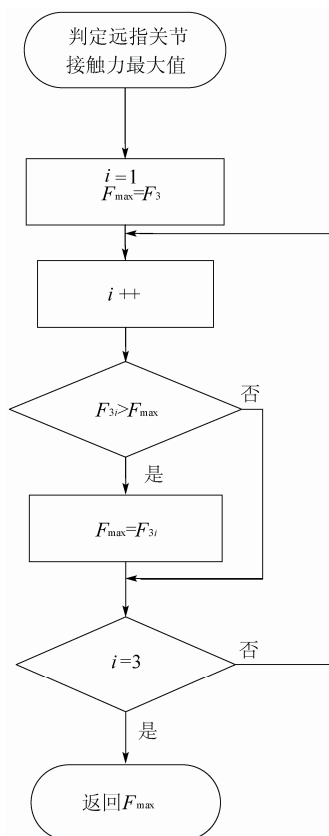


图 9 远指关节接触力判断程序

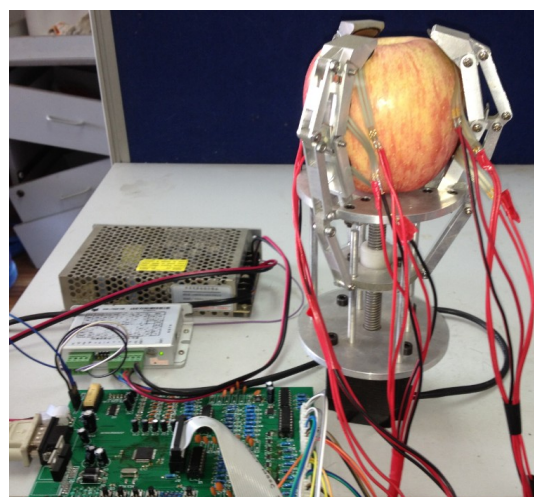


图 10 抓取效果图

3.2.2 所有关节最大接触力的力控制抓取试验

为了实现更安全的抓取，改变控制量，设定所有关节最大接触力控制目标值为 15 N，最大接触力判断过程类似于图 9，只需要将所有关节共 9 个接触力依次存入对应的寄存器进行 9 次判断即可。3 个手指接触力数据如图 12 所示。抓取最终结果各手指只有中指关节受力，近指关节接触果实之后最终脱离接触，没有受力。可以看到第三个手指的中指关节接触力得到了控制，这样的抓取可以保证安全性。如果要保证远指关节也接触到苹果，最后的抓取状态时中指关节接触力势必会很大，可能会损伤果实。该控制策略下如果果实直径太大甚至还有可能出现近指关节达到目标设定值就进入稳定状态，即只有近指关节接触物体，手爪在保证了抓取安全性的同时不能保证能包络抓取果实。

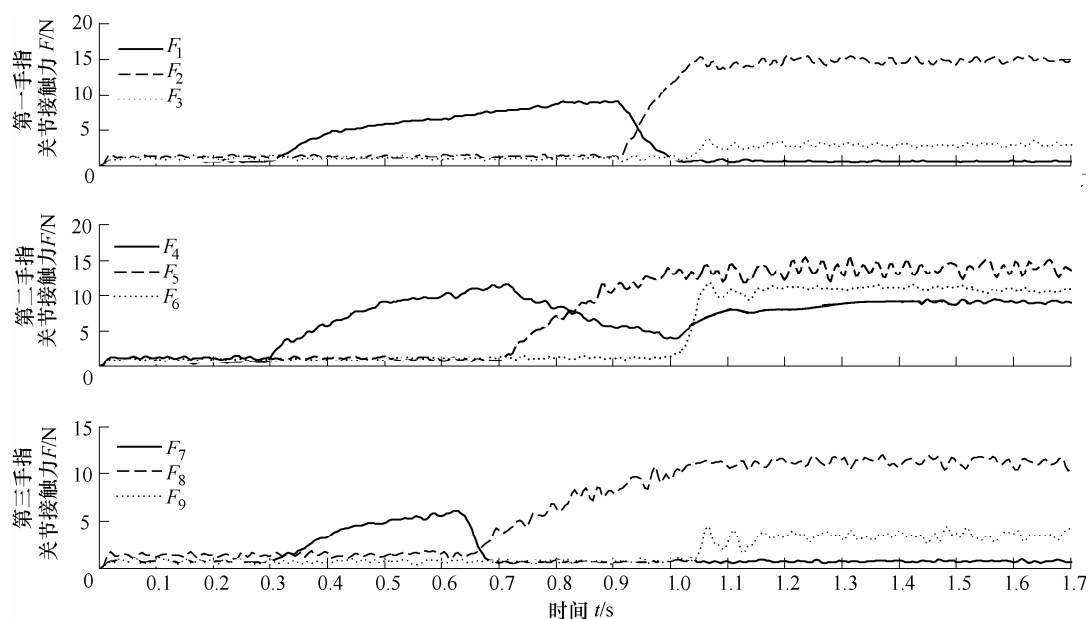


图 11 远指关节接触力控制曲线图

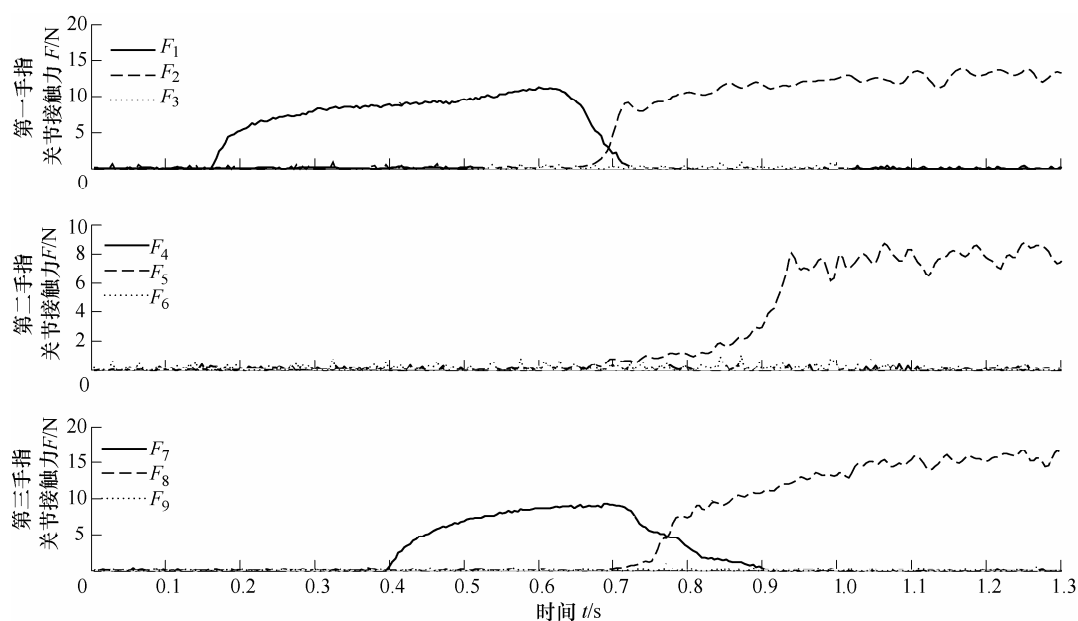


图 12 最大关节接触力控制曲线图

4 结论

本文通过对于欠驱动原理的研究分析, 设计并研制了一种果蔬采摘欠驱动机械手爪, 并对其抓取力控制进行了研究, 试验结果表明以下几点。

(1) 该手爪用一个驱动电动机控制三个手指、9个指节, 可以实现对果实的包络抓取。

(2) 通过 PID 闭环力控制方式, 实现了对远指关节和所有关节中最大接触力的有效控制。

(3) 该手爪能实现期望的抓取与最大接触力控制功能, 并具有控制简单可靠、抓取稳定、不损伤果实等特点。

参 考 文 献

- [1] 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-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175-179.
- [2] KONDA N, TING K C. Robotics for plant production[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1-3): 227-243.
- [3] MONTA M, KONDO N, TING K C. End-effectors for tomato harvesting robot[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1~3): 11-25.
- [4] SHIGEHICO H, KENTA S. Valuation of a strawberry-harvesting robot in a field test[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160-171.
- [5] RYU K H, KIM G, HAN J S. Development of a robotic transplanter for bedding plants[J]. J. Agr. Eng. Res., 2001, 78(2): 141-146.
- [6] ZHAO Dean, LÜ Jidong, JI Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112-122.
- [7] 刘长林, 张铁中, 杨丽. 茄子采摘机器人末端执行器设计[J]. 农机化研究, 2008(12): 62-64.
LIU Changlin, ZHANG Tiezhong, YANG Li. Design of end-effectors of eggplant harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(12): 62-64.
- [8] THIERRY L, BIRGLEN L, GOSSELIN C M. Underactuation in robotic grasping hands[J]. Machine Intelligence and Robotic Control, 2002, 4(3): 1-11.
- [9] BEGOC V, KRUT S, DOMBER E, et al. Mechanical design of a new pneumatically driven underactuated hand[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007: 927-933.
- [10] JOHAN T, BOYKO I, ALEXANDER S, et al. Real life grasping using an under-actuated robot Hand-simulation and experiments[C] // IEEE International Conference on Advanced Robotics, Munich, 2009: 1-8.
- [11] MATHIEU B, THIERRY L. Static analysis of single-input/multiple-output tendon-driven underactuated mechanisms for robotic hands[C] // Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Montreal, Quebec, Canada, 2010: 1-10.

- [12] HANGHYUN C, YOUNGHO L, MUNSANG K. Underactuated hand with passive adaptation[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, 2009: 995-1000.
- [13] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
HUANG Zhen, KONG Lingfu, FANG Yuefa. Mechanism theory of parallel robotic manipulator and control [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [14] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. On the force capability of underactuated fingers[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, China, 2003: 1139-1145.
- [15] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. Kinetostatic analysis of underactuated fingers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 211-221.
- [16] 罗金良. 可变约束和机械自适应结构的综合设计与应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
LUO Jinliang. Study on integrated design and application of variable constraint and self-adaptive structure of machinery[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

作者简介: 金波(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机电控制、智能机器人与深海机电装备。

E-mail: bjjin@zju.edu.cn

林龙贤, 男, 1988 年出生。主要研究方向为欠驱动机器人手爪。

E-mail: 541278124@qq.com