

基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪研究

姚兴田¹ 王旭光¹ 张磊¹ 李红兵² 戴丽娟¹ 陆观¹

(1.南通大学机械工程学院,南通 226019;2.上海交通大学仪器科学与工程系,上海 200240)

摘要:多指机器人手爪普遍存在指端作用力弱的问题,柔性机器人手爪也出现末端作用力不足的现象,采用气压驱动的软体手爪虽驱动力增强,但不利于手爪控制的准确性,为此,设计了一种基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪。该手爪每根手指的指尖、指中节采用滑块摇杆机构实现,不仅增强了指端作用力,而且结构简单、易实现。为避免手指与目标物的刚性接触,指尖、指根运动均通过弹簧来实现手爪的柔性;指尖驱动弹簧设计得较软,有利于初始接触的柔性;指根采用腱传动方式,指根腱采用较硬的弹簧来传递舵机扭力,可保证足够的作用力;手指表面均设计有较平的表面,有利于粘贴触觉传感器。通过理论分析与计算,证明指尖可获得较大的作用力,并分析了弹簧的选取方法。通过抓取实验证明本文设计的机器人手爪具有较好的适应性和抓取能力;与本课题组前期设计的钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪进行了抓取力对比测试,结果表明,手爪的抓取力有了很大提升,最大抓取质量达1.71 kg;通过测试指端正压力与驱动舵机旋转角的关系以及抓取典型目标物的损伤情况,证明了设计的手爪具有一定柔性。有关性能实验证明了设计的手爪具有较好的实用性。

关键词:机器人手爪;抓取;柔性;滑块摇杆机构

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)08-0396-10

OSID:



Flexible Robot Hand Based on Slider and Rocker Mechanism

YAO Xingtian¹ WANG Xuguang¹ ZHANG Lei¹ LI Hongbing² DAI Lijuan¹ LU Guan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China

2. Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A variety of the multi-finger robot hands have been developed up to now. However, most of them have weak force at the fingertip. Some of the flexible robot hands also have weak force at the fingertip. Although the soft hand with pneumatic actuation can have strong driving force, their control precision is low. A flexible robot hand based on slider and rocker mechanism was designed. It had three fingers. In each finger, the fingertip and the middle phalange were realized through a slider and rocker mechanism for which the force of the fingertip was strengthened. The tendon transmission was used for the proximal phalange, which guaranteed the driving force. The springs were used for the motion of the fingertip and proximal phalange to avoid the hard contact at the object. The spring that drove the fingertip was soft for good flexibility at initial contact. The spring that drove the proximal phalange was moderately hard to guarantee the sufficient force. The fingertip can achieve strong force through the mechanic analysis and computation. The analysis was performed on how to determine the springs. The experiments on grasping different common objects showed that the proposed robot hand had good adaptability and grasping ability. The experimental results on grasping force tests proved that the proposed robot hand can grasp much heavier objects compared with the former robot hand also designed by our research group. It can grasp an object with the maximum weight of 1.71 kg. The tests on the relationship between the normal force of the fingertip and rotational angle of the servo motor of the proximal phalange and the destruction tests on grasping some typical objects were performed. The results showed that the proposed robot hand had good flexibility. These performances indicated the usefulness of the proposed robot hand.

Key words: robot hand; grasping; flexibility; slider and rocker mechanism

收稿日期: 2021-03-27 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505280)和上海市自然科学基金项目(18ZR1421300)

作者简介: 姚兴田(1965—),男,教授,主要从事机器人设计与控制和机电装备开发研究, E-mail: yao.xt@ntu.edu.cn

通信作者: 张磊(1973—),男,副教授,博士,主要从事机器人视觉、触觉、机器人设计与控制研究, E-mail: zhangleint@ntu.edu.cn

0 引言

多年来国内外学者对机器人手爪进行了深入研究和设计。MARTIN 等^[1]设计的仿人灵巧手拥有 20 个自由度。PALLI 等^[2]的设计可实现仿人抓取动作。哈尔滨工业大学与德国宇航局合作研发了四指 HIT/DLR - I^[3]和五指 HIT/DLR - II^[4]机器人手爪。HIT/DLR - II 机器人手爪将所有的电机、减速器、传动系统、驱动电路和传感器集成到手掌大小的系统中,每根手指都有 4 个关节及 3 个自由度,达到高度仿人手的效果。但这些仿人手爪存在指端夹紧力弱的问题,因此研究者开发了与人相似的肌肉驱动,或称腱传动,来增强夹紧力。如英国公司 Shadow Robot 研发的仿人手爪 Shadow hands^[5]采用与人相似的肌肉驱动,使用钢丝绳驱动手指,钢丝绳通过手腕引出连接在外部执行机构上。刘菲等^[6]设计的四指灵巧手采用腱传动,能以节省空间的方式驱动手指。XIONG 等^[7]设计的高度仿人灵巧手采用滑轮组与腱传动的方式,增加了驱动力。XIA 等^[8]设计的仿人灵巧手采用与文献[7]类似的滑轮组与腱传动方式,并测试了驱动力,获得了较强的抓取力。然而,仿人灵巧手存在结构复杂、实现困难、造价高等问题,难以推广应用。腱传动虽能更好地模拟人手功能^[9],使指端作用力有所增强,但由于腱大多采用钢丝绳,在刚性连接下,时间长容易松动,需要定期更换,其拆装过程繁琐。因此需要设法对腱传动进行改进。

另一类机器人手爪从简化结构、注重实用的角度出发,不追求过于仿人外形。如 Robotiq 公司研制的连杆驱动的四指手爪,其结构紧凑、简单,独特的连杆驱动结构使其在抓取物体时具有较强的适应能力^[10-11],简单而有效的设计具有很高的参考价值。其缺点是仿人化程度降低,限制了手爪的仿人行为,高度的欠驱动虽提高了适应外形的能力,但也限制了控制的独立性和精准度。文献[12-13]设计了一种变约束连杆机构,其特点接近 Robotiq 手爪。SAINUL 等^[14]采用腱传动设计三指手爪,简化了结构,但指端作用力未进行验证。张磊等^[15]设计了一种三指机器人手爪,每根手指具有 3 个关节,指根关节与指中节关节采用钢丝绳耦合传动实现欠驱动,指尖由电机单独驱动,因此使控制的独立性有所提高,抓取适应性也有所增强。然而指尖驱动电机过小,使抓取力偏弱。文献[16]设计的三指手爪虽结构简化,但未以实验验证抓取特性。

传统的手爪多为刚性连接,存在对定位偏差敏感、易损坏目标物等缺点,与人手操作目标物表现的

柔性接触差距较大。因此近些年柔性或软体机器人手爪悄然兴起。文献[17-18]设计的柔性手爪较好地避免了对农作物的损坏。LEE 等^[19]采用 3D 打印聚合物复合材料设计了一种软体三指手爪,该手爪使用腱传动和欠驱动的方式驱动手指,可以较好地适应目标物的外形。VENKATESA 等^[20]基于类似前者的思想设计了软体三指手爪,该手爪适应目标物外形的性能较好,但未进行抓取力测试实验。LI 等^[21]设计了带有硬骨架的柔性手爪,其手指表面贴上软体材料,采用腱传动和欠驱动方式,该手爪不仅仿人抓取效果较好,也有较强的抓取力。ZHOU 等^[22]针对软体手爪抓取力偏弱的问题,采用气动驱动设计了软体手爪,抓取力虽得以加强,但气动驱动存在控制不准确的问题。KIM 等^[23]设计的带软接触面的手爪采用连杆传动方式,在驱动力增强的同时,能够将捏抓控制得比较准确。

本文基于连杆机构、腱传动以及弹性机构,设计一种刚柔并济的柔性三指机器人手爪,手爪每根手指的指尖、指中节采用滑块摇杆机构实现,指尖、指根运动由驱动源通过弹簧带动,以期实现柔性,由刚性元件提供更大的夹紧力,以达到刚柔并济的效果。

1 手指设计原理与结构

五指机器人手爪虽仿人程度高,但设计制造困难、成本高。另一方面,在工业领域,因结构化程度高,物件形状单一,一些机械手常采用两根手指完成夹取^[24]。但对一些形状不规则的物体,两指难以使物体获得平衡,即便能够夹取,可靠性较差。MARKENSCOFF 等^[25]验证了考虑摩擦时三指是二维力封闭的充分条件,很多鸟类也是采用三指抓取结构。

1.1 手指设计原理

从简化结构的角度,设计的机器人手爪由 3 根手指组成,手指基本构造与运动原理如图 1 所示。其中杆件 1 为指尖、杆件 2 为指中节、杆件 3 为指根。指尖与指中节可由指根上的滑块带动,杆件 1、杆件 2、杆件 3 与滑块构成滑块摇杆机构,如图 1a 所示。因此滑块可驱动指尖、指中节同时运动形成手指夹取或包络运动。杆件 3 作为指根可以绕关节 2 单独来回摆动,如图 1b 所示,指根采用腱传动方式,指根舵机通过腱传动带动指根收缩动作。

为使手指具有柔性,给杆件 2 处和腱传动增加了弹簧,即拉簧 2 与相关钢丝绳扮演了“腱”,如图 2 所示。指根后部装有拉簧可使指根回位。主动轮顺时针转动,通过腱带动从动轮逆时针转动,杆件 3 进

行收缩动作。主动轮反转,拉簧 3 拉动杆件 3,杆件 3 恢复到初始状态。弹簧的设计保证了手指接触的柔性。

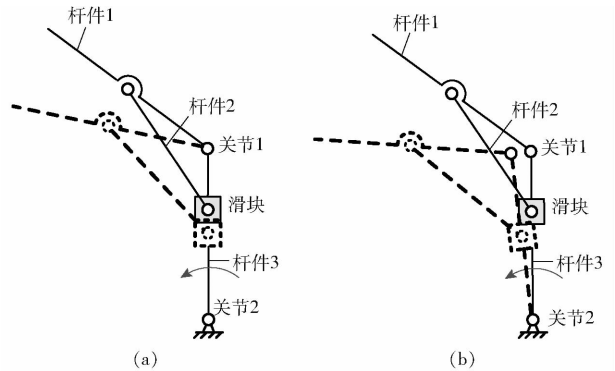


图 1 基于滑块摇杆机构的手指关节运动原理图

Fig. 1 Finger motion principle of the proposed slider and rocker mechanism-based structure

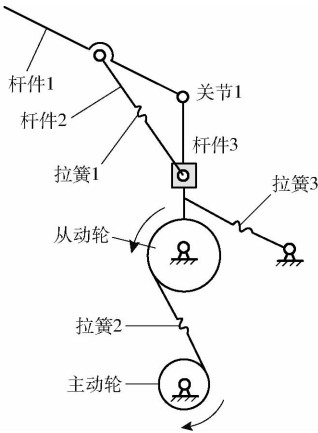


图 2 手指柔性实现原理图

Fig. 2 Flexible principle of the finger

1.2 手指结构

提出的三指机器人手爪采用模块化设计,3 根手指相同,此处以单个手指为例。

根据图 2 中指尖柔性的实现原理,在指中节上设有滑槽,在指中节中布置拉簧。指尖在无外力作用下处于收缩状态;指尖受接触外力时,将使指尖轴在滑槽范围内往左滑动使指尖张开,如图 3 所示。为避免拉簧 1 过硬而减小柔性效果,指尖运动相关的拉簧 1 设计得较软,主要起到使指尖柔和接触目标物的作用,不提供较大的夹紧力。即当指尖接触目标物使得指尖张开时,拉簧 1 拉开,因拉簧 1 较软,指尖凸块易滑至滑槽最远端,指中节才对指尖刚性拉动,提供较大的驱动力。类似人类接触目标物时,由皮肉先软接触目标物,但夹紧还是主要靠骨头的道理,达到刚柔并济的效果。

为增大指中节与被抓物体的接触面积,在指中节上设有扩展板,扩展板也有微小的转动角,使其能够更好适应物体外形。其具体结构如图 3 所示。指

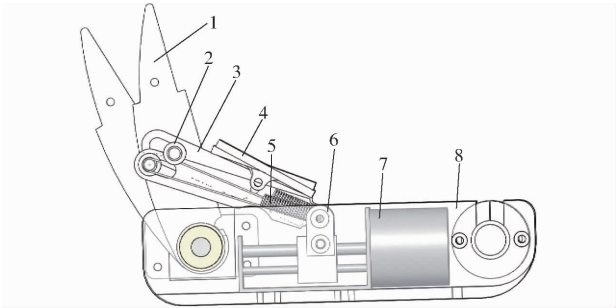


图 3 指尖、指中节结构图

Fig. 3 Fingertip and middle phalange structure

- 1. 指尖 2. 指尖轴 3. 指中节 4. 扩展板 5. 拉簧 1 6. 滑块
- 7. 丝杠电机 8. 指根

尖上装有指尖帽,指尖帽为可拆卸软质材料,可以通过改变指尖帽的形状使其更好适应被抓物体表面。在指根内安装丝杠电机,丝杠上安装滑块,其作用相当于滑块摇杆机构中的滑块,丝杠电机为其提供动力。

为实现图 2 所示的指根腱传动和弹簧柔性驱动,有关结构设计如图 4 所示。设计手指基座,其中舵机通过钢丝绳及拉簧 2 驱动指根运动,钢丝绳与拉簧 2 相当于腱。采用钢丝绳绕在传动轮上能够更好地传递旋转运动,采用拉簧作为驱动结构的一部分,既能够作为吸能和缓冲结构,亦可以防止舵机堵转烧毁。指根与基座采用拉簧 3 为指根提供回复力。舵机正向旋转带动指根收缩,手指进行收拢抓取动作,舵机反向旋转由拉簧 3 提供反向力,指根回复至初始位置。可以通过改变安装距离来改变拉簧 3 预紧力。有关手指完整三维图如图 5 所示。手指尖与指中节都有平的表面可方便粘贴触觉传感器。

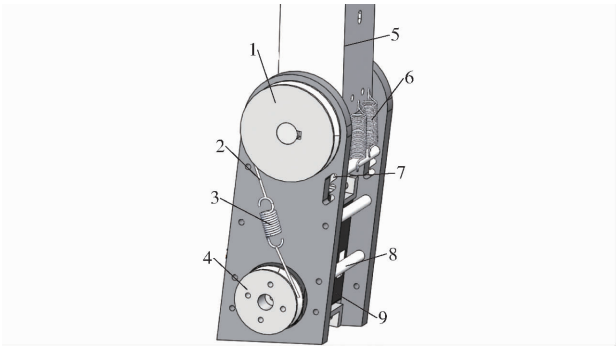


图 4 基座结构图

Fig. 4 Structure of the base

- 1. 从动轮 2. 钢丝绳 3. 拉簧 2 4. 主动轮 5. 指根 6. 拉簧 3
- 7. 安装孔 8. 支撑柱 9. 舵机

手指收缩和释放动作:指根舵机驱动指根,指根收缩;丝杠电机根据被抓物体形状驱动指中节和指尖,手指弯曲;调节指根及指中节、指尖位姿直至与被抓物体形成包络,图 6 为手指收缩动作。松开物

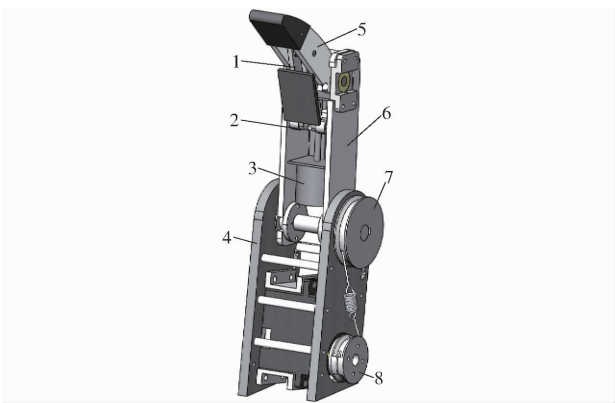


图 5 手指三维图

Fig. 5 3D drawing of a finger

1. 指中节 2. 滑块 3. 丝杠电机 4. 基座 5. 指尖 6. 指根
7. 从动轮 8. 主动轮

体时,指根舵机反转,指根依靠拉簧恢复至初始位置,同时丝杠电机驱动指中节和指尖至初始位置,手指伸展。

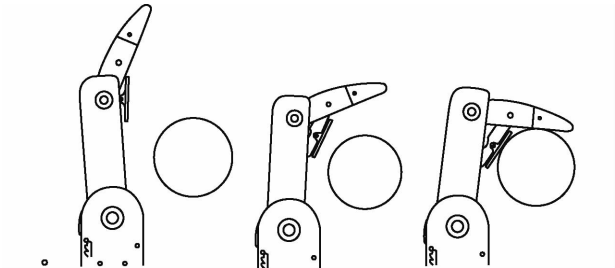


图 6 手指包络目标物的过程

Fig. 6 Process of enveloping an object

2 手爪结构和抓取力

2.1 手爪结构

3 根手指基座与底座呈 10° 角交错安装,一侧 1 根,另一侧 2 根,同侧 2 根同向安装,异侧相向安装,基座上安装手掌,手爪三维图及实物图如图 7 所示。各手指参数见表 1。同时,可以在手掌、指中节扩展板、指间帽上安装触觉传感器用于检测接触力,或者粘贴橡胶垫以增加摩擦力。

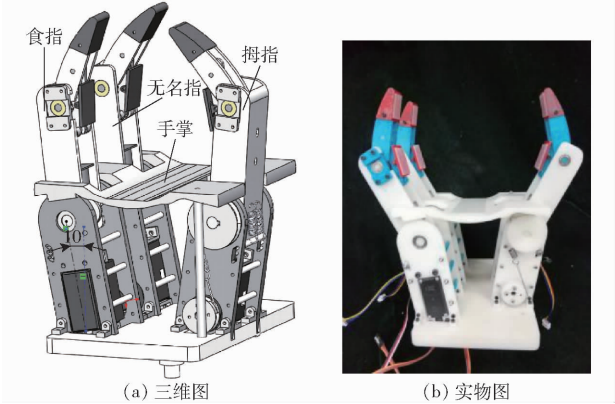


图 7 手爪整体结构图

Fig. 7 Whole structure of the proposed robot hand

表 1 手指参数			
Tab. 1 Parameters of each finger			
名称	关节转角/($^\circ$)	指节长度/mm	手指总长/mm
拇指	0 ~ 90	74.5, 46, 64	138.5
食指	0 ~ 90	74.5, 46, 64	138.5
无名指	0 ~ 90	74.5, 46, 64	138.5

2.2 指端作用力

如图 1 所示,当滑块由丝杠电机驱动时,它将沿杆件 3(指根)向下移动,并拉动杆件 2(指中节)。然后,杆件 1(指尖)由杆件 2 驱动围绕关节 1 旋转。在这一运动中,3 个杆件可以形成包络抓取。

在静态平衡水平条件下进行力学分析,如图 8 所示。首先以滑块为受力对象,丝杠螺母驱动力 F_d 、杆件 3 支撑力 N 和杆件 2 拉力 F_{p1} 满足静态平衡。因此

$$F_{p1} \cos \alpha = F_d \tag{1}$$

关节 1 力矩平衡为

$$F_c a = \frac{1}{2} F_{p2} a \sin \theta \tag{2}$$

式中 F_c ——目标物作用于指端的力,其实质是手指作用于目标物夹紧力的反作用力

F_{p2} ——杆件 2 提供的拉力

α ——杆件 2 与杆件 3 的夹角

θ ——杆件 1 与杆件 2 的夹角

a ——杆件 1 长度

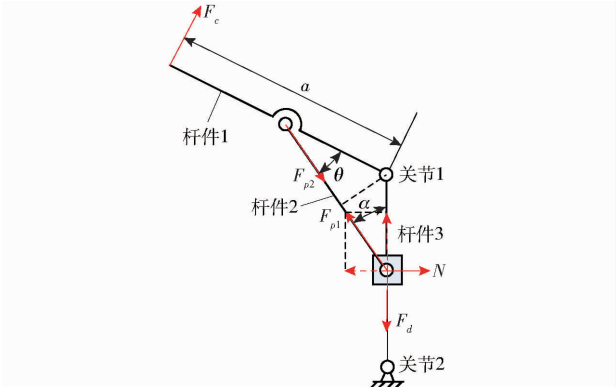


图 8 驱动指尖夹紧物体的滑块摇杆机构力学分析

Fig. 8 Mechanic analysis on the slider and rocker mechanism when clamping an object

为简单起见,杆件 1 和杆件 2 的铰链假定在杆件 1 的中心。 F_{p1} 和 F_{p2} 大小相等方向相反。因此,可得

$$F_c = \frac{1}{2} F_d \frac{\sin \theta}{\cos \alpha} \tag{3}$$

为了得到电机力矩与输出 F_c 的关系,对丝杠进行力学分析。图 9a 显示螺母由丝杠驱动力 F_d 推动或者拉动。图 9b 显示了丝杠的力平衡,其中 F_m 是电机力矩传递的推力, N_n 是螺母阻力, N_m 是电机(或

其他支承部件)支撑力。 N_n 实际上产生的反作用力为螺母提供推力。通过分析可得

$$F_m = N_n \sin \gamma$$

(4)

式中 γ ——丝杠导程角

因

$$F_d = N_n \cos \gamma$$

(5)

可得

$$F_d = \frac{F_m}{\tan \gamma}$$

(6)

因

$$F_m r = T_m$$

(7)

式中 r ——丝杠半径

T_m ——步进电机扭矩

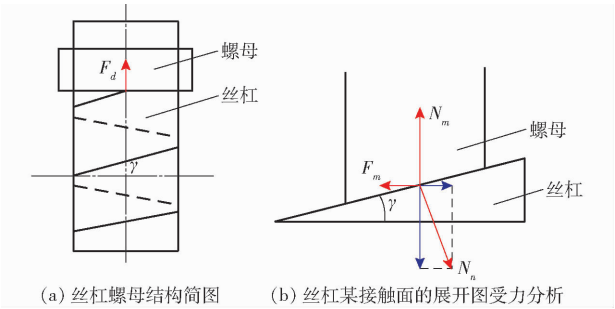


图 9 丝杠及螺母的力学分析

Fig. 9 Mechanic analysis on the screw and the nut

由式(6)、(7)可得

$$F_d = \frac{T_m}{r \tan \gamma}$$

(8)

则

$$F_c = \frac{1}{2} T_m \frac{\sin \theta}{r \tan \gamma \cos \alpha}$$

(9)

由于 r (丝杠半径)和 γ (丝杠导程角)通常很小,因此 F_c 比较大。

小型步进电机只能提供较小的力矩。在本机器人手爪中, T_m 最大只有 $0.17 \text{ N} \cdot \text{m}$, r 为 2 mm , γ 为 5° 左右, θ 通常在 $5^\circ \sim 40^\circ$ 之间, α 通常在 $5^\circ \sim 35^\circ$ 之间。初始接触时, θ 和 α 均较小, 一般在 10° 左右, 所以初始 F_c 约 85.62 N , 设物体与指尖摩擦因数为 0.5 (指尖贴像胶垫), 其最大可产生 42.81 N 的摩擦力。如果按拇指接触摩擦力为物体重量的一半, 手爪可抓起的最大重量为 85.62 N , 即 8.73 kg 。由图 8 可知, 当手指靠近物体时, θ 和 α 变大, 抓紧力增大, 这优于腱传动不能随抓紧而增大夹紧力。由此理论分析可知, 即便电机提供的力矩很小, 理论上仍可以在指端产生很大的作用力。

2.3 指根作用力

为计算指根舵机能提供给末端的作用力, 将指尖、指中节看作刚性杆件, 手指受力如图 10 所示。其中 L_1 为拉簧 3 拉点到指根关节距离; L_2 为指尖抓取位置到指根关节的距离; F_3 为拉簧 3 给指根的牵拉力。 F_2 为由舵机传到拉簧 2 的牵拉力。 M_1 为舵

机扭矩, 可知

$$F_2 = \frac{M_1}{R_1}$$

(10)

从动轮与指根固连, 则关于指根的力矩满足

$$F_c L_2 + F_3 L_1 \sin \beta = F_2 R_2$$

(11)

所以

$$F_c = \left(\frac{M_1}{R_1} R_2 - F_3 L_1 \sin \beta \right) / L_2$$

(12)

式中 R_1 ——主动轮半径

R_2 ——从动轮半径

β ——拉簧 3 与指根的夹角

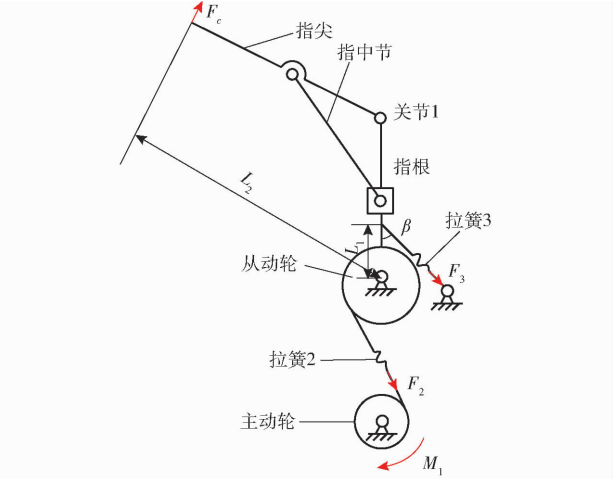


图 10 指根驱动的受力分析

Fig. 10 Mechanic analysis on driving of the proximal phalange

有关参数为: $M_1 = 25 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ($2.45 \text{ N} \cdot \text{m}$)、 $R_1 = 10 \text{ mm}$ 、 $R_2 = 16 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 18 \text{ mm}$ 、 $\beta = 4.8^\circ \sim 20.4^\circ$ 、 $F_3 = 8.8 \sim 15 \text{ N}$ 、 $L_2 = 80.3 \sim 134.3 \text{ mm}$, 因此得 $F_c = 22.24 \sim 45.62 \text{ N}$ 。在手爪完全张开时舵机给其提供的末端作用力 F'_c (即 F_c 的反作用力) 最小, 当手爪收缩时, 因 L_2 与 β 均减小, F'_c 将变大, 因此按式 (12) F'_c 理论上最大可达 45.62 N 。设物体与指尖摩擦因数为 0.5 , 其可产生 22.81 N 的摩擦力。如果按拇指接触摩擦力为物体重量的一半, 舵机可支持的目标物抓起重量最大可达 45.62 N , 即 4.66 kg 。相比之前电机丝杠所能支持的目标物重量略小, 因此本手爪最大目标物的抓取重量主要取决于驱动指根的舵机力矩, 说明本文指尖指中节由滑块摇杆机构实现明显比传统方式易满足所需作用力。事实上为避免力大而损坏零部件, 经测力计测定, 一般让舵机提供的扭矩远小于其最大值 $2.45 \text{ N} \cdot \text{m}$, 因此手指末端 F'_c 一般限制只产生 10 N 以内正压力, 远小于理论值 45.62 N , 所以舵机的功率足够。在指端正压力 10 N 下, 即便让指端摩擦力承受一半的物体重量, 抓取质量仍可达 1.0 kg 。

3 弹簧选取和丝杠设计

拉力弹簧的弹性系数一般受钢丝材质、线径、弹簧直径、圈数等因素影响,计算式为

$$k = \frac{G_R d^4}{8 N_c D_m^3} \tag{13}$$

式中 G_R ——线材刚性模数
 d ——线径,即弹簧丝本身的直径
 D_m ——中径
 N_c ——有效圈数,即总圈数减去 2

提供指尖缓冲的拉簧 1 较软,不主要承受夹紧物体所需要的拉力,情况比较简单。

3.1 拉簧 3 选取

指根处共需要 2 个拉簧,一个用以驱动手指收缩记为拉簧 2,另一个为手指张开提供恢复力记为拉簧 3。为使手指张开只需提供一定的恢复力即可,所以先选定提供恢复力的弹簧。通过实验改变手爪的位姿可知,拉簧 3 至少需满足手指重心与指根旋转中心处于同一水平线时能将其平衡,其受力图如图 11 所示。图中 G 为整个手指重力, L_3 为手指重心到指根旋转重心的距离, δ 为拉簧 3 与杆件 3 (指根)的夹角。达到平衡时,有关系式

$$F_3 \sin \delta L_1 = GL_3 \tag{14}$$

因此
$$F_3 = \frac{GL_3}{L_1 \sin \delta} \tag{15}$$

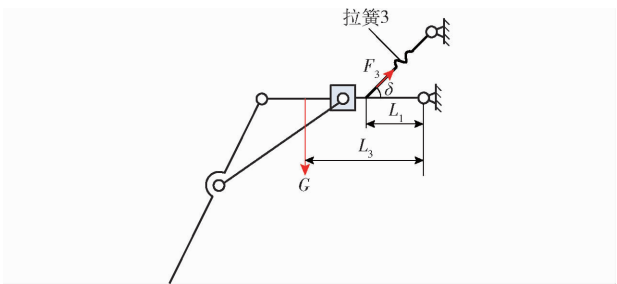


图 11 拉簧 3 受力分析
Fig. 11 Mechanic analysis on spring 3

根据设计的手指重力 G 等参数估算,在图 11 所示位置时, F_3 约为 4.4 N。为充分利用空间,该回位弹簧选择 2 根,还可减小单个弹簧的尺寸。对于每根弹簧作用力为 2.2 N。弹簧的软与硬主要取决于线径,在选择常规 65Mn 碳素弹簧钢丝材质 $G_R = 79\,000\text{ N/mm}^2$ 的情况下,需要计算所需的线径。设计 D_m 为 5 mm, N_c 为 20。指根回位的最小拉伸长度(即复位的预拉伸量) x 约为 3 mm,根据弹簧拉伸弹力式(13)与常见弹性力式 $F = kx$ (x 为弹簧变形量)计算得拉簧 3 的线径 d_3 为 0.65 mm。

3.2 拉簧 2 选取

关于指根驱动弹簧,即拉簧 2,首先至少需满足

克服空载时手指的重量以及弹簧 3 预紧力。手指重心与指根旋转中心处于同一水平线时,拉簧 2 所需拉力最大,其受力如图 12 所示,其中 R_2 为从动轮半径。在空载情况下达到平衡时满足

$$F_2 R_2 = F_3 \sin \delta L_1 + GL_3 \tag{16}$$

因此
$$F_2 = (F_3 L_1 \sin \delta + GL_3) / R_2 \tag{17}$$

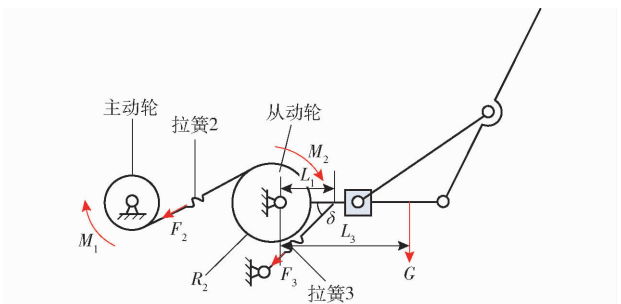


图 12 拉簧 2 受力分析
Fig. 12 Mechanic analysis on spring 2

根据设计的各参数值,由式(17)估算 $F_2 = 6.83\text{ N}$,选择 65Mn 碳素弹簧钢丝, $G_R = 79\,000\text{ N/mm}^2$,设计预拉伸量 2 mm 以内, D_m 为 5 mm, N_c 为 8,则拉簧 2 线径根据式(13)得 $d_2 = 0.767\text{ mm}$ 。

拉簧 2 需要克服弹簧 3 的拉力,驱动指根旋转使手指端夹紧目标物。根据式(10),其应满足指根舵机最大扭矩时所承受的拉力。但实际考虑安全系数(否则易产生损坏),指尖接触正压力 F'_c 一般限制在 10 N 以下,因此经式(11)估算, F_2 最大输出力允许约 80 N,拉簧 2 拉伸长度最大允许约 7 mm(受空间所限),选取 D_m 为 5 mm, N_c 为 8, $G_R = 79\,000\text{ N/mm}^2$,根据式(13),得 $d_2 = 1.03\text{ mm}$ 。该值是已考虑安全系数下得到,通常并不会频繁达到所限作用力的最大值,出于柔性考虑,拉簧 2 在基本满足最大力的条件下不宜太硬,因此拉簧 2 线径最终选择 1 mm, D_m 为 5.2 mm。

最终制作的拉簧 2 与拉簧 3 在指根处的布局如图 13 所示,图 13 对应图 5 的指根与基座布局。

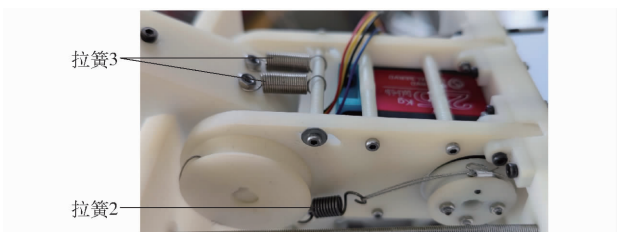


图 13 指根处的拉簧布局
Fig. 13 Configuration of springs for the proximal phalange

3.3 弹簧提供的指端作用力

由选取弹簧以及式(13)可得拉簧 3 弹性系数 $k_3 = 0.705\text{ N/mm}$,拉簧 2 弹性系数 $k_2 = 9.875\text{ N/mm}$ 。

根据式(11)以及力与弹性系数关系式 $F = kx$,可得指尖末端所受作用力为

$$F_c = \frac{k_2 x_2 R_2 - k_3 x_3 L_1 \sin \beta}{L_2} \quad (18)$$

当手爪收紧时,将在指末端产生最大作用力。根据之前配置的参数, $R_2 = 16\text{ mm}$, $L_1 = 18\text{ mm}$,取 $x_2 = 7\text{ mm}$, $x_3 = 15\text{ mm}$, $\beta = 4.8^\circ$, $L_2 = 80.3\text{ mm}$,得 $F_c = 13.57\text{ N}$ 。即有关弹簧能满足所限制的最大 10 N 的要求。

3.4 丝杠设计

本文的滑块摇杆机构,驱动源为滑块,由带丝杠的电机驱动。由于手指尺寸不能太大,滑块行程受限,设计时需要考虑丝杠应尽量短,以及滑块、丝杠与指尖、指中节等部件的结构关系。

如图 14 所示, L_5 为滑块运动距离; L_4 为滑块远端极限位置与关节 1 的距离,一般取可安装最小距离; c 为指中节长度; b 为指中节与指尖联接处到指尖旋转关节的距离; $\varphi_{\max}$ 为指尖与指根的最大夹角; $\varphi_{\min}$ 为最小夹角。由图 14 所示的结构关系可得

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{L_4^2 + b^2 - c^2}{2L_4 b} \quad (19)$$

$$\cos \varphi_{\min} = \frac{(L_5 + L_4)^2 + b^2 - c^2}{2b(L_5 + L_4)} \quad (20)$$

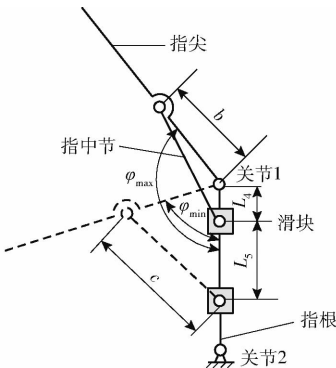


图 14 滑块运动行程分析

Fig. 14 Motion distance analysis on the slider

根据被抓物的尺寸以及手爪所需运动范围,取 c 为 46 mm , b 为 25 mm , $\varphi_{\max} - \varphi_{\min} = 90^\circ$,得到

$$\arccos \frac{L_4^2 + b^2 - c^2}{2L_4 b} - \arccos \frac{(L_5 + L_4)^2 + b^2 - c^2}{2b(L_5 + L_4)} = 90^\circ \quad (21)$$

因此可以得到 L_4 和 L_5 的关系,其中 L_4 选定为电机丝杠可安装的最小距离约为 14 mm ,选择丝杠滑块运动距离 L_5 为 22 mm ,图 15 为电机丝杠尺寸图与安装图。

4 抓取实验

4.1 日常物品抓取实验

设计制作的手爪可以完成 3 种典型抓取,分别是精细抓取、平行夹取、包络抓取,如图 16 所示。其

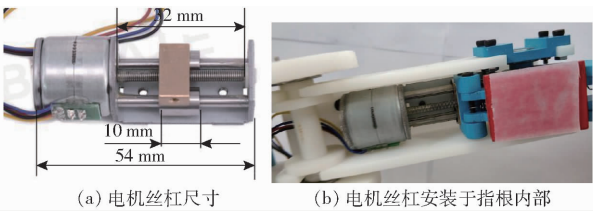


图 15 电机丝杠

Fig. 15 Motor screw

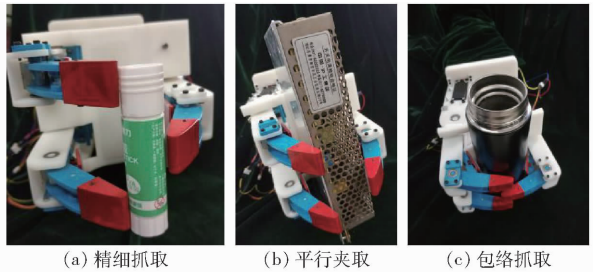


图 16 常见的抓取模式

Fig. 16 Common grasping patterns

中精细抓取只有指尖夹紧目标物;平行夹取除指尖还有指中节夹紧目标物;包络抓取则指尖、指中节、手掌都接触目标物。包络抓取的过程一般为:手掌先接触目标物,然后手指开始弯曲,指根再接触目标物,然后指中节和指尖紧贴目标物,抓取力达到阈值时抓起目标物。由于目标物和手爪紧密接触,接触面积也较大,所以抓取稳定。

除了对形状规则的物体进行抓取实验,还对生活中一些常见的物体进行抓取,如图 17 所示,表明本文设计手爪的抓取功能较实用。

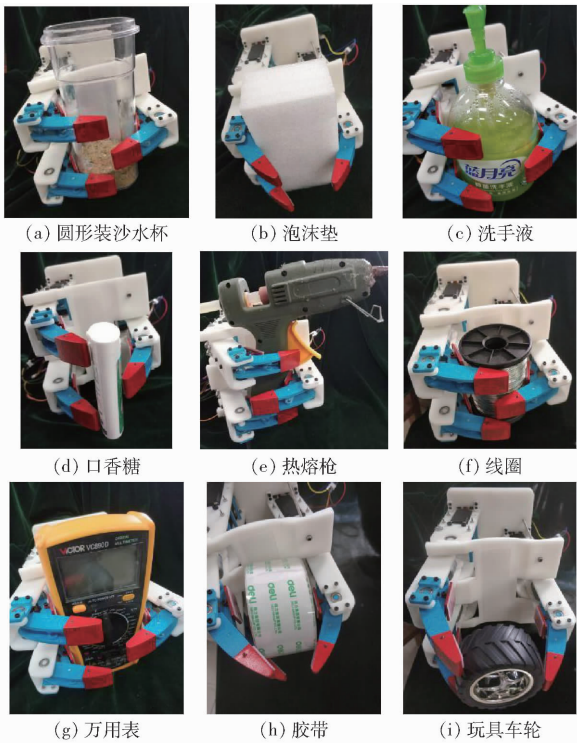


图 17 常见物品抓取

Fig. 17 Grasping common objects

4.2 抓取目标物质量测试

为了测试本文设计的机器人手爪抓取力,与钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪^[15]进行抓取目标物质量的比较。精细抓取的目标物为方形杯子,包络抓取的目标物为圆柱形杯子。采用往杯子里加沙子的方法,逐渐加大目标物质量,如图 18 所示。两个手爪手指尖均贴有摩擦因数为 0.5 的橡胶。得到精细抓取方形杯子质量对比如表 2 所示,包络抓取圆柱形杯子质量对比如表 3 所示。表中“是”表示某质量手爪能够抓取,“否”表示某质量手爪不能够抓取。从表 2、3 可以发现,精细抓取方形杯子时,本小组前期设计的钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪抓取的方杯质量加到 300 g 即发生滑落;而本文手爪直至 630 g 才发生滑落,最大能抓起 620 g 左右的质量。采用包络抓取时钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪在杯子超过 530 g 便已不能抓取,而本文的手爪最大能够抓起 1 710 g 左右,直至 1 750 g 才不能抓

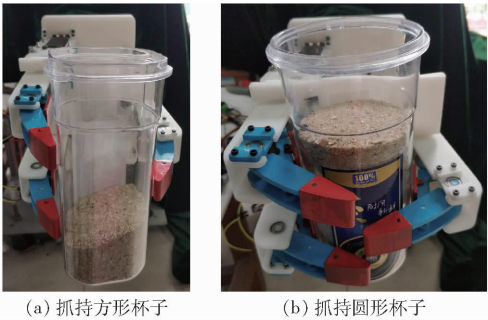


图 18 抓取目标物质量测试

Fig. 18 Object weight test for robot grasping

取。该质量甚至超过了第 3 部分末尾所估算的理论最大 1 kg 的抓取质量,这是因为包络抓取有更多接触点参与,还包括接触面大、承受力更大的手掌参与,这与人手在有手掌参与的情况下,抓取能力更强是一致的。由此可以判定本文设计的手爪相比于钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪抓取能力有明显的提高,较大的抓取力保证了本文手爪的实用性。

表 2 2 种手爪精细抓取的杯子质量比较

Tab.2 Mass comparison of cup for envelop grasping of two different robot hands

手爪类型	目标物质量/g												
	100	200	250	280	300	350	400	500	550	600	610	620	630
钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪	是	是	是	是	否	否	否	否	否	否	否	否	否
本文机器人手爪	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	否

表 3 2 种手爪包络抓取的杯子质量比较

Tab.3 Mass comparison of cup for envelop grasping of two different robot hands

手爪类型	目标物质量/g														
	200	400	450	500	530	550	600	800	1 000	1 300	1 600	1 700	1 710	1 750	
钢丝绳耦合欠驱动式机器人手爪	是	是	是	是	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	
本文机器人手爪	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	否	

4.3 手指末端接触柔性测试

设计的机器人手指旨在与目标物柔性接触,手指端正压力 F_c 与控制指根舵机运动角之间的关系如图 19 所示。由图 19 可知,第一阶段是拉簧 1 变形,其主要承担缓冲和轻微接触力。当图 3 中的指尖轴到达左边极限位置后,指中节与指尖是刚性接触,拉簧 2 主要传递驱动力,所需弹簧力加大,即图 19 中第 1 个拐点之后。该阶段斜率升高,刚性有所增强,但仍然能够在舵机发生较多角位移时才发生力的较大变化,显示一定柔性。初步证明了本文设计的手爪具有良好的柔性。

为了进一步验证本文设计手爪的柔性,选取易变形或损坏的典型目标物如桔子、香蕉以及鸡蛋进行抓取损伤测试,在能抓持的情况下测试有无损伤、表面凹陷或出现裂纹情况。对于较小的采用精细抓取,对于较大的采用包络抓取,如图 20 所示;香蕉仅

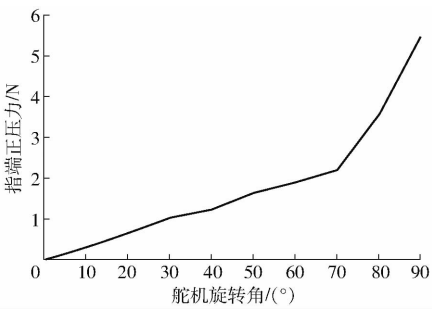


图 19 指端正压力与指根舵机旋转角关系曲线

Fig. 19 Relationship between the normal force of fingertip and the rotational angle of servo motor of proximal phalange

采取精细抓取,如图 21 所示,鸡蛋也仅采用精细抓取模式,如图 22 所示;表 4 ~ 6 分别显示某个桔子、香蕉、鸡蛋被单次抓起表面是否损伤、是否凹陷或出现裂纹的测试结果。表 7 为每种目标物 20 次被抓起时表面发生状况的最终综合结果。其中某目标物若能够采取精细抓取与包络抓取两种模式,则两种

抓取模式都测试 5 次。若某个目标物只能采用一种抓取模式,则只测试 5 次,所以完成 20 次测试每个品种有的需要 4 个不同目标物。

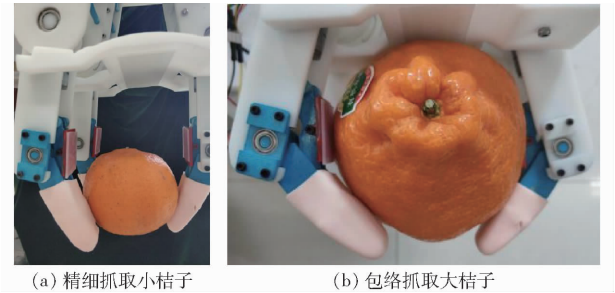


图 20 抓取桔子损伤测试

Fig. 20 Destruction test of grasping an orange

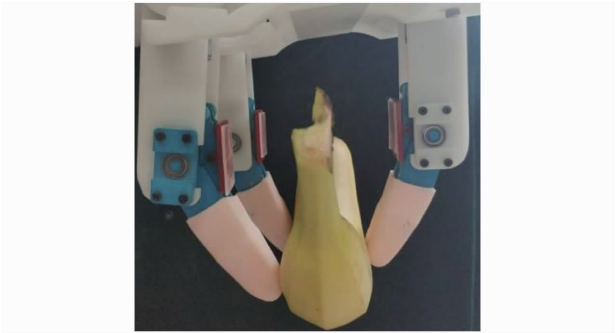


Fig. 21 Destruction test of grasping a banana

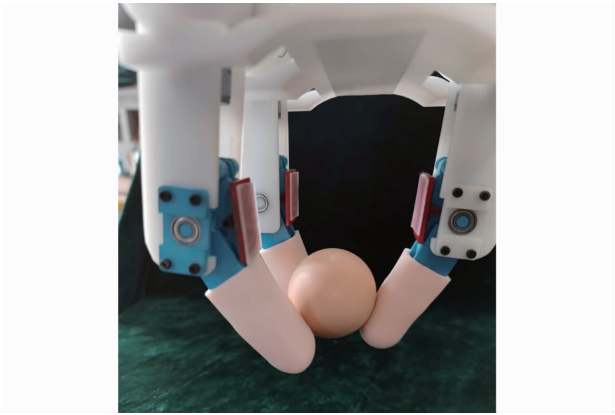


Fig. 22 Destruction test of grasping an egg

表 4 抓取桔子损伤测试结果

Tab. 4 Results of destruction tests of grasping an orange

桔子直径/ mm	桔子质量 /g	抓取模式	损伤情况	表面凹陷 情况
63. 34	115	精细抓取	无损伤	无凹陷
80. 40	165	精细抓取	无损伤	无凹陷
97. 10	288	包络抓取	无损伤	轻微凹陷

从前述测试可知,本文设计的手爪对这些目标物并无损伤,对表面较软且质量较大的水果才有轻微凹陷现象,鸡蛋没有产生压裂现象,说明该手爪的

表 5 抓取香蕉损伤测试结果

Tab. 5 Results of destruction tests of grasping a banana

香蕉直径 /mm	香蕉质量 /g	抓取模式	损伤情况	表面凹陷 情况
30. 12	81	精细抓取	无损伤	无凹陷
39. 30	101	精细抓取	无损伤	无凹陷
48. 42	132	精细抓取	无损伤	轻微凹陷

表 6 抓取鸡蛋损伤测试结果

Tab. 6 Results of destruction tests of grasping an egg

鸡蛋长轴 长度/mm	鸡蛋质量 /g	抓取模式	损伤情况	表面裂纹 情况
56. 1	52	精细抓取	无损伤	无裂纹
62. 5	66	精细抓取	无损伤	无裂纹

表 7 抓取目标物损伤测试综合统计结果

Tab. 7 Statistic results of destruction tests
of grasping a fruit

目标物	抓取次数	损伤次数	表面发生轻微凹陷 或裂纹次数
桔子	20	0	6
香蕉	20	0	4
鸡蛋	20	0	0

柔性抓取性能良好。

5 结论

(1)设计了一种基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪,手爪每根手指的指尖、指中节由滑块摇杆机构带动,结构简单、易实现。通过理论分析可知,即使驱动指尖的电机力矩很小,指端仍可以产生较大的作用力,超过了指根驱动舵机通过腱传动提供给指端的作用力。因此,该结构驱动能力得以增强,其结构也更为简单。手爪指根采用腱传动方式,保证了足够的指根驱动力。

(2)为避免手指与目标物的刚性接触,手指尖、指根的运动均通过弹簧来实现手爪的柔性。指尖驱动弹簧设计得比较软,主要夹紧力仍由刚性元件提供;指根腱传动采用较硬的弹簧来传递舵机扭力,保证了足够的作用力。

(3)通过多组实验证明本文设计的手爪能够完成常见的精细抓取、平行夹取和包络抓取动作;能抓取较多日常物品;通过抓取质量测试实验证明,设计的手爪的抓取力比本课题组以往设计有了很大的提高,最大抓取质量达 1. 71 kg(手指的橡胶与杯子间摩擦因数 0. 5);通过测试指端正压力与舵机旋转角的关系以及抓取典型目标物的损伤,证明本文设计的手爪具有良好的柔性。

参 考 文 献

- [1] MARTIN J, GROSSARD M. Design of a fully modular and backdrivable dexterous hand[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(5): 783–798.
- [2] PALLI G, MELCHIORRI C, VASSURA G, et al. The DEXMART hand: mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(5): 799–824.
- [3] BUTTERFASS J, GREBENSTEIN M, LIU H, et al. DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001: 109–114.
- [4] HONG L, WU K, MEUSEL P, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: the DLR/HIT Hand II [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2008: 3692–3697.
- [5] WOOD E, TAYLOR J, FOGART J, et al. Shadow hands: high-fidelity remote hand gesture visualization using a hand tracker [C]//Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, 2016: 77–84.
- [6] 刘菲,何广平,陆震.弹性欠驱动四指灵巧手设计与试验[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(15): 53–59.
- LIU Fei, HE Guangping, LU Zhen. Research and design of a novel tendon driven underactuated multi-fingered hand[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(15): 53–59. (in Chinese)
- [7] XIONG C H, CHEN W R, SUN B Y, et al. Design and implementation of an anthropomorphic hand for replicating human grasping functions[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(3): 652–671.
- [8] XIA Ziwei, YUAN Jiahui, FANG Bin. A tendon-driven robotic dexterous hand design for grasping [C]//Conference on Communications in Computer and Information Science, Singapore(ICCSIP), 2019: 432–444.
- [9] DEVARAJA R R, MASKELIŪNAS R, DAMAŠEVICIUS R. AISRA: anthropomorphic robotic hand for small-scale industrial applications[C]//International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA), 2020: 746–759.
- [10] PELLICCIA L, SCHUMANN M, DUDCZIG M, et al. Implementation of tactile sensors on a 3-fingers Robotiq adaptive gripper and visualization in VR using Arduino controller[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 67: 250–255.
- [11] DU Y C, TARYUDI T, TSAI C T, et al. Eye-to-hand robotic tracking and grabbing based on binocular vision [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27: 1699–1710.
- [12] 杨光照.变约束连杆机构机械手的设计研究[D]. 无锡:江南大学,2016:11–24.
- YANG Guangzhao. Design and study on flexible constraint linking mechanism robotic gripper[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 11–24. (in Chinese)
- [13] 高瑞祺.一种双连杆混合传动的机器人手指设计[J]. *现代制造技术与装备*, 2018(12): 58–59, 6.
- GAO Ruiqi. Design of a two link hybrid transmission robot finger[J]. *Modern Manufacturing Technology and Instruments*, 2018(12): 58–59, 6. (in Chinese)
- [14] SAINUL I A, DEB S, DEB A K. A three finger tendon driven robotic hand design and its kinematics mode [C]//Proceedings of the 28th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016: 313–321.
- [15] 张磊,孙斌,李红兵,等.一种具备多种抓取模式的三指机械手[J]. *现代制造工程*, 2019(12): 49–54.
- ZHANG Lei, SUN Bin, LI Hongbing, et al. A simplified robot dexterous hand with multiple grasping modes [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(12): 49–54. (in Chinese)
- [16] MAHANTA G B, ROUT A, DEEPAK B, et al. Conceptual design and analysis of three jaw robotic gripper with flexural joints [C]//Innovative Product Design and Intelligent Manufacturing Systems, 2020: 1035–1042.
- [17] 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/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 30–43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210203&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.003. (in Chinese)
- [18] 姜凯,陈立平,张骞,等.蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 63–71.
- JIANG Kai, CHEN Liping, ZHANG Qian, et al. Design and experiment on flexible clamping and conveying mechanism of vegetable grafting robot[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2): 63–71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s208&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.008. (in Chinese)
- [19] LEE Kiju, WANG Yanzhou, ZHENG Chuanqi. Twister hand: underactuated robotic gripper inspired by origami twisted tower [J]. *IEEE Transactions On Robotics*, 2020, 36(2): 488–500.
- [20] VENKATESA P D, MEENASKHI P B, PRIYANKA E B. Design fabrication and control of soft robotic gripper for material handling[C]//Conference on Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021: 913–925.
- [21] LI Changsheng, GU Xiaoyi, XIAO Xiao, et al. Transcend anthropomorphic robotic grasping with modular antagonistic mechanisms and adhesive soft modulations[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2463–2470.
- [22] ZHOU Jianshu, CHEN Xiaojiao, LI Jing, et al. A soft robotic approach to robust and dexterous grasping [C]//IEEE International Conference on Soft Robotics, 2018: 412–417.
- [23] KIM Y J, SONG H, MAENG C Y. Blt gripper: an adaptive gripper with active transition capability between precise pinch and compliant grasp[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 5518–5525.
- [24] 孟彩茹,张高青,李夏楠,等.夹持机械手爪机构的设计与优化[J]. *机械设计与制造*, 2016(6): 70–74.
- MENG Cairu, ZHANG Gaoqing, LI Xianan, et al. Design and optimization on clamping gripper mechanism[J]. *Machine Design and Manufacturing*, 2016(6): 70–74. (in Chinese)
- [25] MARKENSCOFF X, NI L Q, PAPADIMITRIOU C H. The geometry of grasping [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 9(1): 61–74.