

SMA 驱动模块化仿人手指设计与研究

郝丽娜, 郭少飞, 陈 洋

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用模块化的欠驱动手指结构设计, 形状记忆合金丝作为驱动器, 永磁铁装置提供预拉伸和复位功能, 使得 SMA 驱动器的输出力比弹簧预紧提高了 6 N 以上. 通过驱动位移放大滑轮, 使 SMA 驱动器的输出位移增大了 2.1 倍. 最后, 通过 3D 打印技术打印手指模型并组装了单根手指, 实现了对日常用品的抓取操作. 本研究有效解决了 SMA 驱动器驱动位移小、预拉伸和输出力相矛盾的问题, 为形状记忆合金材料作为仿生驱动装置的应用提供了设计思路.

关 键 词: SMA 驱动器; 预拉伸; 永磁铁; 位移放大; 欠驱动

中图分类号: TP 241.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)08-1137-05

Research and Design on Modular Humanoid Finger with SMA Actuator

HAO Li-na, GUO Shao-fei, CHEN Yang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: HAO Li-na, E-mail: haolina@me.neu.edu.cn)

Abstract: Modularized underactuated mechanical fingers are designed. For the actuator, SMA (shape memory alloy) wires are adopted, and permanent magnet devices are also used as the source of pre-stretching and restoring forces. This novel design increases the SMA output force for over 6 N more than the conventional SMA actuators, in which bias springs are adopted as the pre-stretching elements. A pulley system is also developed for amplifying the displacement output capacity of the actuator by 2.1 times. The mechanical fingers are fabricated by 3D printing technology, and general grasping experiments are carried out with daily commodities. This paper proposes the method for resolving the conflicts among the displacement output capacity, the pre-stretching force and the output force. The achievements will facilitate the further application of the SMA materials in biomimetic actuating fields.

Key words: SMA actuator; pre-stretch; permanent magnets; displacement amplification; underactuated

目前,多指仿人灵巧手机构复杂庞大、并且手与手腕多为一体化结构,例如,R2 仿人手^[1]和 Shadow 灵巧手^[2],虽然能够实现对日常生活物品的抓取、摆放等操作任务,但是控制系统繁琐复杂.如果单根手指出现驱动问题,整个灵巧手的运动就会受到严重影响,并且维护修复难度大.欠驱动灵巧手结构简单、控制方便、驱动单元少、可维护与可操作性强,因而引起了广泛研究,如 RTR II 手^[3]和 Cyber 手^[4].欠驱动灵巧手采用包络抓

取模式,虽然没有实现所有关节的精确转角控制,但是在实际应用中降低了控制程序的复杂性,使得灵巧手的运动更加流畅,更加符合实际人手的基本动作.

目前仿人灵巧手的传统驱动主要有以下几种:①电机驱动,如 Gifu Hand II^[5],然而电机的功率质量比低,在满足尺寸、质量条件下,电机的输出功率一般都比较小,为了提供足够大的抓取力,电机都需要与相应减速器配合来增大扭矩,但明

显增加了手指的尺寸和装配难度,如 DLR/HIT I 型灵巧手仅有 4 根手指,体积是人手的 1.5 倍^[6]。
②气压驱动,文献[7-8]基于气动柔性驱动器,研制了两款多指机械手,然而气压驱动系统一般都比较复杂,设备成本高,所占空间大,干扰噪音大。
③液压驱动,如德国研制的液压驱动仿人手^[9-10],然而液压驱动系统的外形尺寸大,对系统及其零配件装配精度要求高,系统维护成本高,容易产生环境污染物。

在现代技术研究领域中,大功率质量比的驱动器被广泛研究和关注。其中一类是关于智能材料驱动器,例如:电活性聚合物、介电弹性体、压电陶瓷、形状记忆合金等。其中,形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)具有驱动自感知、功率密度比高、驱动电压低、节能环保等优点,并且 SMA 所占体积很小,易于零部件和系统的集成和小型化设计,在众多领域具有较大研究价值^[11-12]。

目前采用 SMA 的驱动器普遍存在驱动位移小的问题,并且 SMA 丝在使用前需要预拉伸,一般情况下均使用弹簧实现预拉伸和断电复位功能,但是存在预拉伸力和输出力矛盾的问题,限制了 SMA 驱动器的应用范围。本文采用模块化结构设计,利用磁力提供手指的复位力,并制作了 SMA 输出位移放大机构,实现了手指的独立驱动,使得 SMA 驱动器的输出位移和输出力得到了明显提高。

1 欠驱动手指设计

1.1 单根手指设计

首先,通过人体解剖学了解人手自由度、各个关节及尺寸基本信息^[13],然后考虑 SMA 驱动结构实际情况对整体仿人手进行各个结构的模块化设计。为了最大限度地实现手指的模块化与集成化,将传动、驱动、复位装置都集成在单根手指中,每个手指可作为独立的单元,本文称作手指单元。手指单元的驱动装置为固定部件,在实现单手指运动控制的条件下易于实现多指灵巧手的装配和维修。由于人体手指除拇指外的屈曲运动形式类似,故可以采用相同的形状和尺寸外形。

由于欠驱动系统独立控制变量个数小于系统自由度个数,在不影响仿人手抓握性能的同时,又保证了系统结构的紧凑和美观,有利于实现仿人手系统的轻量化和简单化。因此,本文采用 SMA 欠驱动形式实现手指的屈曲运动,即只有手指的

远指关节作为主驱动关节,SMA 丝前端固定在远指关节转轴上,然后绕过中指节、近指节内部的轴和关节滑轮,驱动过程中在 SMA 丝和复位拉线的综合作用下使中指节和近指节产生随动,从而实现手指的包络抓取动作。

单根模块化手指的整体结构设计如图 1 所示,手指设计尺寸参照 GB10000—88 中关于人体手部尺寸的数据。单根手指具有三个转动关节,远指节转动轮由半径为 5 mm 和 10 mm 的半圆组成,其上分别固定 SMA 丝的一端和复位装置的拉绳。通过远指节的变半径滑轮,SMA 驱动器输出较小的位移,远指节便可实现较大的转角,手指的驱动布置如图 2 所示。

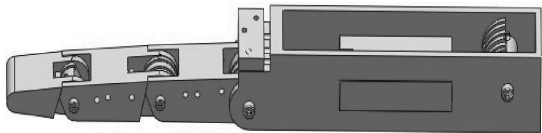


图 1 模块化单个手指三维模型
Fig. 1 3D model of modularized finger

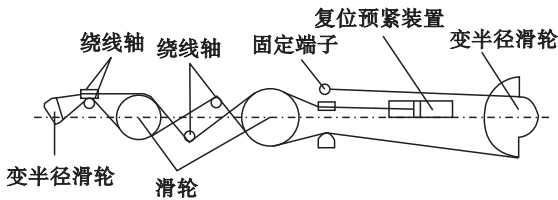


图 2 模块化手指绕线图
Fig. 2 Winding diagram of modularized finger

手指的运动采用绳索传动的形式,由 SMA 丝产生驱动力和驱动位移。单个手指具有一个主驱动,对物体实现包络抓取,手指的主体结构采用 3D 打印制作。手指各部分的尺寸和关节转动角度如表 1 所示。

表 1 手指尺寸和性能
Table 1 Size and performance of the mechanical finger

参数	近指节	中指节	远指节	驱动装置
转角/(°)	80	60	40	—
厚度/mm	14	13	10	25
宽度/mm	16	16	16	22
长度/mm	35	34	23	114

对手抓取物体的动作进行分析可知,人手的抓取过程是一种流畅连贯的包络抓取运动,即人在抓取物体时远指节先动,当远指节碰触到物体时停止运动,然后中指节和近指节跟随运动,最终完成稳定的抓取操作。采用欠驱动抓取模式具有

适应能力强、结构紧凑、控制简单等显著优点^[14-15]。设计的欠驱动仿人手指如图 3 所示,图中

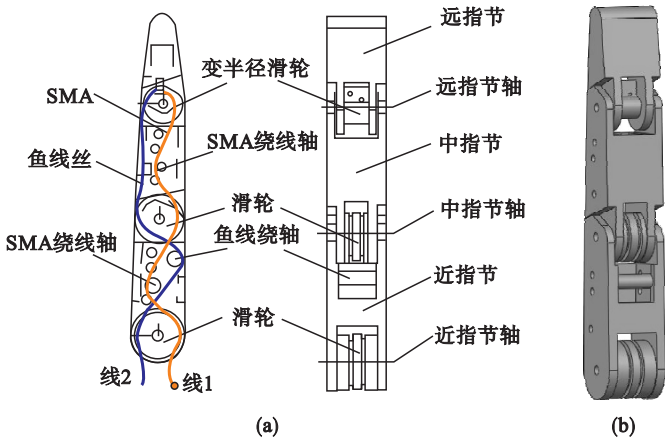


图 3 手指关节结构图
Fig. 3 Diagram of finger joint structure
(a)—手指关节平面图; (b)—手指关节三维图。

1.2 尾端驱动滑轮设计

SMA 丝的收缩率与其加工工艺、使用频次、预拉伸力等条件密切相关。在实际应用中采用 SMA 作为驱动器存在预拉伸力和输出力的矛盾,驱动位移也偏小,极大限制了 SMA 驱动器在仿生手中的应用。本文选用直径为 0.2 mm 的 SMA 丝作为驱动元件。根据设计指标,整个手指达到设计转角,驱动器的总位移量为 14 mm,在整个手指中 SMA 丝的有效长度为 280 mm。经过实际测量,在传统弹簧预拉伸条件下,所选用的 SMA 丝收缩率仅为 2.56%,无法满足手指的驱动需求。

针对 SMA 驱动位移偏小的问题,设计了由直径 17 mm 和直径 8 mm 半圆组成的变半径滑轮,其上有三个 U 型槽和对应的线孔,如图 4 所示。在变半径滑轮转动过程中,小半径轮和大半径

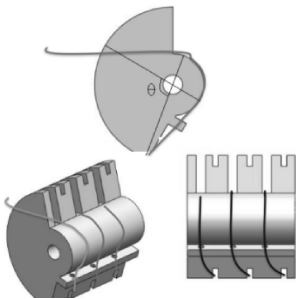


图 4 变半径滑轮
Fig. 4 Pulley with variable radius

轮转过的角度 θ 相同,SMA 丝在收缩时带动小半径轮转动,同时 SMA 丝将沿着大半径轮周长缠绕,由小半径滑轮和大半径滑轮的周长比得出该结构可以将位移放大 2.125 倍,同时采用的永磁

线 1 代表 SMA 丝,线 2 代表手指的复位鱼线拉绳。

铁复位装置产生较大的初始预拉伸力,使得 SMA 丝的收缩率得到提高,进而可以使总驱动位移达到 14 mm 以上,满足驱动设计要求。

1.3 手指复位结构设计

在实际应用中,若要使 SMA 驱动器产生较大的变形量,单程 SMA 驱动器需具有预拉伸量。在工业上多采用拉力机对其进行预拉伸,目前在轻量化结构设计中,SMA 丝的预拉伸一般采用弹簧,或者采用拮抗结构来提供预拉伸力。然而,在实际应用中由于弹簧力和位移成正比,采用弹簧对 SMA 丝进行预拉伸,如果弹簧初始预拉伸力太大,SMA 丝无法克服弹簧预拉伸力;如果弹簧预拉伸力太小,SMA 丝断电后无法恢复到初始位置。为解决上述问题,本文利用永磁铁相互之间的吸引/排斥力与距离变化的关系,调节 SMA 驱动器的预拉伸力与手指回复力的大小。设计中选取了牌号为 N35 的圆环和长方形钕铁硼永磁铁,并采用 3D 打印技术制作了复位装置的实物模型,如图 5 所示。

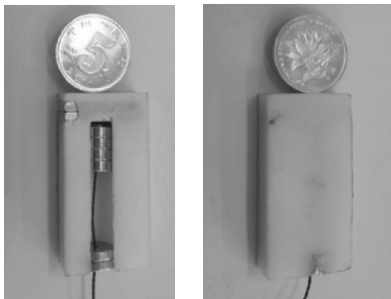


图 5 复位装置
Fig. 5 Reset device

根据设计的仿人手指的结构和选用的 SMA 丝特性,复位装置的设计要求如表 2 所示.

表 2 复位装置要求			
Table 2 Requirements of the reset device			
磁铁直径	初始力	行程	最小力
≤10 mm	≤8 N	0 ~ 19 mm	>0.9 N

一对永磁铁间的磁力计算公式^[16]为

$$F = (B/4\ 965)^2 A.$$

式中: B 为磁感应强度,单位为 Gs($1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$); A 为磁极面积,单位为 cm^2 ; F 为磁力,单位为 kgf ($1\text{kgf} = 9.8\text{N}$).

根据复位装置初始力和磁铁尺寸的要求选取外直径为 4,6,8,10 mm 的四组圆环磁铁和尺寸为 $20\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的长方形磁铁;采用山东蓬莱水玲牌 M1 级砝码和型号为 OADM2016441/S14F、分辨率为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的激光位移传感器,搭建了如图 6 所示的实验台,对该四组永磁铁组成的复位装置进行了力学特性测试.

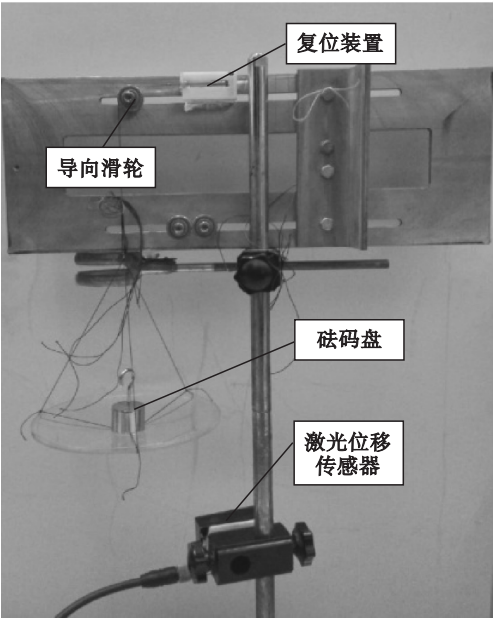


图 6 实验装置
Fig. 6 Experimental setup

砝码盘及拉绳的质量采用上海民桥型号为 SL202N 的电子天平测量,其最大量程 200 g ,精度为 0.01 g ,测得砝码盘及拉绳的质量为 76.00 g .将测得的四组实验数据进行整理,并利用最小二乘法拟合得到四组永磁铁复位装置的力学特性曲线,如图 7 所示.

根据实验曲线图可知,4 条曲线走势基本相同,但是 4 mm 和 6 mm 组的最小力不满足要求,10 mm 组的初始力不满足要求,8 mm 组的初始力

和最小力均满足要求.

8 mm 组永磁铁构成的 SMA 驱动复位装置在初始位置处磁场力最大,能够提供 7.76 N 的预拉伸力,能够使仿人手指实现较好的回复效果.在 10 mm 位移处磁力达到最小,为 1.36 N ;超过 10 mm 后,由于另一端磁铁和中间移动的永磁铁极性相反,因而磁力逐渐增大.若 SMA 驱动器采用弹簧达到相同的预拉伸力,由于弹簧弹力和位移成正比的关系,则在 10 mm 位移处的弹力 $F_t = (7.76 + F_j)\text{ N}$, F_j 为弹簧拉伸 10 mm 时的弹力.由此可见,利用永磁铁制作的手指复位装置,在 10 mm 处比弹簧复位结构减少了 $F_x = (6.4 + F_j)\text{ N}$,从而减少了 SMA 驱动力的损失,有效地提高了手指的抓取能力.

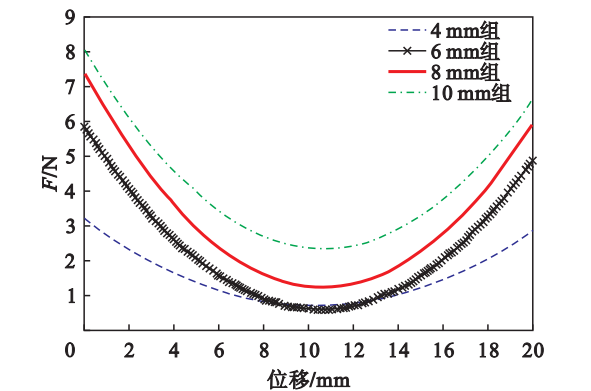


图 7 四组复位装置的力学特性曲线
Fig. 7 Tensile force characteristics of 4 kinds of reset devices

2 抓取实验

本文设计的模块化单手指结构采用包络抓取模式,通过 3D 打印技术制作了手指样机,单根手指质量为 60 g .为验证手指对常见物品抓取的有效性,采用双指结构进行了抓取实验,其中一根为可控手指,能够产生抓握动作,另一根为固定手指,实验结果如图 8 所示.

采用电子天平测量被夹持物质量,最大物体质量为 183.92 g .经过以上分析和抓取实验总结出仿人手指的有关性能指标如表 3 所示.

表 3 手指性能参数			
Table 3 Performance parameters of the mechanical finger			
自由度数	抓取直径	最大抓重	手指质量
3	≤120 mm	180 g	60 g

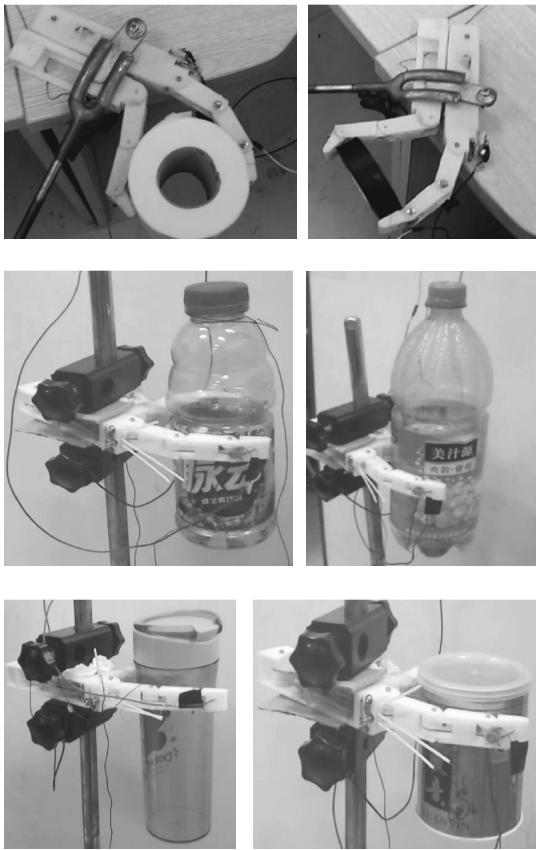


图 8 双指夹持实验
Fig. 8 Two-finger grasping experiment

3 结 语

本文设计的模块化仿人手指采用欠驱动的结构形式,满足了对不同尺寸、不同质量物体的抓取要求. 仿人手指设计了永磁铁复位装置和位移放大滑轮,使 SMA 驱动器的输出力和输出位移都得到了明显提高. 可以将模块化仿人手指进行组装,易于实现多指灵巧手的组装调试,提高抓取质量. 本研究为实现 SMA 作为驱动器的仿人灵巧手向小型化和轻量化的设计目标提供了新的思路和方法.

参考文献:

[1] Bridgwater L B, Ihrke C A, Diftler M A, et al. The Robonaut 2 hand—designed to do work with tools [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA. New York:IEEE,2012;3425 – 3430.

[2] Kochan A. Shadow delivers first hand[J]. *Industrial Robot: An International Journal*,2005,32(1):15 – 16.

[3] Massa B, Roccella S, Carrozza M C, et al. Design and development of an underactuated prosthetic hand [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New York: IEEE, 2002: 3374 –

3379.

[4] Carrozza M C,Dario P, Vecchi F, et al. The CyberHand; on the design of a cybernetic prosthetic hand intended to be interfaced to the peripheral nervous system[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York:IEEE,2003;2642 – 2647.

[5] Kawasaki H, Komatsu T, Uchiyama K. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor; Gifu hand II [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,2002,7(3):296 – 303.

[6] Liu Y W, Jin M H, Wei R, et al. Embedded FPGA-based control of the HIT/DLR hand [C]// IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. New York:IEEE,2005;582 – 587.

[7] 鲍官军. 气动柔性驱动器 FPA 的特性及其在多指灵巧手设计中的应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2006.

(Bao Guan-jun. Research on characteristics of flexible pneumatic actuator FPA and its application in multi-fingered dexterous hand design[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2006.)

[8] 王志恒,钱少明,杨庆华,等. 气动机器人多指灵巧手——ZJUT Hand[J]. *机器人*,2012,34(2):223 – 230.

(Wang Zhi-heng, Qian Shao-ming, Yang Qing-hua, et al. Pneumatic robot multi-fingered dexterous hand—ZJUT hand [J]. *Robot*,2012,34(2):223 – 230.)

[9] Schulz S, Pylatiuk C, Kargov A, et al. Progress in the development of anthropomorphic fluidic hands and their applications [J]. *Geological Quarterly*, 2004, 57 (3) : 551 – 560.

[10] Pylatiuk C,Schulz S,Kargov A, et al. Two multi articulated hydraulic hand prostheses [J]. *Artificial Organs*, 2004, 28 (11) :980 – 986.

[11] Andrianesis K,Tzes A. Development and control of a multi functional prosthetic hand with shape memory alloy actuators [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*,2015,78(2):257 – 289.

[12] She Y,Li C,Cleary J, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*,2015,7(2):021007.

[13] Erol A,Bebis G, Niclescu M, et al. A review on vision-based full DOF hand motion estimation [C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York:IEEE,2005;75 – 82.

[14] Jacobsen S C,Wood J E,Knutti D F, et al. The UTAH/MIT dextrous hand; work in progress [J]. *The International Journal of Robotics Research*,1984,3(4):21 – 50.

[15] Dechev N, Cleghorn W L, Naumann S. Multiple finger passive adaptive grasp prosthetic hand [J]. *Mechanism and Machine Theory*,2001,36(10):1157 – 1173.

[16] 田录林,贾嵘,杨国清,等. 永磁铁磁贴合体的磁场及磁力 [J]. *电工技术学报*,2008,23(6):7 – 13.

(Tian Lu-lin, Jia Rong, Yang Guo-qing, et al. The magnetic field and magnetic force of permanent magnet affixed to a plane magnetizer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2008,23(6):7 – 13.)