

# 基于形状记忆合金的仿生假手设计

吴志宇<sup>1,2,3,4</sup>, 谢巧莲<sup>2,3,4</sup>, 肖舒宁<sup>1</sup>, 李素姣<sup>2,3,4</sup>, 孟巧玲<sup>2,3,4\*</sup>, 喻洪流<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学材料与化学学院, 上海

<sup>2</sup>上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

<sup>3</sup>上海理工大学康复工程与技术研究所, 上海

<sup>4</sup>上海康复器械工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2023年1月11日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年3月10日

## 摘要

目前假肢手大多由电机驱动, 其体积大、质量大不够便携, 为此本文设计了一种基于形状记忆合金驱动模块化仿生手, 整体质量为188 g, 每根手指可独立驱动控制。通过滑轮组绕线的方式增大SMA丝的有效长度。绘制了假肢手的三维模型并对手指7连杆机构进行运动学分析及仿真, 利用MATLAB验证了其关节角度和指尖轨迹曲线, 以STM32单片机作为控制器结合多传感器设计了控制系统。并通过实验验证假手指的运动状态, 结果表明, SMA驱动器的输出位移可以达到假手指所需的驱动行程, 假手指的指尖轨迹与理论值相符合, 可以达到设计的预期目标。研究结果解决了SMA驱动位移较小的问题, 为形状记忆合金材料作为仿生假手的新型驱动器以及仿生手的机械结构提供了设计思路。

## 关键词

仿生手, 形状记忆合金, 驱动器, 运动学分析

# Bionic Design of Prosthetic Hand Based on Shape Memory Alloy

Zhiyu Wu<sup>1,2,3,4</sup>, Qiaolian Xie<sup>2,3,4</sup>, Shuning Xiao<sup>1</sup>, Sujiao Li<sup>2,3,4</sup>, Qiaoling Meng<sup>2,3,4\*</sup>, Hongliu Yu<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>3</sup>Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>4</sup>Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai

Received: Jan. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Mar. 10<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 吴志宇, 谢巧莲, 肖舒宁, 李素姣, 孟巧玲, 喻洪流. 基于形状记忆合金的仿生假手设计[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 926-936. DOI: 10.12677/mos.2023.122088

## Abstract

Since most prosthetic hands are actuated by motors, which are large, heavy, and difficult to carry, this paper designs a modular SMA-actuators bionic prosthetic hand. Its quality is 188 g in total. Each finger can be actuated and controlled independently. By coiling with a pulley block, it increases the effective length of the SMA wire. A 3D model of the prosthetic hand is drawn, and kinematics analysis and simulation of the seven-link mechanism are carried out. Using MATLAB, this paper verifies the joint range of motion and kinematic trajectories of the fingertip. The control system is designed by taking STM32 as the controller and combing it with a multi-sensor. Through experiments, the motion state of the artificial finger is verified. According to the results, the output displacement of the SMA actuator can meet the driving distance requirements of the artificial finger, and the kinematic trajectories of the fingertip are consistent with the theoretical value which can achieve the expected goal of design. The research solves the problem of short actuated displacement of SMA and provides a design idea for using SMA as a new actuator and the mechanical structure of bionic prosthetic hands.

## Keywords

Bionic Hand, Shape Memory Alloy (SMA), Actuator, Kinematic Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

手作为人体的重要组成部分,可以完成抓取、物体操作等各种复杂的任务。人手具备的五根手指共拥有 21 个自由度,其在人们的日常生活中发挥着至关重要的作用。根据中国残疾人联合会的统计显示,截止至 2010 年,我国肢体残疾人数已达到 2472 万人,占总残疾人口总数的 30% [1]。研究人员通过仿生学、解剖学等进行各类仿生机械手的研制,其传统的驱动方式主要为自身力源驱动、电机驱动、气/液压驱动,其中电机驱动较多,但针对假手机构,即使为欠驱动设计,电机的力重比较低,且微型电机所要占用的体积空间较大,降低了机械手的设计空间,同时也增加了驱动装置的装卸难度。如清华大学所研制的欠驱动五指机械手[2],整个手仿生人工关节囊、韧带和肌腱,其具备 16 个自由度,具备极高的灵活性,但是体积较大,并且机械手本体质量高达 942 g,奈良科学技术研究所研制的 NAIST hand 2 [3]以及德国宇航中心研制的 DLR 手[4]同样存在力重比低的问题。气压和液压驱动也常用于进行驱动,如英国 Shadow 公司研制的气动肌肉用于驱动仿生灵巧手[5],卡尔斯鲁厄理工学院研制的集成多种传感器的液压手[6],但是气/液压驱动器对密封性要求较高,且驱动器占用体积较大,零部件多且控制相对复杂,对于气压来说,气源设备对于可移动便携式设备是一个暂未解决的问题。

随着科学技术的进步,更多的智能材料应用于机器人系统之中。例如形状记忆合金(shape material alloy, SMA)、磁流变液、介电弹性材料用于设计更加轻型紧凑的结构。以上材料中, SMA 作为一种新型的智能材料,在各种物理环境的刺激下,可以使其恢复至初始形状,具有较高的生物相容性以及较高的力重比,使其可以制成类似肌肉的驱动器,无声的运行适用于机器人在多种场合下运行[7] [8] [9]。在所有 SMA 材料中, Ni-Ti 合金由于其较低的成本、柔性、控制简单而被广泛应用。Ni-Ti 合金具有多种驱动

形式,如丝[10][11][12][13]、弹簧[14][15][16]等,希腊帕特拉斯大学采用 SMA 丝制作了一种轻量化仿生假手[17];大连海事大学将 SMA 丝嵌入至软复合结构中制作了一种柔性假手[18];得克萨斯大学设计了一款 SMA 丝驱动的假肢手,其通过螺旋绕线的方式增大驱动器行程[19];东北大学郝丽娜等人设计了一种变半径滑轮机构以此增大 SMA 丝的行程[20]。SMA 作为驱动元件具备自传感特性,控制较为简单,但是 SMA 较短的行程变化在线性驱动器中的影响也较为明显,其需要较大的空间以此满足驱动所需的行程,将驱动器放置在手臂端或外界设备与轻型便捷的特性相违背。

因此针对 SMA 丝高输出力低应变的特性,本文设计了一种新型 SMA 驱动器,通过将一组 SMA 丝通过滑轮绕线的方式增大驱动器的输出位移,实现更高的集成度;由于 SMA 驱动器体积小、功率小及力重比大的特点,手指设计为 7 连杆机构,单驱动器控制单个自由度,提高了手指运动的稳定性,绘制了假手的三维模型,并对手指进行了运动学分析,最后通过实验验证了单个假手指在 SMA 驱动器驱动下的运动效果。

## 2. 仿生假肢手设计

本设计基于仿生学,参考人手国家标准尺寸设计了手指结构[21][22],其中包括食指、中指、无名指、小指和拇指。利用 SolidWorks 软件绘制整体假手模型,整体机构如图 1 所示,每个手指均由一个 SMA 驱动器单独控制,通过对 SMA 驱动器通电加热使得 SMA 丝发生收缩变形,从而实现手指的屈曲伸展运动,每个手指可与手掌进行简易拆装,整个假手具有高度仿生性和灵活性,仿生假手实物图如图 2 所示。

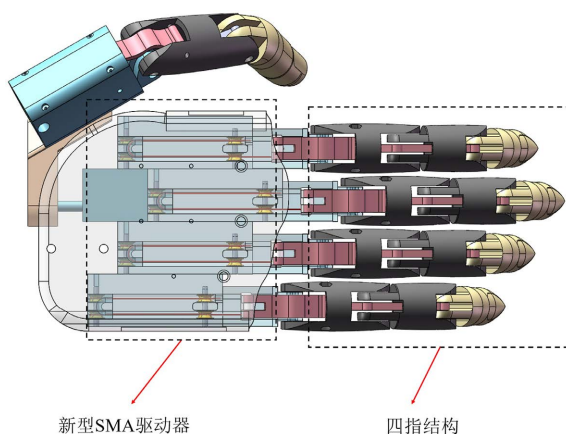


Figure 1. Bionic hand 3D-model

图 1. 仿生手三维模型

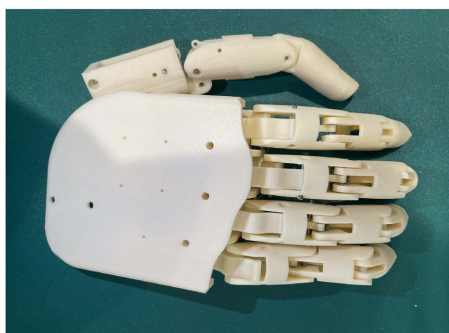


Figure 2. Bionic hand physical prototype

图 2. 仿生手实物图样机

## 2.1. 手指结构设计

为了实现仿生手的轻量化和便携化。本文采用新型 SMA 驱动器作为假手指的驱动源实现屈曲运动, 为了降低控制的复杂性, 手指的近指关节(PIP)、远指关节(DIP)和掌骨关节(MCP)设计成耦合运动。通过七连杆机构实现掌指关节优先屈曲, 带动其他两个关节运动实现最大范围的手指包络。单根模块化手指的结构设计如图 3 所示。

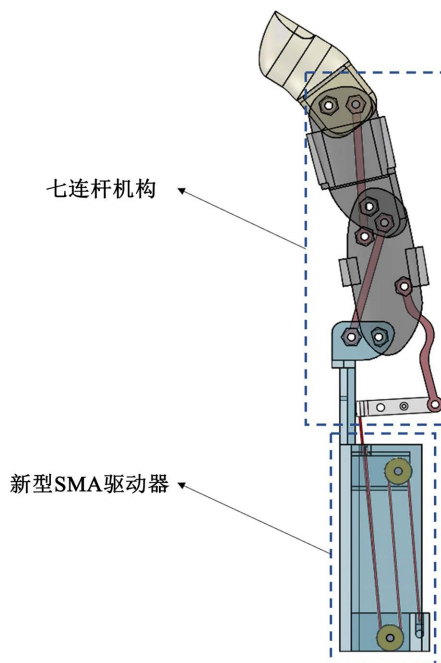


Figure 3. Diagram of finger joint structure

图 3. 手指关节结构图

## 2.2. SMA 驱动器设计

### 2.2.1. SMA 驱动器结构设计

作为假手指的驱动源, 应当具备较快的动态响应以及负载输出能力, SMA 丝是一种力重比较高的智能材料, 本设计基于 SMA 丝, 设计了一种新型驱动器, SMA 丝总长度为 350 mm, 直径为 0.3 mm, 驱动器模型图如图 4 所示, 该驱动器主要由滑轮、SMA 丝和铝合金压头组成, 驱动器总长度为 54 mm。由于 SMA 丝的应变量为 3%至 5%, 因此需要滑轮组绕线的方式增大 SMA 驱动器的输出位移。通过行程放大, SMA 丝的总行程量放大了 6 倍, 满足机构所需行程。通过在关节处添加扭簧可以提升机构的预紧力, 从而提高 SMA 驱动器的输出位移。

### 2.2.2. SMA 驱动器控制设计

根据控制要求, 搭建了一套基于 SMA 丝温度/角度反馈的控制系统, 其中包括 STM32 控制模块、多路脉冲调宽模块、加热驱动模块、SMA 驱动模块、假手指七连杆机构和传感器采集模块。仿生假手具备 5 个 SMA 驱动模块, 因此将以上模块进行并联设计, 通过大功率电池作为电源。基于 SMA 的仿生假手的控制框图如图 5 所示。

其中, 掌指关节的角度变化作为驱动模块的阈值设定, 根据预设的目标值进行通电加热, 通电初始阶段, 通过施加大电流使得温度迅速达到相变结束的温度, 此时切换至小电流使得 SMA 丝保持收缩状态,

比较测量得到的值与阈值之间的差值,改变PWM的占空比调节电压大小,从而使得SMA稳定在目标值,完成对仿生假手的控制。图6为SMA驱动器的驱动电路图。

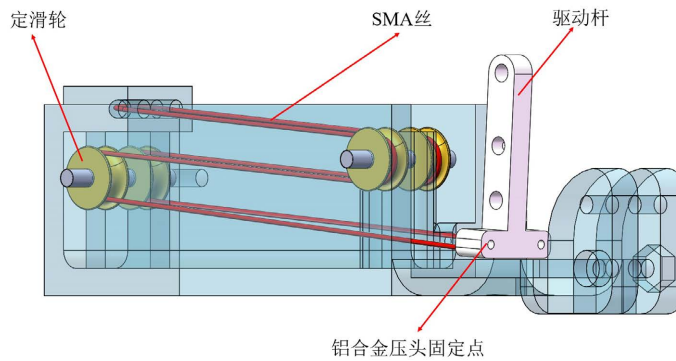


Figure 4. Structure diagram of new SMA actuator  
图4. 新型SMA驱动器结构示意图

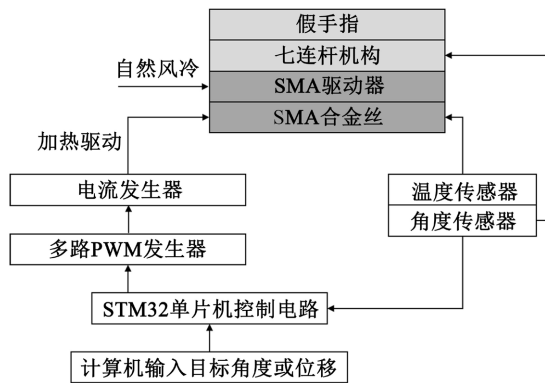


Figure 5. Bionic prosthetic hand control system  
图5. 仿生假手控制系统简图

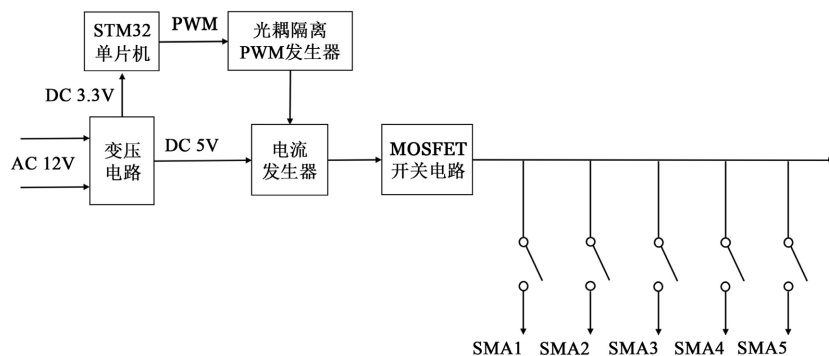


Figure 6. Schematic circuit diagram  
图6. 驱动电路原理图

### 3. 假手指运动学分析

机构运动学分析是动力学分析、控制策略以及后续系统优化的基础。因此,建立运动学模型对假手指的研究是至关重要的。本文采用闭环矢量方程对假手指的机构模型进行正运动学分析,即已知驱动元

件的输入角度求解各个关节的角度变换，最终求解末端执行器的轨迹方程，因此为了实现三关节的耦合运动，设计了如图 7 所示的七连杆机构来实现手指弯曲。各连杆杆长参数见表 1 所示。

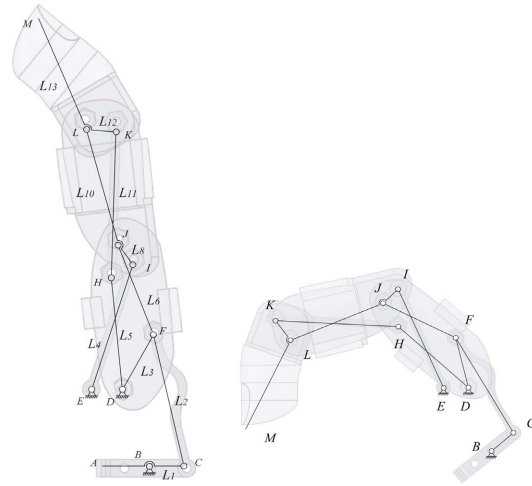


Figure 7. Structure of single finger  
图 7. 单个手指结构图

Table 1. Design parameters for multi-link driving mechanism  
表 1. 多连杆驱动机构参数表

连杆号	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$
连杆	$L_{BC}$	$L_{CF}$	$L_{DF}$	$L_{EI}$	$L_{DH}$	$L_{FI}$	$L_{HJ}$
长度(mm)	8	31.8	14.8	31	26.5	22.7	7.9
连杆号	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{14}$
连杆	$L_{IJ}$	$L_{IL}$	$L_{JL}$	$L_{HK}$	$L_{KL}$	$L_{LM}$	$L_{KM}$
长度(mm)	5.7	33.7	28.3	34.5	6.9	28.4	32.2

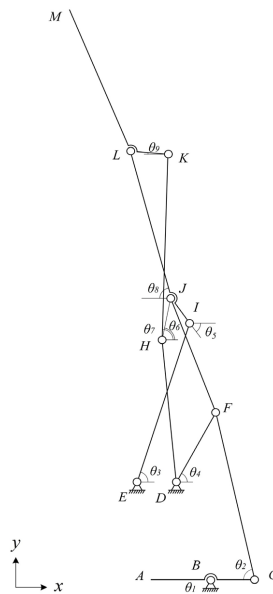


Figure 8. Mechanism schematic diagram of finger  
图 8. 手指机构示意图

如图 8 所示, 对于连杆 D-F-J-H,  $\angle JDF$  为  $30.62^\circ$ ,  $\angle HDF$  为  $34.34^\circ$ ,  $\angle JHD$  为  $163.63^\circ$ , 对于连杆 I-J-L,  $\angle LIJ$  为  $17.7^\circ$ ,  $\angle LJI$  为  $158.76^\circ$ , 对于连杆 M-L-K,  $\angle MLK$  为  $117.47^\circ$ 。

对该连杆机构建立闭环矢量方程如下:

$$\begin{cases} BC + CF = BD + DF \\ EI + IJ = ED + DJ \\ HJ + JL = HK + KL \end{cases} \quad (1)$$

将上式向量分别求对 x、y 轴上的投影, 可得:

$$\begin{cases} L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos \theta_2 = L_3 \cos \theta_4 - BD_x \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 = L_3 \sin \theta_4 + BD_y \\ L_4 \cos \theta_3 - L_8 \cos \theta_5 = ED_x - L_{DJ} \cos(180^\circ - \theta_4 - \beta_1) \\ L_4 \sin \theta_3 + L_8 \sin \theta_5 = ED_y + L_{DJ} \sin(180^\circ - \theta_4 - \beta_1) \\ L_{10} \cos(180 + \theta_5 - \beta_4) - L_7 \cos(\beta_3 - 180 + \theta_4 + \beta_2) = L_{12} \cos \theta_9 - L_{11} \cos \theta_7 \\ L_{10} \sin(180 + \theta_5 - \beta_4) + L_7 \sin(\beta_3 - 180 + \theta_4 + \beta_2) = L_{12} \sin \theta_9 + L_{11} \sin \theta_7 \end{cases} \quad (2)$$

对于末端执行器 M, 其位移方程如下:

$$\begin{cases} x_M = L_9 \cos(\theta_5 + \beta_5) - L_4 \cos \theta_3 + L_{13} \cos(\beta_6 - \theta_9) - BE_x \\ y_M = L_9 \sin(\theta_5 + \beta_5) + L_4 \sin \theta_3 + L_{13} \sin(\beta_6 - \theta_9) + BE_y \end{cases} \quad (3)$$

对上式进行求导, 得到角速度关系如下:

$$\begin{cases} x'_M = -L_9 \sin(\theta_5 + \beta_5) \omega_5 + L_4 \sin \theta_3 \omega_3 + L_{13} \sin(\beta_6 - \theta_9) \omega_9 \\ y'_M = L_9 \cos(\theta_5 + \beta_5) \omega_5 + L_4 \cos \theta_3 \omega_3 - L_{13} \cos(\beta_6 - \theta_9) \omega_9 \end{cases}$$

对上式进行求导, 得到角加速度关系如下:

$$\begin{cases} x''_M = -L_9 \cos(\theta_5 + \beta_5) \omega_5^2 - L_9 \sin(\theta_5 + \beta_5) \alpha_5 + L_4 \cos \theta_3 \omega_3^2 \\ \quad + L_4 \sin \theta_3 \alpha_3 - L_{13} \cos(\beta_6 - \theta_9) \omega_9^2 + L_{13} \sin(\beta_6 - \theta_9) \alpha_9 \\ y''_M = -L_9 \sin(\theta_5 + \beta_5) \omega_5^2 + L_9 \cos(\theta_5 + \beta_5) \alpha_5 - L_4 \sin \theta_3 \omega_3^2 \\ \quad + L_4 \cos \theta_3 \alpha_3 - L_{13} \sin(\beta_6 - \theta_9) \omega_9^2 + L_{13} \cos(\beta_6 - \theta_9) \alpha_9 \end{cases}$$

SMA 丝的位移  $\Delta l$  与驱动杆角度  $\theta_1$  之间的关系如下, 其中  $R$  为驱动杆的旋转半径

$$\cos \theta_1 = \frac{2R^2 - \Delta l^2}{2R^2} \quad (4)$$

设置驱动杆的角度变化为  $0 \sim 40^\circ$ , 在 MATLAB 中对上述建立的运动学模型进行仿真分析, 由于 SMA 驱动过程中存在滞后性, 设定驱动杆以  $20^\circ/s$  的角速度匀速转动, 仿真时间为 2 s, 步长为 0.1 s, 得到假手指各个关节的角度变化如图 11 所示以及末端执行器的运动轨迹如图 12 所示。

#### 4. 实验

为进一步验证上述假手指模型的正确性以及驱动性能, 对假手指进行样机试制并测得新型 SMA 驱动器位移变化、各个关节角度变化以及指尖轨迹曲线图, 参照表 1 中的数据对 7 连杆手指进行 3D 打印, 搭建了如图 9(c)所示由控制模块、姿态传感器、激光位移传感器、SMA 驱动器、假手指组成的测试平台。姿态传感器固定在各个指骨上, 并远离关节, 防止实验过程中发生错位, 实验前对传感器进行零位校

准, 对 SMA 合金丝两端施加固定 5 V 的直流电压, 驱动 4 s 后使得手指达到最大弯曲角度, 由于 SMA 驱动器加热具有迟滞性, 将驱动器发生位移的时刻点作为上一章节仿真的出发点, 并进行曲线拟合。SMA 丝具备自传感特性, 对通电电流进行阈值限定, 使得在 SMA 丝相变结束后自动调节电流大小, 防止 SMA 丝过热, SMA 丝在室温下进行自然冷却; 在距离指尖 2.8 mm 的位置粘贴 Mark 点, 通过图像处理得出指尖轨迹的近似曲线。

图 10 为新型 SMA 驱动器的位移随时间的变化曲线, 由图可知, 固定 5 V 电压下可以在 4 s 内实现手指的驱动位移最大化, 该输出位移可以达到机构所需行程; 图 11 为各个关节的角度变化, 其中实线为实验值, 虚线为上述小节仿真的理论值, 由图可知, 近端指间关节角度和远端指间关节角度距离理论值相比掌指关节较大, 分析原因是由于连杆之间存在间隙, 会向其他方向进行偏移, 并随着连杆机构的多级叠加, 该误差会逐渐增加, 后续可通过适当增加额外行程消除误差; 图 12 为指尖轨迹的理论值与实验值对比, 其中实验值的 Mark 点标定在距离指尖 2.8 mm 处摆动, 由图可知, 仿生手末端的运动轨迹可以达到设计需求。

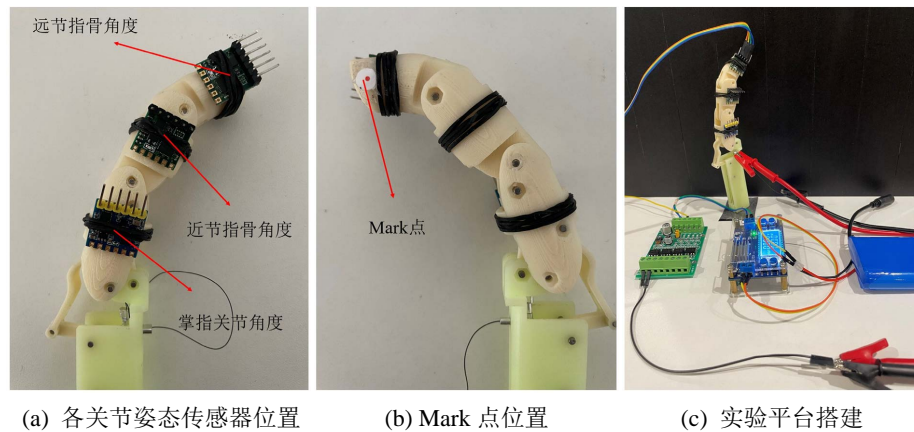


Figure 9. Experiment platform

图 9. 实验平台

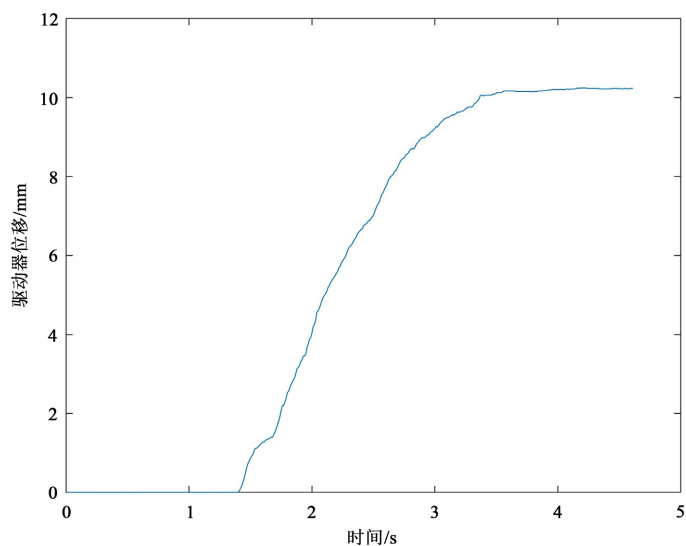


Figure 10. Displacement changes of actuator

图 10. 驱动器位移变化



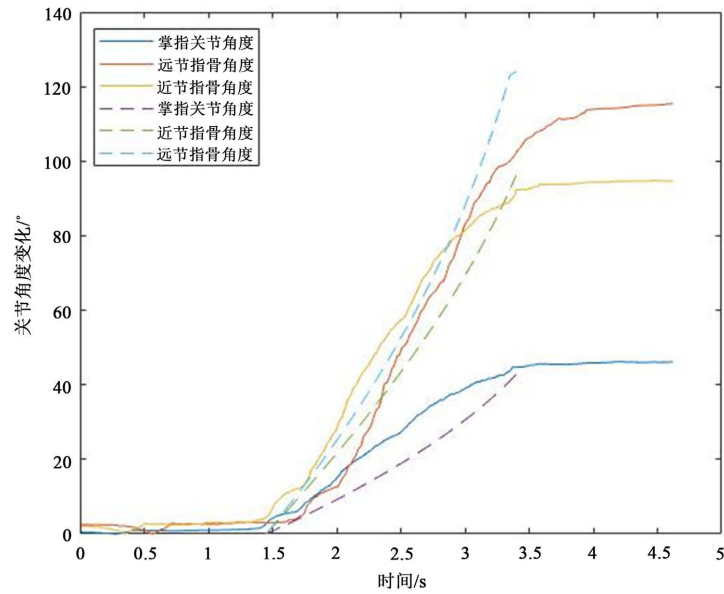


Figure 11. Angle changes of finger joints  
图 11. 手指各个关节角度变化

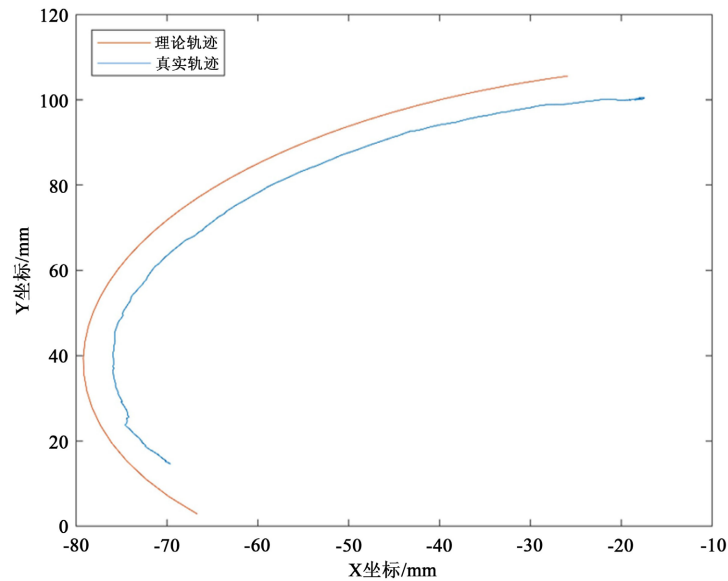


Figure 12. Fingertip trajectory curve  
图 12. 指尖轨迹曲线

## 5. 结论

本文设计了一种基于 SMA 驱动器的单自由度七连杆仿生手，通过滑轮组绕线的方式增大 SMA 驱动器的输出行程，每根手指都有一个独立的 SMA 驱动器进行控制。搭配多传感器设计了 SMA 驱动器控制系统，建立了 SMA 驱动器输出位移与各个关节角度的关系，并对设计的仿生手指进行了运动学分析以及 MATLAB 仿真，计算出其指尖轨迹。结果表明，设计的假手指在匀速驱动下，连杆机构各个关节运动平稳，可以实现仿人手抓握的运动轨迹。同时，利用 3D 打印制作假手指样机，搭建实验平台验证了 SMA 驱动器及假手指的运动性能。

## 基金项目

国家自然科学基金(61903255), 上海市“科技创新行动计划”生物医药领域科技支撑项目(20S31905400)。

## 参考文献

- [1] 中国残疾人联合会. 2010 年末全国残疾人总数及各类[EB/OL]. 百度文库, 2012-06-26. <http://wenku.baidu.com/view/97322d8802d276a200292e0f.html>, 2013-03-22.
- [2] U, Z. and Todorov, E. (2016) Design of a Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand towards Artificial Limb Regeneration. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, 16-21 May 2016, 3485-3492.
- [3] Kurita, Y., Ono, Y., Ikeda, A. and Ogasawara, T. (2011) Human-Sized Anthropomorphic Robot Hand with Detachable Mechanism at the Wrist. *Mechanism and Machine Theory*, **46**, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.08.011>
- [4] Grebenstein, M., Albu-schaffer, A., Bahls, T., *et al.* (2011) The DLR Hand Arm System. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, 9-13 May 2011, 3175-3182. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980371>
- [5] Rothling, F., Haschke, R., Steil, J.J. and Ritter, H. (2007) Platform Portable Anthropomorphic Grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 29 October-2 November 2007, 2951-2956.
- [6] Kargov, A., Werner, T., Pylatiuk, C. and Schulz, S. (2008) Development of a Miniaturised Hydraulic Actuation System for Artificial Hands. *Sensors and Actuators A: Physical*, **141**, 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.025>
- [7] Park, C., *et al.* (2019) Shape Memory Alloy-Based Spring Bundle Actuator Controlled by Water Temperature. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **24**, 1798-1807. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2928881>
- [8] Ning, G., *et al.* (2021) A Bionic Soft Tongue Driven by Shape Memory Alloy and Pneumatics. *Bioinspiration & Biomimetics*, **16**, Article ID: 055008.
- [9] Lohse, F., Wende, C., *et al.* (2021) Bio-Inspired Semi-Flexible Joint Based on Fibre-Reinforced Composites with Shape Memory Alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **32**, 462-472. <https://doi.org/10.1177/1045389X20959460>
- [10] Ye, T., Wang, Y., Xu, S., Wang, Y. and Li, J. (2022) Modeling and Motion Control of an Octopus-Like Flexible Manipulator Actuated by Shape Memory Alloy Wires. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **33**, 3-16. <https://doi.org/10.1177/1045389X211023579>
- [11] 吕雨微, 芦吉云, 王宜耀. 双程 SMA 丝驱动的柔性弯曲关节设计与测试[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(9): 1334-1339.
- [12] Zhang, J., Cong, M., Liu, D., *et al.* (2022) A Lightweight Variable Stiffness Knee Exoskeleton Driven by Shape Memory Alloy. *Industrial Robot*, **49**, 994-1007. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2021-0262>
- [13] Jian, L., He, J.M., *et al.* (2019) A Biomimetic Flexible Fishtail Embedded with Shape Memory Alloy Wires. *IEEE Access*, **7**, 166906-166916.
- [14] Terrile, S., Miguelaez, J. and Barrientos, A. (2021) A Soft Haptic Glove Actuated with Shape Memory Alloy and Flexible Stretch Sensors. *Sensors*, **21**, 5278. <https://doi.org/10.3390/s21165278>
- [15] Bacalango, J., Bawagan, K., *et al.* (2021) Design and Control of Robotic Elbow Using Shape Memory Alloy as Actuators. 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatre, 8-10 July 2021, 13-20. <https://doi.org/10.1109/ICCES51350.2021.9489192>
- [16] Muralidharan, M. and Palani, I. (2021) Development of Subcarangiform Bionic Robotic Fish Propelled by Shape Memory Alloy Actuators. *Defence Science Journal*, **71**, 94-101. <https://doi.org/10.14429/dsj.71.15777>
- [17] Andrianesis, K. and Tzes, A. (2015) Development and Control of a Multifunctional Prosthetic Hand with Shape Memory Alloy Actuators. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **78**, 257-289. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0061-6>
- [18] 孙茂凯, 陈羿宗, 王生海, 韩广冬, 徐小清, 陈海泉. 形状记忆合金驱动的软体仿生手掌[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14618-14624.
- [19] Deng, E., *et al.* (2021) A Soft 3D-Printed Robotic Hand Actuated by Coiled SMA. *Actuators*, **10**, 6. <https://doi.org/10.3390/act10010006>

- [20] 郝丽娜, 郭少飞, 陈洋. SMA 驱动模块化仿人手指设计与研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(8): 1137-1141.
- [21] Erol, A., Bebis, G., Nicolescu, M., *et al.* (2005) A Review on Vision-Based Full DOF Hand Motion Estimation. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, 21-23 September 2005, 75. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.395>
- [22] Kim, H.I., Han, M.W., Song, S.H., *et al.* (2016) Soft Morphing Hand Driven by SMA Tendon Wire. *Composites Part B: Engineering*, **105**, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.004>