

指尖自锁欠驱动机械手设计与研究

郭立新¹, 李泽豪^{1,2}, 赵明扬²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要: 欠驱动机械手结构简单、成本低、易于控制、自适应能力强,但欠驱动机械手是通过机械限位与弹簧约束来完成抓取,抓取稳定性差,无法输出较大的指尖抓取力。本文提出一种新型的指尖可自锁的欠驱动三指机械手,在抓取时远指节与中指节可实现自锁,增加了抓取的稳定性。同时建立了单指的D-H运动学模型,利用MATLAB分析了机械手的工作空间,对手指进行了静力学分析,利用ADAMS软件对机械手进行仿真分析,最后进行抓取测试,结果表明指尖自锁机械手能输出更大抓取力,从而验证了指尖自锁机械手结构的合理性与可行性。

关键词: 机械手;指尖可自锁;欠驱动;受力分析;抓取试验

中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)07-0984-08

Design and Research of Fingertip Self-locking Underactuated Manipulators

GUO Li-xin¹, LI Ze-hao^{1,2}, ZHAO Ming-yang²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Jihua Laboratory, Foshan 528200, China. Corresponding author: GUO Li-xin, E-mail: lxguo@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The underactuated manipulator has the advantages of simple structure, low cost, easy control and strong adaptive ability. However, the underactuated manipulator relies on mechanical limit and spring constraint to complete the grasp, resulting in poor grasping stability and inability to output greater fingertip grasping forces. Accordingly, a new underactuated three-finger manipulator with fingertip self-locking is proposed. The distal knuckle and middle knuckle can self-lock when grasping, which increases the grasping stability. At the same time, the D-H kinematic model of the single finger is established, the working space of the manipulator is analyzed by MATLAB, the finger is analyzed by statics, the manipulator is simulated by ADAMS software, and finally the grasping test is carried out. The results show that the self-locking manipulator can output greater grasping forces. Thus, the rationality and feasibility of the structure of the self-locking manipulator are verified.

Key words: manipulator; fingertip self-locking; underactuation; force analysis; grasping test

目前,机器人在各个领域广泛应用,对机器人末端执行器的适应性、灵巧性要求越来越高,从而产生对机械手的研究。目前机械手主要有全驱动和欠驱动两种。全驱动最接近人手的灵巧度,例如Shadow Dexterous Hand^[1], Robonaut^[2], DLR-HIT II^[3]等,可以实现复杂动作,灵活度高,但是有结构复杂、成本高、控制难等问题。欠驱动是通过机械限位和弹簧等被动组件,在不影响关

节自由度数量的基础上,减少电机数量和控制难度,例如Sarah Hand^[4], Robotiq 3F^[5]等。欠驱动牺牲一些手指的灵巧度,使用较少的驱动,因而结构简单、成本低、易于控制。欠驱动机械手根据运动方式可分为耦合欠驱动和自适应欠驱动机械手。耦合欠驱动机械手使手指关节耦合运动来完成抓取,但是适应性差;自适应欠驱动机械手,可以对不同形状的物体进行包络抓取,关节运动顺

序主要是由弹簧来限制,抓取稳定性差,容易出现弹射现象使抓取失败,指尖的抓取能力差。

自20世纪60年代机器人诞生以来,关于机械手的研究也在不断发展进步。目前机器人在柔性工作环境中广泛应用,机械手也将面临更加复杂的工况,这就对机械手的灵活度和自适应能力提出了更高的要求。全驱动机械手在每个关节都有单独的驱动单元,一般具有十几个甚至更多的自由度,这对机械手的结构设计提出了巨大挑战。欠驱动机械手是指电机驱动数量小于机械手的自由度数,结构上相对简单,整体系统高效简洁利于控制,可以提高机械手的灵活性和自适应能力。传统两关节的欠驱动手指只有一个驱动,可以实现两关节运动^[6]。开始工作时由于弹簧约束和机械限位,驱动单元使第一关节和第二关节一起运动,直到第一关节与物体接触后,第一关节被约束固定。随着驱动力的进一步提高,第二关节克服弹簧弹力进行运动,直到与物体接触,从而完成手指对物体的抓取。

上述为欠驱动机械手在理想情况下的抓取过程,但在实际的抓取过程中由于弹簧的约束,手指容易与接触点脱离,机械手的抓握姿态很容易发生改变,抓取稳定较差,容易发生弹射现象^[7]。在机械手对物体进行包络抓取时,当两个指节都与物体接触后,随着驱动力继续增加,会导致第一关节与物体脱离,进一步导致整个抓取失败,这就是欠驱动机械手的弹射现象。

为了提高驱动机械手的抓取稳定性,本文研究设计了一种指尖可自锁的欠驱动机械手。该机械手可实现对不同形状物体的包络抓取,还可实现指尖抓取,具有结构简单、自适应好、易于控制、灵巧度高等特点。

1 欠驱动机械手结构设计

根据欠驱动机械手的运动特性,本文研制了一种新型的指尖自锁欠驱动机械手。该机械手具有3个手指,每个手指结构相同,都有4个自由度,3个指节从上到下依次为远指节、中指节和近指节。机械手采用连杆驱动,连杆驱动可以输出较大抓取力,加工制造简单^[8]。手指可实现侧摆与屈伸运动,侧摆驱动部分是通过舵机与齿轮实现3个手指的左右摆动,屈伸驱动部分是通过电机带动丝杆,使滑块平移来带动手指的屈伸运动。

图1a所示为手指结构简图,是通过两个滑块来实现3个指节的运动。滑块一平移通过拉杆一

带动近关节与远关节运动,滑块二平移通过拉杆二带动掌关节运动。图1b所示为手指结构的爆炸图。本机械手的指尖自锁机构主要由连杆组、扭簧一、锁紧滑块和锁紧轮组成。锁紧轮与锁紧滑块有相互配合的齿,指尖自锁时,锁紧滑块与锁紧轮接触,远指节与中指节固定不能相对转动。

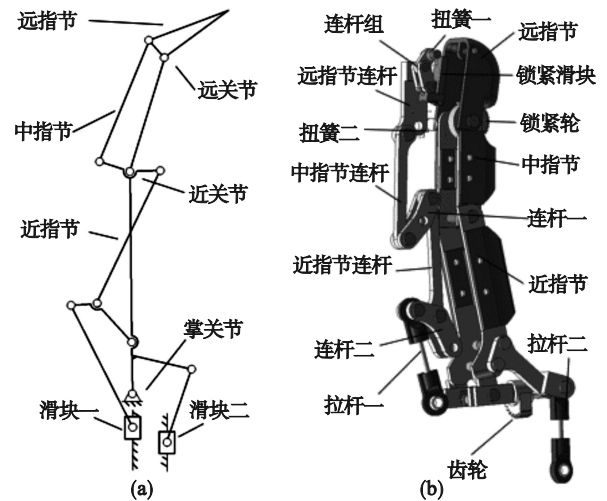


图1 手指结构

Fig. 1 Finger structure

(a)—手指结构简图;(b)—爆炸图。

在包络抓取时近指节、中指节、远指节依次与物体接触,然后完成指尖自锁。在指尖抓取或者其他抓取情况,中指节没有与物体接触而远指节先接触时,也能够完成指尖自锁。图2所示为指尖自锁过程,首先滑块一向下运动,带动近关节旋转,由于扭簧二的作用,远关节不发生转动。在中指节与物体接触保持固定后,远关节开始转动,由于扭簧一的作用,远指节连杆与远指节相对位置不变。当远指节与物体接触后,远指节连杆转动,使连杆组推动锁紧滑块向后运动,直到锁紧滑块与锁紧轮完全接触,由于锁紧轮固定在中指节上,因此远指节与中指节完全固定,从而完成指尖自锁。释放的过程与抓取相反,滑块一向上运动,锁紧滑块向前运动,远指节与中指节解锁,进一步手指脱离物体。

两指的驱动部分采用差动机构可同时驱动两个手指运动,提高机械手的自适应能力^[9-10],如图3a所示。丝杆滑块连接差动连杆,从而带动两个滑块运动。当其中一个手指受阻时由于差动连杆,另一手指会继续运动,使手指抓取时有更好的自适应性。两指间的夹角是通过舵机旋转带动齿轮来调整,可以使机械手适应不同大小的物体。机械手单指的驱动部分与双指的驱动相似,也是由两个电机带动丝杆滑块完成手指的抓取,

舵机控制手指的摆动.

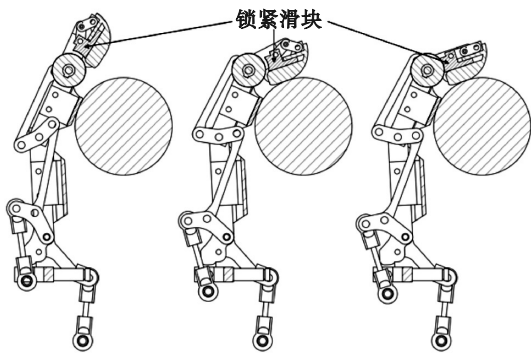
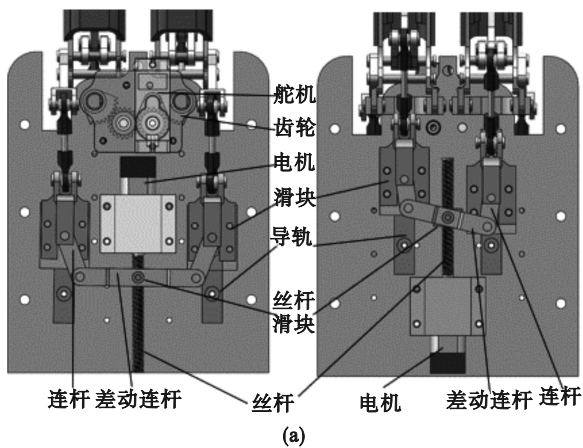


图2 指尖自锁过程

Fig. 2 Fingertip self-locking process

本机械手主要由3个手指、机架和驱动部分构成,可实现包络抓取和指尖抓取.该机械手一共有12个自由度,采用4个电机和2个舵机驱动,总体装配图如图3b所示.



(a)

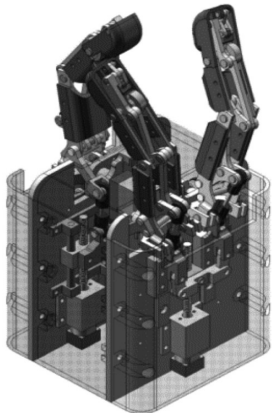


图3 机械手总装图

Fig. 3 General assembly drawing of the manipulator
(a)一双指驱动部分;(b)一机械手装配图.

2 运动分析

运动学分析主要研究手指末端姿态与各个

关节角的关系,实现从关节空间到笛卡尔空间的变换.本机械手3个手指的结构相同,因此以单指的运动学分析为主.采用Denavit-Hartenberg(D-H)参数对手指进行运动学建模^[11].根据手指结构可得出手指关节坐标简图,如图4所示,坐标系5为指尖坐标系,其余为各个连杆坐标系.

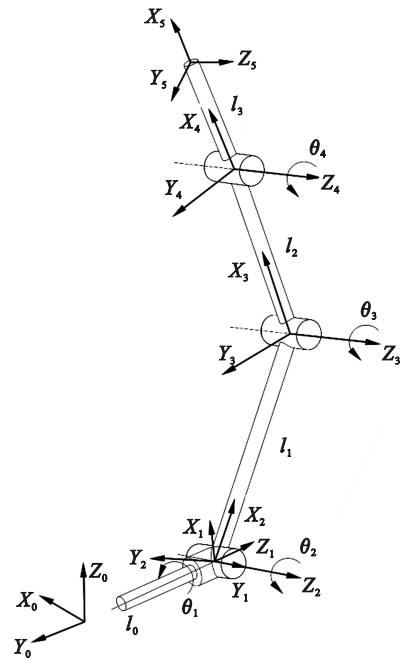


图4 手指关节坐标简图

Fig. 4 Coordinate diagram of the finger joint

手指的D-H参数如表1所示.

表1 手指D-H参数

Table 1 Finger D-H parameters

关节号 <i>i</i>	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	90	l_0	θ_1
2	0	-90	0	θ_2
3	l_1	0	0	θ_3
4	l_2	0	0	θ_4
5	l_3	0	0	0

两连杆间的坐标变换矩阵为

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表1中D-H参数代入式(1),可得到各连杆间的变换矩阵.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -l_0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_1 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将连杆间的变换矩阵依次相乘可得到指尖与基坐标的转换矩阵.

$${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T =$$

$$\begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & -s_1 & c_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2 + l_3 c_{234}) \\ s_{234} & c_{234} & 0 & l_2 s_{23} - l_0 + l_1 s_2 + l_3 s_{234} \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & c_1 & s_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2 + l_3 c_{234}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中:

$$c_1 = \cos \theta_1, c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3), c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$s_1 = \sin \theta_1, s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3), s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4).$$

研究欠驱动机械手的工作空间可以得到手指指尖的活动空间,对机械手的设计和运动规划有重要意义.本文利用蒙特卡洛法进行手指工作空间分析,蒙特卡洛法是离散化方法的一种演变,该方法随机生成大量的机器人位姿,是一种简单而广泛使用的方法,特别适用于机械手工作空间分析^[12].利用MATLAB软件建立该机械手的运动模型,生成 N 个关节随机变量,计算出3个指尖在空间上的位置,把指尖位置在三维空间画出来,从而得到机械手的工作空间云图,如图5所示.

3 欠驱动机械手静力学分析

欠驱动机械手在抓取物体时,手指的各个指节与物体接触,在稳定抓取时,物体所受的外力之和为零.对于抓取不同形状的物体,欠驱动手指各个指节的旋转角度也相对不同,指节所受到的接触力也会不同,接触力的大小直接影响欠驱

动手指的负载能力和抓取稳定性^[13].在欠驱动手指抓取的过程中,手指各指节的接触力与关节转角、连杆长度、驱动力矩等因素有关.图6为欠驱动手指静力学模型,此模型忽略手指侧摆转角的影响.

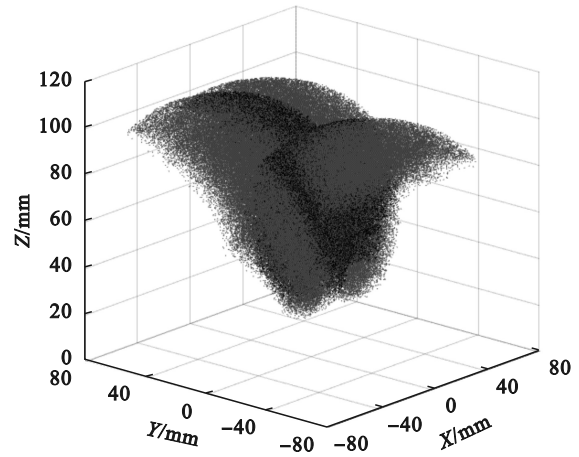


图5 机械手手指工作空间

Fig. 5 Working space of the manipulator finger

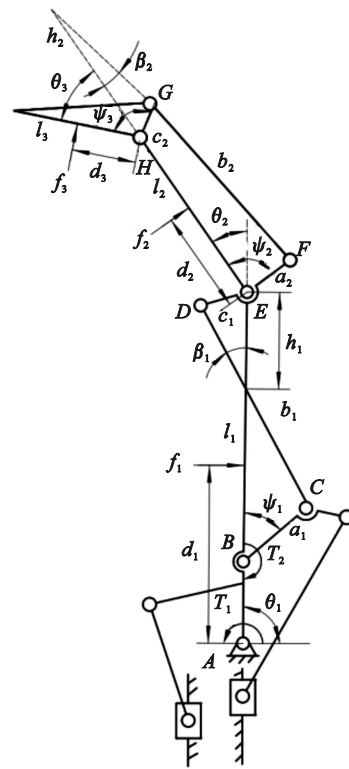


图6 欠驱动手指静力学模型

Fig. 6 Static model of the underactuated finger

根据虚功原理^[14]可得

$$T^T \omega = F^T v. \quad (8)$$

式中: T 为欠驱动手指驱动机构所输入的转矩向量,两个滑块带动连杆所产生的转矩 T_1, T_2 ,忽略弹簧所产生的转矩; ω 为各关节的角速度向量,分别为 $\theta_1, \psi_1, \theta_3$; F 为各指节所受的接触力向量,分

别为 f_1, f_2, f_3 ; \mathbf{v} 为各指节接触点上的速度向量, 分别为 v_1, v_2, v_3 , 各向量可以表示为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

各关节的接触点的速度 \mathbf{v} 可以通过雅克比矩阵 \mathbf{J}_v 用各个关节的角速度来表示:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{J}_v \boldsymbol{\theta}, & (10) \\ \boldsymbol{\theta} &= [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T, \\ \mathbf{J}_v &= \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ d_2 + l_1 \cos \theta_2 & d_2 & 0 \\ d_3 + l_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_3 & d_3 + l_2 \cos \theta_3 & d_3 \end{bmatrix}. & (11) \end{aligned}$$

建立一个转换矩阵 \mathbf{J}_ω , 使得

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}_\omega \boldsymbol{\omega}. \quad (12)$$

需要求得 \mathbf{J}_ω , 在四边形 $BCED$ 和四边形 $EFGH$ 中, 由三心定理可以得到

$$\dot{\theta}_{a_1} = \frac{h_1}{l_1 - h_1} \dot{\theta}_{c_1}, \quad (13)$$

$$\dot{\theta}_{a_2} = \dot{\theta}_2 + \frac{h_2}{h_2 + l_2} \dot{\theta}_{c_2}. \quad (14)$$

其中: h_1 为 CD 与 BE 的交点到 E 的距离; h_2 为 EH 与 GF 交点到 H 的距离; $\dot{\theta}_{a_1}, \dot{\theta}_{c_1}, \dot{\theta}_{a_2}, \dot{\theta}_{c_2}$ 分别为连杆 BC, DE, EF, GH 的角速度, $\dot{\theta}_{c_1}$ 且与 $\dot{\theta}_{\psi_1}$ 相等, $\dot{\theta}_{c_2}$ 与 $\dot{\theta}_3$ 相等, 计算可得

$$\dot{\theta}_{\psi_1} = \frac{h_1}{l_1 - h_1} \left(\dot{\theta}_2 + \frac{h_2}{h_2 + l_2} \dot{\theta}_3 \right). \quad (15)$$

在四边形 $BCED$ 中 h_1 可由以下公式得

$$h_1 = l_1 - a_1 (\cos \psi_1 - \sin \psi_1 \cot \beta_1). \quad (16)$$

$$\cot \beta_1 = \frac{YZ - \sqrt{4b_1^2 X - Y^2} \sqrt{4l_1^2 X - Z^2}}{Z \sqrt{4b_1^2 X - Y^2} + Y \sqrt{4l_1^2 X - Z^2}}. \quad (17)$$

其中: $X = a_1^2 + l_1^2 - 2a_1 l_1 \cos \psi_1$; $Y = X + b_1^2 - c_1^2$; $Z = X + l_1^2 - a_1^2$.

在四边形 $EFGH$ 中 h_2 可由以下公式得

$$h_2 = c_2 [\cos(\theta_3 - \psi_2) - \sin(\theta_3 - \psi_3) \cot \beta_2]. \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \cot \beta_2 = & \\ & \frac{c_2 \sin(\theta_3 - \psi_3) \sqrt{4a_2^2 b_2^2 - N^2} + M(l_2 + c_2 \cos(\theta_3 - \psi_3))}{-(l_2 + c_2 \cos(\theta_3 - \psi_3)) \sqrt{4a_2^2 b_2^2 - N^2} + M c_2 \sin(\theta_3 - \psi_3)}. & (19) \end{aligned}$$

$$M = -l_2 [l_2 + 2c_2 \cos(\theta_3 - \psi_2)] + a_2^2 - b_2^2 - c_2^2,$$

$$N = l_2 [l_2 + 2c_2 \cos(\theta_3 - \psi_2)] - a_2^2 - b_2^2 + c_2^2.$$

根据以上各式可以求得 \mathbf{J}_ω :

$$\mathbf{J}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_1 - h_1}{h_1} & -\frac{h_2}{h_2 + l_2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

最终可以求得

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_v^{-T} \mathbf{J}_\omega^{-T} \mathbf{T}. \quad (21)$$

对式(21)求解可得

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_1}{d_1} - \frac{h_1 t_2 (d_2 d_3 (h_2 + l_2) + l_1 U)}{d_1 d_2 d_3 V} \\ \frac{h_1 l_2 T_2 (d_3 - h_2 \cos \theta_3)}{d_2 d_3 V} \\ \frac{h_1 h_2 T_2}{d_3 V} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

其中: $U = d_2 h_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_2 l_2 \cos \theta_2 - h_2 l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3$; $V = (h_2 + l_2)(l_1 - h_1)$.

4 欠驱动机械手抓取仿真

使用 ADAM 仿真分析软件对欠驱手进行运动仿真, 本文以单指抓取进行分析. 将 SolidWorks 中建立的三维模型导入 ADAMS 中. 首先定义材料参数, 机械手指节部分为光固化树脂材料, 连杆部分为 6061 铝合金材料. 机械手的指节与连杆之间主要是转动副连接, 滑块为移动副连接. 机械手部分零件间需要添加接触, 例如自锁机构之间、各指节之间、指节与物体之间. 自锁机构两个扭簧的刚度分别为 0.075 和 $0.5 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$, 为了减少仿真过程中波动适当增加弹簧的阻尼为 $0.075 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}/(^{\circ})$. 简化了电机和丝杆, 直接使用滑块驱动, 在手指与物体接触前, 两滑块的移动速度为 4 mm/s , 当指节与物体接触后, 设置滑块的驱动力逐渐增加到 50 N 后保持不变. 完成对欠驱手虚拟样机的建立.

对机械手指进行抓取运动仿真, 近指节固定, 滑块一以 4 mm/s 的速度向下运动. 当手指完成自锁后, 滑块停止一段时间, 然后向上运动到初始位置. 图 7 为手指运动到指尖自锁的仿真过程, 图 8 为手指运动时关节转动角度. 滑块一向下运动手指弯曲, 先是近关节开始转动, 当中指节与近指节接触后近关节停止转动, 远关节开始转动, 直到远指节与中指节接触, 远关节停止转动, 然后是近指节连杆运动, 完成指尖自锁. 滑块一停止一段时间后向上运动手指伸直, 与手指抓取的过程相反, 先是指尖解锁, 接着远关节运动, 最后近关节运动. 从图 8 可以看出, 关节运动角度与时间几乎呈线性关系, 说明关节运动平稳.



图 7 手指运动仿真

Fig. 7 Finger movement simulation

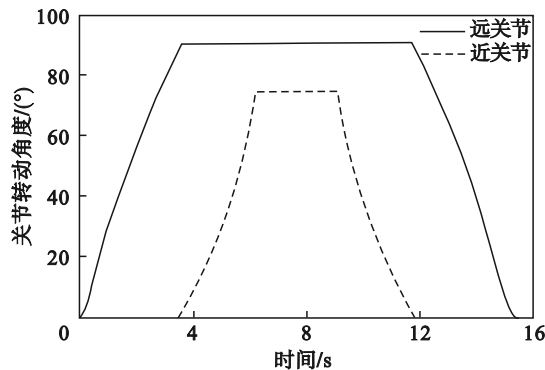


图 8 手指两关节转动角度

Fig. 8 Biarticular movement angles

对机械手手指进行包络抓取运动仿真,如图 9 所示.图 9a 为有指尖自锁的包络抓取仿真,首先滑块二向下运动,近指节与物体接触后,滑块 2 的驱动力逐渐增大到 50 N,滑块一开始运动,中指节与远指节依次与物体接触,滑块一的驱动力也逐渐增大到 50 N.图 9b 为无指尖自锁的包络抓取仿真,把近指节连杆与远指节固定使自锁机构失效,使用同样的驱动.从图 9 的两种仿真结果可以看出,有指尖自锁的手指可以一直保持稳定抓取,但是没有指尖自锁的手指随着滑块的驱动力增大,远指节发生了较大的滑动使中指节与物体脱离,产生了弹射现象,使抓取变得不稳定,容易抓取失败.

指尖自锁欠驱动手指包络抓取时,关节转动角度和指节接触力变化如图 10 所示.由图 10 可见,关节转动先是掌关节转动,接着近关节和远关节依次转动,完成指尖自锁后,关节角度保持不变.手指 3 个指节的接触力逐渐增大,当滑块的驱动力达到最大后,保持不变.近指节、中指节和远指节的接触力分别为 9.5, 3.8 和 17.2 N.

对机械手手指进行指尖抓取运动仿真,如图 11 所示.图 11a 为有指尖自锁的指尖抓取仿真,滑块二固定不动,滑块一向下运动,在手指与物体接触后,逐渐增大滑块一的驱动力到 50 N.图 11b 为无指尖自锁的指尖抓取仿真,使用相同的驱

动.从图 11 的两种仿真结果看出,随着滑块一的驱动力增大,有指尖自锁的手指一直保持稳定的抓取,而没有指尖自锁的手指则产生了较大位移,使抓取失败.

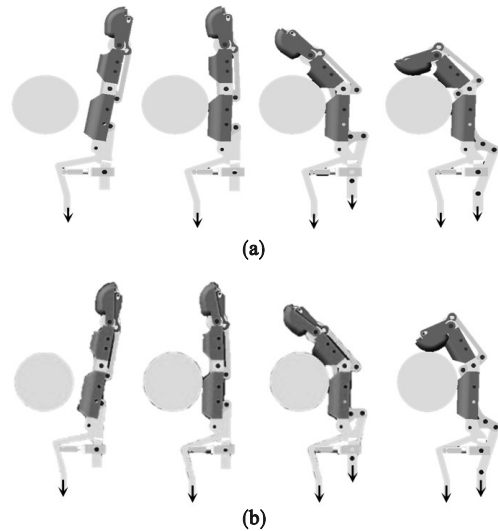


图 9 包络抓取仿真

Fig. 9 Envelope grasping simulation

(a) — 有指尖自锁; (b) — 无指尖自锁.

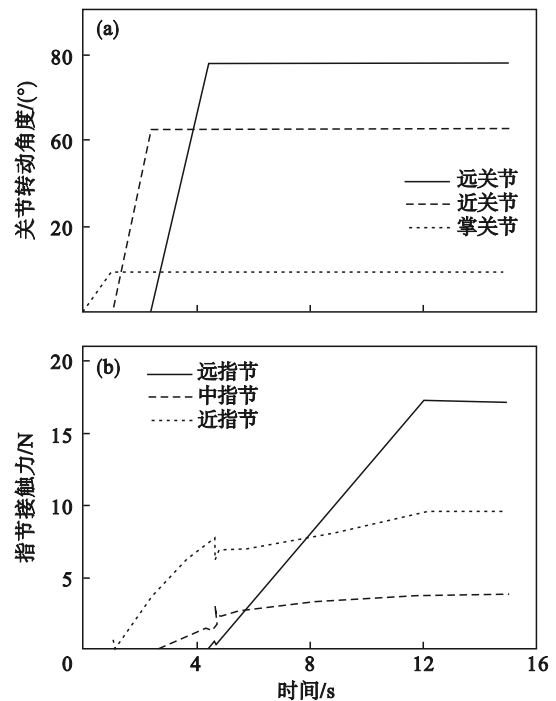


图 10 包络抓取关节转角和指节接触力

Fig. 10 Envelope grasping joint angle and knuckle contact force

(a) — 关节转动角度; (b) — 指节接触力.

通过对指尖自锁欠驱动机械手的手指进行抓取运动仿真分析,结果表明本研究的机械手具有良好的自适应能力和抓取稳定性,同时可以输出较大的抓取力,验证了机械手设计的合理性.

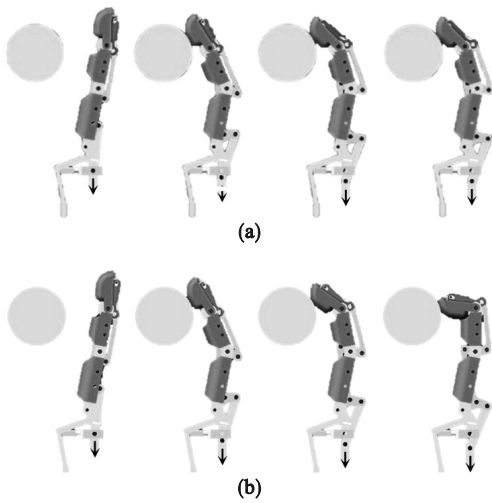


图 11 指尖抓取仿真

Fig. 11 Fingertip grasping simulation

(a)一有指尖自锁; (b)一无指尖自锁.

5 欠驱动机械手样机实验

图 12 为指尖自锁欠驱动机械手样机,机械手的外壳是光固化树脂 3D 打印加工,主要受力部件和传动连杆为 6061 铝合金加工,驱动部分由 4 个 N20 减速电机和 2 个 DS041MG 舵机组成.在机械手的指节部分粘贴了黑色橡胶,来增加抓取时的摩擦力,使抓取更加稳定.

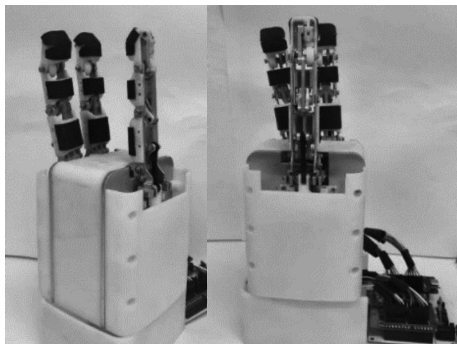


图 12 机械手样机

Fig. 12 Prototype manipulator

图 13 为机械手的控制系统,主要由 PC 上位机、ESP32 下位机、电源、电机驱动、压力传感器等部分组成.PC 上位机主要是进行人机交互,接收和发送机械手运动信息到下位机.下位机 ESP32 负责接收上位机发送的指令,控制底层硬件和发送当前机械手运动信息到上位机.

对机械手包络抓取时的接触力进行测试实验,在机械手单指的指节上贴上薄膜压力传感器,对水瓶进行包络抓取,如图 14 所示.图 15 为薄膜压力传感器所测得的 3 个指节接触力.从图

中可以看出,近指节、中指节和远指节与水瓶依次接触,随着电机驱动力增加到最大,3 个指节的接触力也趋于平稳,3 个指节接触力最终在 10.1, 11.5 和 13.5 N 之间微小波动.实验结果表明指尖自锁欠驱动机械手具有良好的抓取稳定性.

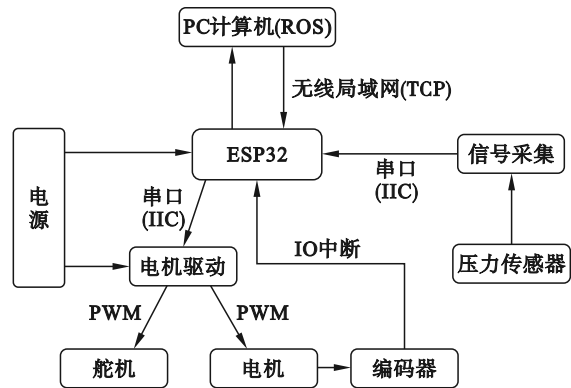


图 13 欠驱动机械手控制系统

Fig. 13 Underactuated manipulator control system

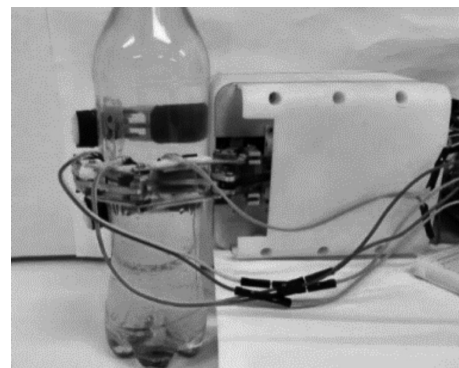


图 14 机械手包络抓取

Fig. 14 Manipulator envelope grasping

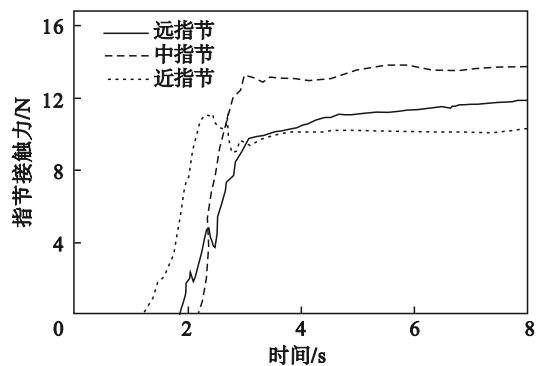


图 15 机械手包络抓取接触力

Fig. 15 Manipulator's envelope grasping contact force

图 16 为机械手对不同物体进行抓取实验,包括包络抓取与指尖抓取,分别对充电器、笔、螺丝刀、美工刀和水杯等进行了抓取测试,机械手能够稳定抓取.通过样机抓取实验,验证了指尖自

锁欠驱动机械手自适应强、抓取稳定性强。

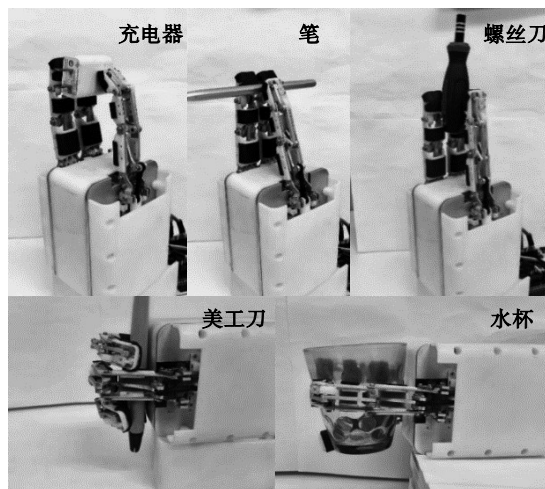


图16 不同物体抓取实验

Fig. 16 Different object grasping experiments

6 结 论

1) 本文设计研究了一种新型指尖自锁欠驱动机械手.对欠驱动机械手进行运动学分析,利用MATLAB软件和蒙特卡洛法对机械手的工作空间进行分析,得到三指欠驱动机械手的工作空间云图.对机械手建立三关节的手指静力学模型,分析了各指节的接触力.运用ADAMS仿真软件对欠驱动机械手的手指在不同抓取情况下进行运动仿真分析.

2) 完成样机的加工与装配和机械手的控制部分,对包络抓取时的接触力进行测量实验,并对不同形状的物体进行了抓取测试.结果表明,本文研究的指尖自锁欠驱动机械手可抓取不同形状大小的物体,同时能输出较大抓取力,具有良好的自适应性和稳定性,验证了本机械手结构的合理性与可行性.

参考文献:

- [1] Kochan A.Shadow delivers first hand[J].*Industrial Robot*, 2005,32(1):15-16.
- [2] Ambrose R O, Aldridge H, Askew R S, et al. Robonaut: NASA's space humanoid[J].*IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 2000, 15(4):57-63.
- [3] 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 Yi-wei, Jin Ming-he, Fan Shao-wei, et al. Five-finger humanoid dexterous robot hand DLR/HIT hand II [J] *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11):10-17.)
- [4] Laliberte T, Birglen L, Gosselin C.Underactuation in robotic grasping hands[J].*Machine Intelligence & Robotic Control*, 2002, 4(3):1-11.
- [5] Sadun A S, Jalani J, Jamil F.Grasping analysis for a 3-finger adaptive robot gripper [C]// 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA).Ipoh, 2016:1-6.
- [6] 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 Long-xian. Paw design and force control of underactuated fruit and vegetable picking manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(19):1-8.)
- [7] Birglen L, Gosselin C M. Grasp-state plane analysis of two-phalanx underactuated fingers [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(7):807-822.
- [8] Kim U K, Jung D W, Jeong H Y, et al. Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand[J]. *Nature Communications*, 2021, 12:7177.
- [9] Xu K, Liu H, Liu Z H, et al. A single-actuator prosthetic hand using a continuum differential mechanism [C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).Seattle, 2015:6457-6462.
- [10] Birglen L, Gosselin C M. Force analysis of connected differential mechanisms: application to grasping [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(10):1033-1046.
- [11] Zheng X S, Zheng Y J, Shuai Y, et al. Kinematics analysis and trajectory planning of 6-DOF robot [C]// IEEE 3rd Information Technology.Chengdu, 2019:1749-1754.
- [12] 马涛.一种新型柔性仿人机械手的优化设计研究[D].天津:河北工业大学, 2020. (Ma Tao. Research on optimization design of a new flexible humanoid manipulator [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.)
- [13] 郭一典,霍良青,张奇峰,等.水下欠驱动机械手结构设计与仿真分析[J].*现代制造工程*, 2021(8):48-55. (Guo Yi-dian, Huo Liang-qing, Zhang Qi-feng, et al. Structural design and simulation analysis of underwater underactuated manipulator [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(8):48-55.)
- [14] Birglen L, Gosselin C M. Kinetostatic analysis of underactuated fingers [J].*IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(2):211-221.