DOI: 10.3901/JME.2020.03.047

手指关节可独立控制的欠驱动灵巧手*

刘今越^{1,2} 赵睿^{1,2,3} 贾晓辉^{1,2} 郭士杰^{1,2} 武晓峰³ 顾建军³

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130;

2. 河北工业大学河北省机器人感知与人机融合重点实验室 天津 300130;

3. 上海航天控制技术研究所 上海 201109)

摘要: 为了实现对物体的精准抓取, 针对欠驱动灵巧手指关节转动不可控问题提出一种新颖的关节可锁紧的单腱欠驱动灵巧手的设计方案, 完成了灵巧手关节锁紧机构和指间耦合机构的结构设计, 并运用 Matlab 对灵巧手指工作空间进行仿真。对关节锁紧机构和指间耦合机构动作起到关键作用的耦合弹簧和复位弹簧进行了设计, 对影响关节驱动力矩的参数优化分析, 得到优化后的手指传动机构和腱绳张紧机构。通过灵巧手样机对不同形状、大小物体的抓握试验, 证明本欠驱动灵巧手可实现手指关节锁紧的动作, 具有良好的包络抓握能力和较强的精确抓取能力。

关键词: 欠驱动; 精确抓取; 关节锁紧; 灵巧手; 优化设计

中图分类号: TP23

Underactuated Dexterous Hand with Independent Control of Finger Joint

LIU Jinyue^{1,2} ZHAO Rui^{1,2,3} JIA Xiaohui^{1,2} GUO Shijie^{1,2} WU Xiaofeng³ GU Jianjun³

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. Key Laboratory of Robotic Perception and Human-Machine Integration in Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

3. Shanghai Institute of Aerospace Control Technology, Shanghai 201109)

Abstract: In order to achieve accurate grasping of objects, a novel joint-lockable single-turn under-actuated dexterous hand was designed for the uncontrollable problem of under-actuated dexterous hand joint movement. The structural designs of the joint locking mechanism and the inter-finger coupling mechanism were completed, and the working space of the dexterous finger were analyzed with Matlab. The coupling spring and the return spring, which play a key role in the joint locking mechanism and the inter-finger coupling mechanism, were designed to optimize the parameters affecting the joint driving torque, and the optimized finger transmission mechanism and the reel tensioning mechanism are obtained. The trials to grip different shapes and sizes objects by the dexterous hand prototype were carried out to validate the abilities of locking the finger joints, the envelope grasping and the precision grasping.

Key words: underactuation; precise grasp; joint locking; dexterous hand; optimal design

0 前言

人手是大自然创造出的最完美的工具, 在仿生机器人领域, 仿生灵巧手是一个很有价值的研究领域。其与传统机器人末端夹持器相比, 具有多个多关节手指, 能够和人手一样具有很高的灵巧性、通用性和适应性, 能够适应多种抓取和操作任务, 随

着灵巧手应用领域的扩大, 已逐渐能够替代人手完成一些复杂的任务, 具有重大的社会应用价值^[1]。当前具有拟人特征的灵巧手多采用全驱动形式, 如 Shadow Dexterous Hand^[2]、Robonaut 2^[3]等, 虽然能完成物体抓取和一些特定的操作任务, 但成本高昂且控制系统复杂, 很难得到广泛应用。而欠驱动灵巧手结构相对简单、驱动单元少、成本低廉、控制简单, 因此在灵巧手领域应用更为广泛, 但是由于驱动单元个数低于机构自由度个数, 传统欠驱动灵巧手指不能独立控制各关节转动, 物体抓取过程中手指位姿不确定, 因此只能完成对物体的简单包

* 国家重点研发计划(2017YFB1301002)、河北省自然科学基金(E2017202270)和河北省教育厅重点项目(ZD2018246)资助项目。
20190530 收到初稿, 20190925 收到修改稿

络抓握^[4],即在驱动机构牵引下,灵巧手各手指指节和手掌与物体表面产生自适应接触从而将物体包络起来,而并不能实现对物体的精确抓取^[5],因此抓取适应性差、对形状复杂的物体抓取稳定性差。通常来讲,精确抓取包括指尖捏取、指腹对捏、侧捏等几种抓取方式^[6]。与包络抓握不同的是,精确抓取时物体与手指的接触区域不同,接触面积变小,因而机器人灵巧手在进行精确抓取时难度更高,对抓取的稳定程度要求更严格。

为了改善灵巧手精确抓取能力,从灵巧手的机构及传动设计出发,通过对手指结构的创新,设计了一种腱绳传动、手指关节转角可控的新型欠驱动灵巧手,并对其关键参数进行了设计和优化。该灵巧手不仅可以很好完成基本包络抓取,还可以完成较复杂的指尖抓取,具有结构简单、控制方便、抓取过程可控等特点。

1 灵巧手机构及传动设计

1.1 灵巧手构型设计

本灵巧手为一种五指灵巧手,其结构如图1所示,每根手指均有三个转动自由度分别对应三个关节,整手共五根手指,15个自由度。

图1 灵巧手结构简图

1.2 灵巧手传动方案设计

本灵巧手采用腱绳-滑轮传动形式,滑轮布置在两指节关节处,腱绳一端与指尖固连,另一端依次按规律穿过各滑轮,最后与驱动电动机连接以提供拉力。在各关节靠近手背位置开有小孔,弹性绳从中穿过提供手指复位所需的恢复力。

图2为本灵巧手的单指传动方案设计,各参数含义如下: T 为腱绳张力; R_i 为各关节滑轮半径; m_i 为各指节质量; l_i 为各指节长度; d_i 为各指节重心相对各关节的距离; θ_i 为各指节的相对转角。

为了方便手指的空间布置,在保证运动灵活性又不使结构因自由度过多而复杂化的前提下,本灵巧手基关节位置未设置侧摆自由度,虽然在仿人性

图2 灵巧手单指传动设计方案

上有所下降,但并未影响其抓取功能的实现;此外在拇指的设计上也进行了简化,人类的拇指共有三个关节,五个自由度,拇指对人手功能的实现是至关重要的^[7],但考虑到本研究的重点并不是拇指的构型,故将其自由度简化为三个,其中为了使拇指的运动规律尽可能与人手拇指运动规律相近,令拇指基关节与手掌夹角约为 50° ,与人手相似,拇指基关节轴线与其余两关节轴线成空间异面直线。

2 灵巧手结构

2.1 食指整体结构

经上述简化,灵巧手各手指的弯曲运动均可视为具有三个转动自由度的开链连杆平面运动,除拇指之外,其他四指(食指、中指、无名指、小指)的手指构型一致,另外,为了实现设计的模块化和互换性,令此四指各部分结构参数亦分别相同,下文以食指的机构设计为例进行说明,图3为食指结构示意图。

图3 食指结构图

本灵巧手的核心特点是具有一种关节锁紧机构使指节转到目标角度时可以停止指节间的相对转动达到锁死的效果, 基于这样的设计本灵巧手可完成相对复杂的指尖抓取; 此外, 生物学研究发现, 人手手指远指关节和近指关节进行屈曲运动的过程中两关节转角之间的比例近似 1:1^[8], 根据这一特点, 在远指关节和近指关节处添加耦合滑轮, 两个耦合滑轮通过耦合腱绳连接, 使两关节在非锁死状态下保持耦合运动关系。

2.2 食指关节锁紧机构及耦合机构

食指三个关节均设置相同的关节锁紧机构, 其工作原理类似于滑键, 因掌指关节没有耦合运动关系, 构件较少, 故以掌指关节为例说明锁紧机构的工作原理, 其爆炸图如图 4 所示。

图 4 关节锁紧机构

其具体装配关系为: 关节轴与滑轮为一体式结构称为关节滑轮, 铁芯镶嵌在关节滑轮右端的凹槽内, 复位弹簧设置于同一侧的环形槽内, 电磁吸盘位于复位弹簧右侧, 通过螺钉与近关节连接; 关节锁紧轮位于关节滑轮左侧末端, 两者通过螺钉相连。

其工作原理与过程为: 关节滑轮左端同时穿过近指节和掌指节, 并与掌指节通过键连接, 由于掌指节固定不转动, 故关节滑轮只能左右滑动; 在复位弹簧的作用下, 关节滑轮移至最左侧, 关节锁紧轮与近指节之间存在间隙, 近指节和掌指节可相对转动; 当近指节相对于掌指节转过一定角度后电磁吸盘通电, 吸引铁芯带动关节滑轮向其移动, 锁紧轮轮齿与近指节所开齿槽啮合, 近指节与掌指节无法继续相对转动, 关节锁紧。图 5 为关节锁紧前后的变化情况。

目前, 实现关节耦合运动的方式主要有三种: “∞”字形腱绳耦合^[9]、四连杆机构耦合以及槽型耦合机构。其中“∞”字型腱绳耦合方式将两根交叉腱的四个固定点分别固定于远指节和近指节, 多用于远指关节和近指关节存在耦合运动关系的情况, 并未涉及中指节运动耦合问题。而四连杆机构耦合

图 5 关节锁紧工作过程

方式不仅在布置时受手指外形尺寸限制而且四杆机构本身存在死点位置, 在该位置附近机构运动具有不确定性, 这在灵巧手手指的运动中是不允许的。相较于前两种机构, 本灵巧手所采用的槽型耦合传动机构中, 两根腱绳的固定点均分别设置在两个关节耦合滑轮上, 在需要进行耦合传动时, 耦合滑轮通过轮齿啮合与关节轴结合在一起同步转动; 当需要解耦时, 耦合滑轮与关节轴相互分离, 形成一种可解耦的关节耦合传动方式, 如图 6 所示。

图 6 槽型耦合传动

由图 6 可知, 两根耦合腱绳绕过第一、二关节的耦合轮 W_1 、 W_2 将两个关节耦合, 第一关节与第二关节的传动比 i 为

$$i = \frac{R'}{R} \quad (1)$$

式中, R' 为耦合轮 W_2 的半径(mm); R 为耦合轮 W_1 的半径(mm)。为保证传动比 $i=1:1$, 令: $R=R'$ 。

之所以将耦合腱绳的固定点均设置在关节耦合滑轮上, 是因为当手指未接触到物体时, 手指三个关节在腱绳的牵引下做屈曲运动, 此时远指关节与近指关节保持耦合运动关系; 当手指与物体接触, 远指关节与近指关节同时或其中一个关节需要锁紧, 此时应将耦合关系断开, 否则会发生功能上的冲突。据此, 设计了一种巧妙的可解耦的指间耦合机构, 其工作过程如图 7 所示。

图7 耦合与耦合关系解除

关节未锁紧时(图7a),受右侧弹簧作用,耦合轮右端的轮齿与滑轮轴左端的轮齿相互压紧,发生啮合,左侧弹簧被压紧,两关节产生耦合运动关系;当电磁吸盘通电吸引滑轮轴右移关节锁紧时(图7b),被压缩的左侧弹簧放松,耦合轮与滑轮轴之间产生间隙,二者轮齿脱离啮合,两关节间的耦合关系解除。

此外,因本灵巧手中的滑轮轴可左右滑移,腱绳亦随之移动,故分别在食指中指节和近指节内侧的适当位置设置腱绳松紧调节装置,如图8所示。所述电磁吸盘实物如图9所示。

图8 腱绳松紧调节装置

图9 电磁吸盘实物

手指工作空间仿真可以直观地表征灵巧手手指运动能力^[10-11]。因此,完成单根手指结构设计后,采用蒙特卡洛方法^[12]对食指工作空间进行分析。

在已知各指节长度的前提下,以各关节转角 $\theta_i(i=1, 2, 3)$ 为变量,在 θ_i 取值范围 $(0 \sim \pi/2)$ 内对其随机取一组值,则指尖参考点对应一个随机空间位置,通过取多组 θ_i 值得到指尖参考点全部随机位置组成的点云空间^[13]即为手指的工作空间。利用 Matlab 软件结合手指正运动学方程,随机生成 50000 组 θ_i 值,仿真出了食指工作空间如图10所示。

(a) Oyz 平面

(b) Oxyz 三维空间

图10 食指工作空间

2.3 拇指整体结构

在抓取和操作任务中拇指的作用不可替代,人手能实现的绝大部分功能都有拇指的参与,如精确抓取、捏拿、包络抓取等。

拇指比其他四指更加灵活,自由度个数更多,设计较为困难。根据人手生理学研究结果,将拇指掌指关节转动自由度的回转轴线设计为近似竖直位置,与其余竖直方向布置的四指呈一定夹角,同时考虑人手拇指的对掌运动^[14],设计拇指近指关节轴线与掌指关节轴线呈空间异面直线,两者夹角^[15]为 35° ,这样可以尽可能地模拟人手的对掌运动,在简化拇指设计的同时又不失拇指的拟人性,最后远指关节轴线和近指关节轴线平行,这样就完成了对拇指自由度在空间上的布置。

拇指驱动传动方式和其余四指相同,考虑拇指的中指节和远指节并无耦合运动关系,故在拇指远指关节和近指关节处不设置耦合传动机构。

具体拇指结构形式上,在远指关节和近指关节处添加关节锁紧机构;掌指关节处不设置关节锁紧机构,一方面是因为当拇指与物体接触时,若远指关节和近指关节的转角确定,掌指关节的转角也可以确定下来,所以拇指掌指关节的转动只是为抓取物体提供夹紧力;另一方面则是与掌指关节自由度在空间上的特殊布局有关,即其回转轴线与竖直方向有一定的夹角,若布置关节锁紧机构难度较大,且因元件重力影响易使机构动作灵活性和准确度降低。根据以上考虑,设计的拇指三维结构如图11所示。

图11 拇指三维结构图

同理，用分析食指工作空间的方法分析拇指工作空间，随机生成 50000 组关节角度 θ_i ，得到的拇指工作空间如图 12 所示。

图 12 拇指工作空间仿真

2.4 灵巧手的整体结构

与人手相似，该机器人灵巧手设计 5 根手指，共使用 5 个电动机作为驱动源。各手指尺寸参考人手手指长度特征设计；为了方便模块化设计和满足互换性要求，设计食指、中指、无名指、小指四指结构相同；所有手指均安装在手掌上，手掌及驱动电动机安装在手臂上，集成化程度较高。

表 1 给出各手指参数。在各指节设置 FSR400 型压力传感器，检测抓握力大小。灵巧手样机如图 13 所示。

表 1 手指参数

名称	指节长度/mm	手指总长/mm	各关节转角/(°)
食指	31.5, 33.0, 49.5	114	0~90
中指	31.5, 33.0, 49.5	114	0~90
无名指	31.5, 33.0, 49.5	114	0~90
小指	31.5, 33.0, 49.5	114	0~90
拇指	37.5, 50.0, 23.5	111	0~90

图 13 灵巧手样机

3 欠驱动灵巧手关键参数分析

3.1 弹簧参数分析

手指关节锁紧和指节耦合运动功能的实现主要依靠电磁吸盘吸引力和左右两侧弹簧的弹性复位力，所以弹簧参数^[16]的设计与选取至关重要。

除拇指之外，其他四指的远指节和中指节之间在关节未锁紧时存在耦合运动关系，将与耦合轮配合使用的弹簧称为耦合弹簧，将关节锁紧后提供滑轮轴复位力的弹簧称为复位弹簧；耦合弹簧和复位弹簧在关节锁紧机构中的两种工作状态如图 14 所示。

图 14 弹簧工作状态

耦合弹簧的工作状态为：假设弹簧原长为 H_1 ，当远指关节和近指关节的关节锁紧机构均未动作时，关节滑轮轴位于最左端位置，与耦合滑轮处于贴合状态，弹簧被压缩，长度为 H_1' ，变形量为 λ_1 ，弹簧力为 F_1 ，两关节间存在耦合运动关系，如图 14 b 所示。

当远指关节和近指关节中任意一个锁紧时，关节滑轮轴被拉到最右端，耦合弹簧放松至原长 H_1 ，耦合滑轮和关节滑轮轴相互脱离，运动互不干涉，耦合关系解除，如图 14a 所示。

复位弹簧的具体工作过程为：假设弹簧原长为 H_2 ，在关节锁紧机构未动作时，弹簧处于压缩状态，长度被压缩为 H_2' ，变形量为 λ_2 ，产生的弹簧力为 F_2 ，在 F_2 的作用下关节滑轮轴被推至手指关节内侧的最左端，锁紧轮与下部指节外侧的轮齿槽脱离，关节滑轮轴通过键传动随上部指节转动与下部指节互不干涉，手指关节可以自由转动，如图 14b 所示。

若电磁铁通电，关节锁紧机构产生动作，关节滑轮轴被吸引至关节内侧最右端，在此过程中，复位弹簧被进一步压缩，长度为 H_2'' ，变形量为 λ_2' ，弹簧力为 F_2' ，此时锁紧轮与下部关节外侧齿槽啮合，使上下两指节转角固定；在动作结束时电磁铁

断电, 关节滑轮轴在复位力 F_2' 作用下移动至关节最左端, 如图 14a 所示。在整个过程中, 复位弹簧始终处于被压缩状态。

根据上述弹簧工作过程分析, 总结两处弹簧的设计原则: 在关节耦合状态时, 复位弹簧内力应大于耦合弹簧内力; 在关节解耦状态时, 复位弹簧内力小于电磁铁吸引力 F_a ; 各弹簧内径应大于与其相配合部分的关节滑轮轴轴径。

弹簧刚度

$$k = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd}{8C^3n} = \frac{Gd^4}{8(D_1+d)^3n} \quad (2)$$

式中, 旋绕比 $C=D_2/d$, d 为簧丝直径, 中径 $D_2=D_1+d$, 内径 D_1 , 外径 D , 圈数 n , 弹簧材料的切变模量 G 。

耦合弹簧簧丝直径为 d_1 , 中径 D_2^1 , 内径 D_1^1 , 外径 D^1 , 圈数 n_1 ; 复位弹簧簧丝直径 d_2 , 中径 D_2^2 , 内径 D_1^2 , 外径 D^2 , 圈数 n_2 。

耦合状态: $H-H_1'=\lambda_1$, $H_2-H_2'=\lambda_2$, $F_1=\lambda_1k_1$, $F_2=\lambda_2k_2$, $F_1 \leq F_2$ 。

锁紧状态: $\lambda_1'=0$, $H_2-H_2''=\lambda_2'$, $F_1'=0$, $F_2'=\lambda_2'k_2$, $F_2' < F_a$ 。

由式(2)可得两种弹簧刚度为

$$\begin{cases} k_1 = \frac{Gd_1^4}{8D_2^{1^3}n_1} \\ k_2 = \frac{Gd_2^4}{8D_2^{2^3}n_2} \end{cases} \quad (3)$$

弹簧长度 H_1 、 H_1' 、 H_2' 、 H_2'' 均已知, 根据实际情况设计耦合弹簧 $D_2^1=9\text{ mm}$ 、 $d_1=0.4\text{ mm}$ 、 $n_1=3$ 、 $H_1=5\text{ mm}$; 设计复位弹簧 $D_2^2=14\text{ mm}$ 、 $d_2=0.8\text{ mm}$ 、 $n_2=3$ 、 $H_2=7\text{ mm}$, 由式(3)可得: $k_1=0.35\text{ N/mm}$, $k_2=0.49\text{ N/mm}$ 。

考虑到复位弹簧所处的位置离电磁铁较近, 为避免其工作受电磁铁影响, 故选不锈钢作为复位弹簧的材料, 耦合弹簧对材料无特殊要求, 故采用价格较低廉的碳素弹簧钢。图 15 和图 16 分别为加工出的耦合弹簧和复位弹簧实物。

图 15 耦合弹簧实物

图 16 复位弹簧实物

3.2 影响关节驱动力矩的参数优化分析

以食指的传动机构为例, 手指是通过单根腱绳和滑轮实现运动的传递的, 在近指节和中指节处设置有腱绳松紧调节装置, 抓取动作受传动机构的影响较大。在传动机构中滑轮的尺寸和形式是影响手指出力的关键, 在相同腱绳张力的情况下不同的传动机构对各关节的驱动转矩是不同的, 因此最佳的状态是在相同腱拉力条件下, 使手指关节获得最大的驱动力矩, 这是进行滑轮参数优化的重要依据。

为了方便分析, 将腱绳松紧调节装置推杆末端简化成一小滑轮, 食指传动形式简化成图 17。

图 17 食指传动形式简化图

其中手指的几何参数分别如下: l_1 、 l_2 、 l_3 分别为远指节、指节、近指节长度; a_1 为腱绳指尖结点的偏心距; a_2 、 a_3 分别为两小滑轮到对应指节的距离; l'_2 、 l'_3 分别为小滑轮到对应关节的距离; r 为指节小滑轮半径, R 为关节滑轮半径; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为腱绳在关节滑轮上的包角; β_1 、 β_2 分别为腱绳在小滑轮上的包角; φ_1 、 φ_2 、 γ 分别为食指相关结构角, 与几何参数有关。

手指的受力情况为: T 为腱绳牵引力; T' 为牵引力切向分力; T'' 为牵引力法向分力; G_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为腱绳对各滑轮的等效力; G'_i 为等效力的切向分力, 由于图示的几何关系, 导致 G'_2 、 G'_4 与 G_2 、 G_4 完全相等, 在图中不予表示。

令手指在牵引力 T 作用下转动, 如图 18 所示, 其中, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为各指节转角, α'_1 、 α'_2 、 α'_3 分别为手指转动后腱绳在关节滑轮上的包角; β'_1 、 β'_2 分别为手指转动后腱绳在小滑轮上的包角; G'_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为手指转动后腱绳对各滑轮的等效力; G''_i 为对应等效力的切向分力。

图 18 食指运动后受力图

以下将依次对远指关节、近指关节、掌指关节的驱动力矩进行分析。

对远指关节进行受力分析, 得到远指关节的驱动力矩为

$$M_1 = M_1' - M_1'' = TR \quad (4)$$

式中, $M_1' = T'l_1$, $M_1'' = T''a_1$, $T' = T \sin \gamma$, $T'' = T \cos \gamma$, $l_1 = l_1' + l_1''$, $\tan \beta_1 = a_1/l_1'$, $\sin \beta_1 = R/l_1'$ 。

由式(4)可知, 在腱绳牵引力 T 和远指节长度 l_1 固定不变的情况下, 远指关节驱动力矩 M_1 主要受关节滑轮半径 R 影响, 与其他参数无关, 所以应在保证实际结构空间的前提下, 尽可能增加关节滑轮半径 R 以增加驱动力矩。

假设近指关节的驱动力矩为 M_2 , 分析其受力可知

$$M_2 = M_2' - M_2'' + M_2''' \quad (5)$$

式中, M_2' 为腱绳力 G_2' 产生的力矩, M_2'' 为腱绳力 G_1' 产生的力矩, M_2''' 为指尖牵引力 T 产生的力矩。

由式(5)可知, 要得到足够大的力矩 M_2 则应使 M_2' 和 M_2''' 尽可能大, 而 M_2'' 尽可能小。由于食指发生转动后模型上各参考点发生较大变化, 若对每个力矩均进行定量分析则过于复杂, 因此, 将对 M_2' 和 M_2'' 进行定量分析, 而对 M_2''' 进行定性分析, 以达到增加驱动力的效果。

对于 M_2' , 有如下关系式

$$\begin{cases} M_2' = G_2' l_2' \\ G_2' = 2T \cos \frac{\pi - \beta_1'}{2} \\ \beta_1' = \beta_1 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)化简可得

$$M_2' = 2T l_2' \sin \frac{\beta_1'}{2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 若腱绳牵引力 T 不变, 那么力矩 M_2' 的大小取决于 $\beta_1 \in (0 \sim \pi)$ 和 l_2' 的取值。由食指结构可知, 增加小滑轮半径 r , 则可使夹角 β_1 变大; 或者改变小滑轮位置使其更靠近掌指关节则可使间距 l_2' 增大, 这两种方法均可以得到较大的力矩 M_2' 。

对于 M_2'' , 有如下关系式

$$\begin{cases} M_2'' = G_1' l_2 \sin \left(\varphi_1 + \frac{\alpha_1'}{2} \right) \\ \alpha_1 - \alpha_1' = \theta_1 \\ G_1' = 2T \cos \frac{\pi - \alpha_1'}{2} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)化简可得

$$M_2'' = 2T l_2 \sin \left(\varphi_1 + \frac{\alpha_1 - \theta_1}{2} \right) \sin \left(\frac{\alpha_1 - \theta_1}{2} \right) \quad (9)$$

分析式(9)可知, M_2'' 为阻力矩, 若已经对远指关节滑轮进行了优化, 那么夹角 α_1 为固定值, 要使力矩 M_2'' 尽可能小, 则应当适度减小结构角 φ_1 , 增加小滑轮到指节的距离 a_2 或小滑轮半径 r , 即, 使小滑轮更偏离指节同时增大小滑轮。

对于 M_2''' , 在关节转动初始阶段, M_2''' 为正向驱动力矩; 当关节转动至腱绳牵引力 T 的延长线经过近指关节中心点时, 对应的驱动力臂为零, M_2''' 减小为零; 随着关节进一步转动, M_2''' 继续减小进而方向发生改变, 变为负向力矩, 对关节转动形成阻碍, 而且在整个转动过程中, M_2''' 始终遵循此规律, 因此应尽量避免此类情况出现。经分析可知, 增大结构角 γ 可使 M_2''' 变为负力矩的过程延后, 所以应适度增大关节滑轮半径 R , 与之前得出的结论相同。

综上所述, 在腱绳牵引力 T 不变的情况下, 若要使近指关节驱动力矩 M_2 增加, 应适度增大小滑轮半径 r 且使其远离(两个方向)近指关节中心。同理分析掌指关节驱动力矩, 所得结论与近指关节相同, 这里不再赘述。优化后食指传动方案如图 19 中虚线所示。

图 19 滑轮单元的受力分析与几何关系

除此之外, 优化过程中, 尚需注意可能出现的摩擦力增加、手指尺寸粗大等问题, 综合考虑结构实现的可能性、零件加工和装配的简便性等因素, 合理设置滑轮各参数。

4 灵巧手样机试验

灵巧手的主要功能是物体抓取, 本灵巧手手指关节处添加了关节锁紧机构, 因此, 在关节锁紧机构不动作时, 本灵巧手可对物体完成较简单的包络抓握; 在关节锁紧机构动作时, 可以完成更为复杂的精确抓取。本节对灵巧手的两种抓取模式进行试验验证。

本灵巧手手指材料为光敏树脂, 各手指远指节表面硬度较大且光滑, 因此, 试验时在各手指指尖包覆橡胶材料, 增加手指与物体之间的摩擦力。

4.1 灵巧手包络抓握试验

灵巧手在进行包络抓握时, 五根手指均向掌内运动, 各关节锁紧机构均不起作用, 五个手指在电动机的牵引下动作, 将物体包围并握紧, 完成包络抓握。图 20 所示为方形饮料瓶、圆形饮料瓶和体型较小的工具瓶的包络抓握试验。

图 20 包络抓握试验

试验结果表明, 本灵巧手对不同大小和形状的物体具有较强的包络抓握能力, 适应性较强且能保持稳定抓握, 不使物体滑落。

4.2 灵巧手精确抓取试验

灵巧手在进行精确抓取时需要关节止转机构的配合, 实现手指位姿在空间的固定。以精确抓取中的典型方式—指尖对捏来进行精确抓取试验, 以食指和拇指为对象验证灵巧手的精确抓取性能。图 21 所示分别为灵巧手对瓶盖、线圈、镊子、螺丝刀等物体进行指尖对捏试验。

图 21 指尖对捏试验

试验结果表明, 本灵巧手的关节止转机构动作可行, 工作可靠, 手指具有对不同形状的小物体进

行精确抓取的能力, 抓握稳定性较好。

5 结论

(1) 相较于传统欠驱动灵巧手而言, 本欠驱动灵巧手在手指关节处添加了用于控制关节转动角度的关节锁紧机构, 使得每个关节的转动变得可控, 并且运用模块化设计思想, 将除拇指外的四指设计为相同结构, 增加了互换性, 方便了手指加工和组装。

(2) 本灵巧手所设计的关节锁紧机构的动作受弹簧的影响很大, 在充分分析了手指和关节锁紧机构的工作过程后, 确定了弹簧的设计原则, 经过计算得到了耦合弹簧和复位弹簧的机构参数并制作了弹簧实物。

(3) 通过抓握试验, 验证了本灵巧手样机不仅可以进行简单的包络抓握, 还可以通过关节锁紧机构控制各指关节转角, 完成复杂的精确抓取, 抓取性能良好。

总之, 通过对传统欠驱动灵巧手进行结构上的改进, 添加了关节锁紧机构, 在不增加电动机驱动的情况下, 使欠驱动灵巧手指可以独立控制每个关节的转角, 达到了全驱动灵巧手指的效果, 这是一种创新性的尝试, 是未来灵巧手设计的一个很重要的方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] KOCHAN A. Shadow delivers first hand[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2005, 32(1): 15-16.
- [3] BAKER W, KINGSTON Z, MOLL M, et al. Robonaut 2 and you: Specifying and executing complex operations[C]// 2017 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), September 4, 2017, Austin, TX, USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [4] NAPIER J R. The prehensile movements of the human hand[J]. The Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume, 1956, 38(4): 902-913.
- [5] 李剑锋, 张玉茹, 张启先. 多指手的操作灵巧性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(11): 23-29.
LI Jianfeng, ZHANG Yuru, ZHANG Qixian. Dexterity design of multi-fingered hand[J]. Chinese Journal of

- Mechanical Engineering, 2000, 36(11): 23-29.
- [6] HAMILTON N, LUTTGENS K. Kinesiology: Scientific basis of human motion[M]. McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- [7] 王海荣. 仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WANG Hairong. Research on the dexterity design method of humanoid dextrous hand[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] ARBUCKLE J D, MCGROUTHER D A. Measurement of the arc of digital flexion and joint movement ranges[J]. The Journal of Hand Surgery British & European Volume, 1996, 20(6): 836-840.
- [9] 樊绍巍, 刘伊威, 金明河, 等. HIT/DLR Hand II 类人形五指灵巧手机构的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(2): 171-177.
- FAN Shaowei, LIU Yiwei, JIN Minghe, et al. Research on the mechanics of the HIT/DLR Hand II anthropomorphic five-finger dextrous hand[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(2): 171-177.
- [10] 李剑锋, 张凯, 张雷雨, 等. 并联踝康复机器人的设计与运动性能评价[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 29-39.
- LI Jianfeng, ZHANG Kai, ZHANG Leiyu, et al. Design and kinematic performance evaluation of parallel ankle rehabilitation robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 29-39.
- [11] 赵燕江, 张永德, 姜金刚, 等. 基于 Matlab 的机器人工作空间求解方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(12): 1657-1661.
- ZHAO Yanjiang, ZHANG Yongde, JIANG Jingang, et al. A method for solving robot workspace based on Matlab[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(12): 1657-1661.
- [12] DIAO Xiumin, MA Ou. Workspace analysis of a 6-DOF cable robot for hardware-in-the-loop dynamic simulation[C]// 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, Oct. 9-15, 2006, Beijing, China: IEEE, 2006: 4103-4108.
- [13] FU Jianxun, GAO Feng. Optimal design of a 3-leg 6-DOF parallel manipulator for a specific workspace[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 30(4): 659-668.
- [14] 韦普亨, 赵卫东, 谢扬, 等. 拇指对掌运动 6 个自由度的采集与分析[J]. 中国临床解剖学杂志, 2012, 30(2): 229-232.
- WEI Qiuheng, ZHAO Weidong, XIE Yang, et al. Collection and analysis of 6 degrees of freedom of thumb opposition movement[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2012, 30(2): 229-232.
- [15] 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): 16-23.
- LIU Yiwei, JIN Minghe, FAN Shaowei, et al. Five-finger dextrous robot hand DLR/HIT hand II[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 16-23.
- [16] SUN Jianjun. Investigation into effect of spring pressure on performance of balanced mechanical seals[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 39-43.

作者简介: 刘今越, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能机器人、智能检测与控制。

E-mail: ljy@hebut.edu.cn

赵睿, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器人技术及应用。

E-mail: zr199366@163.com

贾晓辉(通信作者), 女, 1976 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为力触觉感知、柔性精密定位系统设计。

E-mail: jia_dragon@163.com