

柔顺微夹持机构理论分析与实验

余跃庆¹ 张亚涛¹ 张绪平² 宋 鹏¹ 田东明¹

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 奥胡斯大学工程系, 奥胡斯 8000 C)

摘要: 微操作系统中柔顺微夹持机构作为执行端是完成微操作的关键部件。提出了一种新型柔顺微夹持机构, 利用虚功原理建立了该微夹持机构的伪刚体模型, 推导了微夹持机构的位移方程, 得到了该微夹持机构的输入位移与输出位移以及驱动力与输出位移关系。建立了该微夹持机构的三维模型, 并在 ANSYS 软件中进行仿真, 将仿真结果与理论结果进行比较, 验证理论模型的准确性。最终加工了该微夹持机构并进行了实验, 将实验数据与理论值、仿真值进行对比, 进一步验证了理论模型的准确性。

关键词: 柔顺机构; 伪刚体; 微夹持机构; 实验

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0386-06

Theoretical Analysis and Experiment on Compliant Microgripper Mechanism

YU Yueqing¹ ZHANG Yatao¹ ZHANG Xuping² SONG Peng¹ TIAN Dongming¹

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. Department of Engineering, Aarhus University, Aarhus 8000 C, Denmark)

Abstract: As an end-effector in the micromanipulation system, the compliant microgripper is of great importance in micro manipulations. A pseudo-rigid-body model of a novel compliant microgripper was established, and the kinematic equations were formulated based on developing and analyzing the pseudo-rigid-body model by using the principle of virtual work. The relationship between input and output displacements as well as the relationship between input force and output displacement were then derived. The analytical model was verified via 3D simulations by using ANSYS software. The simulation results were compared with the theoretical results and the error was less than 2.8% within the required range. Finally, the compliant microgripper was fabricated and the micromanipulation system was established. Then displacement experimental tests were conducted by using the fabricated microgripper. Experimental data was compared with both analytical and simulation results to further validate the accuracy of the analytical model. It was proved that the new microgripper displacement can get 89.65 μm with 1 V voltage applied. And the error between the analytical results and experimental data was not more than 3.2% in useable range. The displacement characteristics were got by the pseudo-rigid-body model and verified by the simulation results and the experiments data. The microgripper can manipulate suitable subjects with size within 500 μm to 679 μm from the analysis results.

Key words: compliant mechanisms; pseudo-rigid-body; microgripper mechanisms; experiment

0 引言

微夹持机构是微操作领域中对操作对象进行夹持操作的机构, 因其体积很小, 传统的运动机构难于集成, 且装配困难, 所以一般采用柔顺机构进行设计。柔顺机构是一种依靠构件自身弹性变形来实现运动和功能的机构, 与传统刚性机构相比, 柔顺机构

不仅能实现运动、力和能量的传递和转换, 还可以利用杆件的变形来改善和提高机构的性能, 在很多场合表现出诸多的优越性^[1-2]。微夹持机构因采用了柔顺机构, 无需装配, 没有运动副之间的摩擦磨损等^[3-5], 在微操作过程中体现了高精度、高可靠性的特点。

对于柔顺微夹持机构, 主要可以划分为集中式

收稿日期: 2018-04-27 修回日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575006)

作者简介: 余跃庆(1958—), 男, 教授, 主要从事机构动力学及机器人研究, E-mail: yqyu@bjut.edu.cn

柔顺微夹持机构^[6-7]与分布式柔顺微夹持机构^[8-9]。对于分布式柔顺微夹持机构,驱动力和位移的传递主要依靠结构变形,导致能量大部分储存在弹性变形中,微夹持机构的输出位移很小,因此微夹持机构较少采用分布式柔顺机构。文献[10]提出了一款分布式柔顺微夹持机构,该微夹持机构在 20 V 电压下产生 16 μm 的位移。对于集中式柔顺微夹持机构,其变形主要发生在柔性铰链处,且主要依靠柔性铰链的变形来传递运动和力。根据不同的设计要求,微夹持机构位移放大比不同。文献[11]设计了多款集中式柔顺微夹持机构,输出位移分别达 67、24、53 μm 。

柔顺微夹持机构的运动特性主要体现在输出位移能否达到操作对象对位移的要求。本文对提出的柔顺微夹持机构进行位移特性分析,建立微夹持机构的运动模型,并与 ANSYS 软件仿真结果进行对比,最终通过实验验证模型的准确性。

1 柔顺微夹持机构

本文提出一种集中式柔顺微夹持机构,如图 1 所示。该微夹持机构采用左右对称结构,每边各包含 3 个直梁型柔性铰链,驱动位移由 V 型电热驱动器通过中间位移杆传递^[12-13]。本设计采用电热驱动器对微夹持机构提供驱动力及驱动位移。该微夹持机构的整体尺寸为 6 000 μm (宽) $\times$ 8 000 μm (高),厚度为 300 μm ,钳口初始距离 L 为 500 μm 。驱动器与微夹持机构一体化加工,所以驱动器位移输入杆添加在微夹持机构中部,为微夹持器左右对称结构提供驱动力及输入位移。

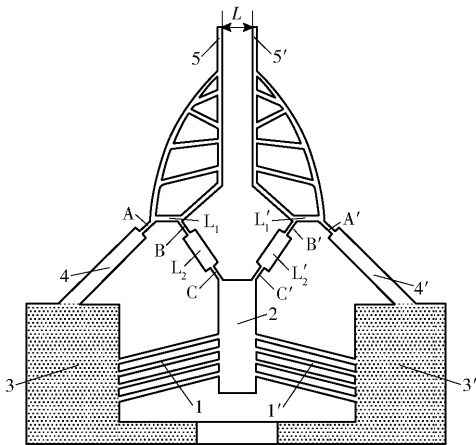


图 1 微夹持机构整体结构图

Fig. 1 Structure diagram of compliant microgripper
1、1'. V 型驱动器梁 2. 驱动器位移输出杆、夹持机构位移输入杆 3、3'. 固定电极板 4、4'. 固定刚性杆件 5、5'. 钳口刚性杆件 A、A'. 第 1 柔性铰链 B、B'. 第 2 柔性铰链 C、C'. 第 3 柔性铰链 L_1 、 L_1' . 钳口刚性杆件底部连接部位 L_2 、 L_2' . 刚性杆件

微夹持机构的运动过程可以描述为:在左右固定电极板施加合适电压后,由于 V 型驱动梁上镀有铜层,电路通路,铜层由于电阻存在产生热量,进而将热传导到铜层下方 SU-8 胶上,SU-8 胶产生热膨胀。V 型驱动梁两侧产生相同位移变形,推动位移输出杆向上运动,将运动和力依次通过柔性铰链 C、C',刚性杆件 L_2 、 L_2' ,柔性铰链 B、B',钳口刚性杆件底部连接部位 L_1 、 L_1' ,柔性铰链 A、A',固定刚性杆件 4、4' 进行传递,最终钳口刚性杆件 5、5' 通过柔性铰链 A、A' 绕固定刚性杆件 4、4' 进行转动,钳口张开。闭合过程即释放电压,各杆件依靠弹性势能恢复原位的过程。电热驱动柔顺微夹持机构各主要部件尺寸见表 1。

表 1 微夹持机构各杆件尺寸
Tab. 1 Steam size of microgripper

参数	杆件							
	1	C	L_2	B	L_1	A	4	5
长度/ μm	2 000	300	800	300	800	300	2 200	3 900
宽度/ μm	100	80	300	80	110	80	300	100
与 x 轴夹角/ $^\circ$	10	55	55	55	0	45	45	90

2 伪刚体模型

由于柔顺微夹持机构的运动分析十分复杂,本文采用伪刚体模型方法^[14-16],将其简化成为带弹簧的刚性铰链四杆机构,这样可以用传统的刚性机构分析方法来解决柔顺机构分析的难题。

根据伪刚体模型法,将柔性铰链处简化为含有扭转弹簧的活动铰链,认为柔性铰链仅产生转角变形且转角很小,无伸缩及其他变形^[17-18],其他各连杆为刚性杆,取微夹持器左侧为分析对象,建立如图 2 所示模型。柔性铰链 A 为短臂柔铰,转动中心等效在铰链中心;铰链 B、铰链 C 为活动铰链,特征半径为 γl 。

将微夹持机构简化为图 2 所示伪刚体模型,建立如图 2 所示的坐标系,滑块 D 即为图 1 中位移输出杆 2。由微夹持机构运动规律可知,因为滑块只

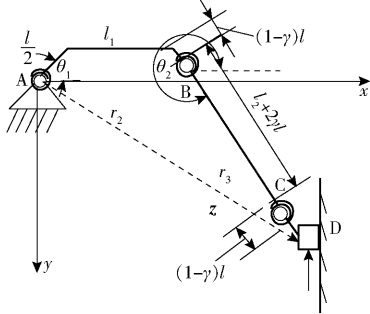


图 2 伪刚体模型

Fig. 2 Pseudo-rigid-body model

产生垂直向上的驱动位移,所以铰链 A 与滑块 D 水平方向距离保持不变,即线段 AD 在 x 轴上的分量保持不变,可得

$$\frac{l}{2}\cos\theta_1+l_1\cos(\theta_1-\theta_{10})+(l_2+2l)\cos\theta_2=r \quad (1)$$

式中 θ_1 ——柔性铰链 A 与 x 轴夹角
 θ_{10} ——柔性铰链 A 与 x 轴夹角初始角
 θ_2 ——柔性铰链 B 与 x 轴夹角
 l ——柔性铰链长度
 l_1 ——钳口刚性杆件底部连接杆长度
 l_2 ——刚性杆件长度

对式(1)求一阶导数可得

$$\frac{\delta\theta_2}{\delta\theta_1}=-\frac{l_1\sin(\theta_1-\theta_{10})+\frac{l}{2}\sin\theta_1}{(l_2+2l)\sin\theta_2} \quad (2)$$

由虚功原理,对图 2 所示模型,当微夹持机构输出端不受力即没有操作对象时,可得

$$\delta W=F_{in}\delta z+\sum_{i=1}^3T_i\delta\varphi_i \quad (3)$$

其中

$$z=r\hat{i}+\left[-(l_2+2l)\sin\theta_2-\frac{l}{2}\sin\theta_1-l_1\sin(\theta_1-\theta_{10})\right]\hat{j} \quad (4)$$

式中 F_{in} ——微夹持器驱动力向量
 z ——AD 向量
 T_i ——柔性铰链 A、B、C 扭矩
 φ_i ——柔性铰链 A、B、C 转角位移

由运动规律可知

$$\begin{cases} \varphi_1=\theta_1-\theta_{10} \\ \varphi_2=\theta_1-\theta_{10}-(\theta_2-\theta_{20}) \\ \varphi_3=\theta_2-\theta_{20} \end{cases} \quad (5)$$

式中 θ_{20} ——柔性铰链 B 与 x 轴夹角初始角
则当变化量很小时可得

$$\begin{cases} \delta\varphi_1=\delta\theta_1 \\ \delta\varphi_2=\delta\theta_1-\delta\theta_2 \\ \delta\varphi_3=\delta\theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\delta z=\left[-(l_2+2l)\cos\theta_2\delta\theta_2-\frac{l}{2}\cos\theta_1\delta\theta_1-l_1\cos(\theta_1-\theta_{10})\delta\theta_1\right]\hat{j} \quad (7)$$
$$F=F\hat{j}$$

式中 F ——驱动力
伪刚体模型中扭簧做功为

$$\begin{cases} T_1=-k_1(\theta_1-\theta_{10}) \\ T_2=-k_2[\theta_1-\theta_{10}-(\theta_2-\theta_{20})] \\ T_3=-k_3(\theta_2-\theta_{20}) \end{cases} \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(3)可得

$$\delta W=F\left[-(l_2+2l)\cos\theta_2\delta\theta_2-\frac{l}{2}\cos\theta_1\delta\theta_1-l_1\cos(\theta_1-\theta_{10})\delta\theta_1\right]+T_1\delta\theta_1+T_2(\delta\theta_1-\delta\theta_2)+T_3\delta\theta_2 \quad (9)$$

进一步化简得

$$F=-\frac{A+B}{M} \quad (10)$$

其中 $A=[k_1\xi_1+k_2\xi_2(l_2+2l)]\sin\theta_2$
 $B=(k_2\xi_2-k_3\xi_3)\left(l_1\sin\xi_1+\frac{l}{2}\sin\theta_1\right)$
 $M=\frac{l}{2}(l_2+2l)\sin(\theta_2-\theta_1)+l_1(l_2+2l)\sin(\theta_2-\theta_1+\theta_{10})$
 $\xi_1=\theta_1-\theta_{10}$
 $\xi_2=\theta_1-\theta_{10}-(\theta_2-\theta_{20})$
 $\xi_3=\theta_2-\theta_{20}$

又根据柔性铰链等效伪刚体模型,扭簧刚度公式为

$$k_1=\frac{EI}{l} \quad k_2=k_3=\gamma K_{\Theta}\frac{EI}{l}$$

式中 E ——弹性模量 I ——惯性矩
由文献[1]中特征半径系数及刚度系数选取规则可得: $\gamma=0.85, K_{\Theta}=2.68$ 。

将所求刚度 k_1, k_2, k_3 代入式(10)求得

$$F=-\frac{EI}{l(l_2+2l)}\frac{\kappa-\varepsilon}{\iota} \quad (11)$$

其中 $\kappa=[\xi_1+\gamma K_{\Theta}\xi_2(l_2+2l)]\sin\theta_2$
 $\varepsilon=(\xi_3-\xi_2)\left(l_1\sin\xi_1+\frac{l}{2}\sin\theta_1\right)$
 $\iota=\frac{l}{2}\sin(\theta_2-\theta_1)+l_1\sin(\theta_2-\theta_1+\theta_{10})$

微夹持机构设计选取的初始角为 $\theta_{10}=\frac{\pi}{4}, \theta_{20}=\frac{51\pi}{36}^\circ$ 。

将微夹持器钳口简化为图 3 所示模型,将钳端看成刚体,钳端绕 O 点转动,忽略 y 方向位移,则钳口张开量为 x 方向位移。则微夹持机构单侧钳口输出位移为 E 点与 F 点在 x 方向的移动分量, E 点位移可以表示为

$$d_E=|l_m\cos(\theta+\theta_1-\theta_{10})-l_a|$$

F 点位移可以表示为

$$d_F=\left|\frac{l}{2}\cos\theta_1-\frac{l}{2}\cos45^\circ\right|$$

则微夹持机构钳口位移为

$$d=d_E+d_F \quad (12)$$

式(1)、(11)、(12)联立,在 Matlab 中编程求

解,求得微夹持机构驱动力与钳口输出位移关系曲线如图 4 所示。

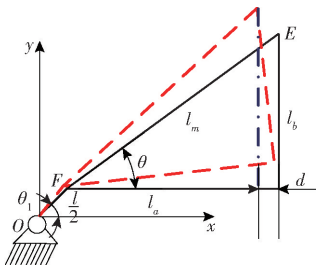


图 3 微夹持机构钳口模型
Fig. 3 Jaw model of microgripper

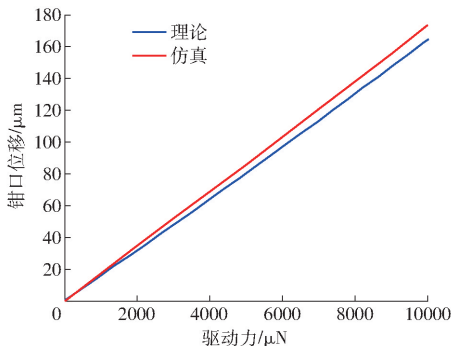


图 4 驱动力与钳口位移关系

Fig. 4 Relationship between driving force and output displacement

3 数值仿真

在 SolidWorks 中建立微夹持机构三维模型并导入 ANSYS 进行仿真。采用四节点单元进行网格划分,为保证网格划分满足之后的模型分析要求,对微夹持器采用自动网格划分,改变网格大小,使单元网格比柔性铰链小,以满足柔性铰链处的应力分析等。网格划分完成后,对模型进行约束条件的添加。固定约束添加在固定电极板 3、3',输入位移与输入力添加在中间驱动杆 2,驱动力与输入位移只需给定一个即可。基本参数及边界条件添加完成后,即可分析结果并进行计算。

驱动力给定 10 000 μN 时,根据仿真结果可得输入位移为 57 μm,微夹持机构单边钳口位移为 173.2 μm,柔性铰链处最大应力为 8.78 MPa,远小于加工材料的屈服极限,满足设计要求。取 10 组仿真数据,结果如表 2 所示。机构仿真如图 5 所示。可知在不同驱动力下,微夹持机构所对应的输入位移与输出位移。

由式(1)、(11)、(12)同样可求得微夹持机构输入位移与输出位移关系,与仿真值作对比,如图 6 所示。当微夹持机构驱动力为 10 000 μN,输入位移为 57 μm 时,仿真结果为 $d' = 173.2 \mu\text{m}$,理论结果可由式(12)求得: $d = 166 \mu\text{m}$ 。此时微夹持机构最大误

表 2 仿真结果

Tab. 2 Simulation results

$F/\mu\text{N}$	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
输入位移/ μm	5.7	11.6	17.3	23.1	28.9
钳口位移/ μm	16.9	34.3	51.6	67.9	85.7
$F/\mu\text{N}$	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000
输入位移/ μm	34.6	40.4	46.0	52.0	57.0
钳口位移/ μm	102.1	120.3	136.7	155.0	173.2

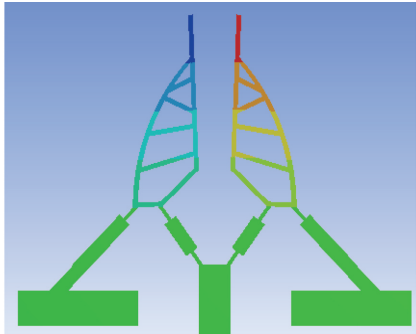


图 5 微夹持机构仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of microgripper

差为

$$\delta = \frac{|d - d'|}{d'} \times 100\% = 4.16\%$$

实际工作中,微夹持机构钳口位移在 100 μm 左右即可满足使用要求。由图 6 可求得在钳口位移为 100 μm 时,理论值与仿真值误差为

$$\delta = \frac{|d - d'|}{d'} \times 100\% = 2.8\%$$

误差产生原因为微夹持机构转换为伪刚体模型过程中,存在一定优化,但误差在允许范围内,所以可以认为微夹持机构伪刚体模型是准确的。

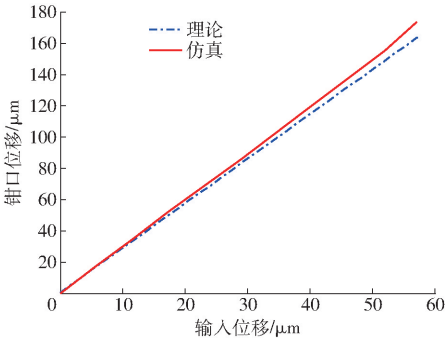


图 6 理论与仿真对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of theoretical and simulation results

4 实验

将电热驱动柔顺微夹持机构在 MEMS 工艺室进行加工制造,材料选用 SU-8 光刻胶^[19-20],如图 7 所示。

将微夹持机构集成于微操作系统,微操作系统如图 8 所示。接通电源,将驱动电压从零开始,每 0.1 V 记录一次电路电流及微夹持器钳口运动视

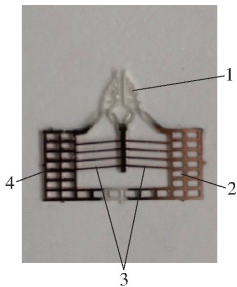


图7 加工完成的微夹持机构

Fig.7 Fabricated microgripper

1. 微夹持机构 2. 散热孔 3. V型驱动梁 4. 电极板

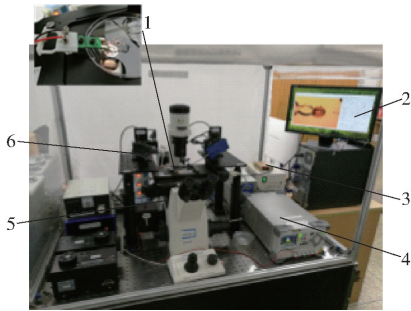


图8 微操作系统

Fig.8 Micromanipulation system

1. 夹持器 2. PC机 3. 下位机 4. DP831A型驱动电源
5. CCD相机 6. 机械手

频,取10组数据进行分析。采用相同方法记录驱动部分位移杆的运动视频,根据图像处理技术对微夹持机构运动视频进行分析,即可得到微夹持机构输出位移与驱动位移关系。

微夹持机构运动过程可由微操作系统的CCD相机拍摄并在上位机录制为视频文件,对该视频文件进行图像处理,可得到微夹持机构的运动像素个数。在相同放大倍数下对像素数进行标定,可得到每个像素实际尺寸。根据位移等于像素数与像素尺寸乘积,即可计算出微夹持机构在不同电压下的钳口输出位移。

取10组数据,电压从0.1V到1V,根据标定结果,一个像素等于1.63μm。同样条件下,记录微夹持器驱动部分在0.1V到1V电压下的移动像素数,如表3所示。

将微夹持机构移动像素数转换为位移,并与理论结果和仿真结果进行对比,如图9所示。由图9可知,微夹持机构理论结果、仿真结果与实验结果基本吻合。表4为实验结果与理论结果对比

表3 实验结果(像素数)

Tab.3 Experiment results

电压/V	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
钳口	2	4	11	20	31
驱动	0	1	2	3	5

电压/V	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
钳口	41	58	71	88	110
驱动	7	9	12	14	18

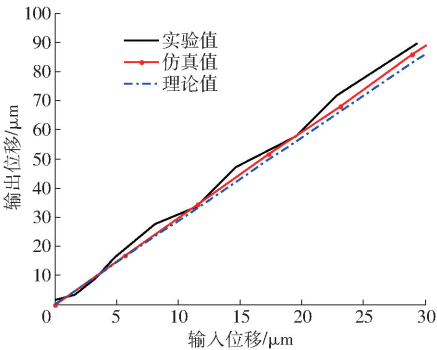


图9 位移曲线

Fig.9 Displacement curves

表4 误差分析

Tab.4 Error analysis

	输入位移/μm				
	8.15	11.41	14.67	19.56	29.34
理论钳口位移/μm	24.45	33.77	44.01	57.90	86.85
实验钳口位移/μm	25.26	33.42	47.27	57.87	89.65
误差/%	3.20	1.04	0.55	0.05	3.20

分析及误差。

由表4可知微夹持机构实验数据与伪刚体理论值误差不大于3.20%。产生误差主要原因是柔性铰链与伪刚体模型在实际运动中不完全相同以及实验过程中的材料参数变化导致,但由图9仍可得,仿真数据与理论数据基本一致,验证了该机构伪刚体模型的有效性。经实验测量,在1V电压下,单侧钳口位移可达89.65μm。可以满足尺寸在500~679μm之间操作对象的夹持操作。

5 结束语

通过建立柔顺微夹持机构的伪刚体模型,分析了该微夹持机构的运动特性,得到了微夹持机构输出位移与驱动力和输入位移关系。应用ANSYS仿真软件进行了仿真,最后通过实验验证了该模型的准确性。

参考文献

1 HOWELL L L. Compliant mechanisms[M]. New York: Wiley-Interscience,2001: 2-47.
2 王雯静,余跃庆,王华伟. 柔顺机构国内外研究现状分析[J]. 机械设计, 2007, 24(6):1-4.
3 HETRICK J A. An energy efficiency approach for unified topological and dimensional synthesis of compliant mechanisms[D]. Ann Arbor, MI:University of Michigan, 1999:2-10.

- 4 LOBONTIU N. Compliant mechanisms: design of flexure hinges[J]. Mechanical Engineering, 2002(10):93.
- 5 ZHANG Y, YU Y, ZHANG Z, et al. Structure and design of microgrippers: a survey [C] // International Conference on Cybernetics, Robotics and Control, 2017:139 – 143.
- 6 RUIZ D, DIAZ-MOLINA A, SIGMUND O, et al. Optimal design of robust piezoelectric unimorph microgrippers[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 55:1 – 12.
- 7 YU B Q, WENG H S, QIU L F. Design and optimization of micro flexible gripper[C] // International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, IEEE, 2011:4890 – 4893.
- 8 VEROITI M, DOCHSHANOV A, BELFIORE N P. A comprehensive survey on modern microgrippers design: mechanical structure [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(6):060801.
- 9 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性机构与 MEMS[J]. 光学精密工程,2001,9(1):1 – 5.
- 10 HUANG S C, LEE C M. Optimal design of microgripper[C] // International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2006:153 – 156.
- 11 郝秀春. 电热驱动微夹钳的拓扑设计及相关问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
HAO Xiuchun. Study on topology design and the related problem of electrothermal microgripper [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 12 ZHANG Z, YU Y, LIU X, et al. A comparison model of V- and Z-shaped electrothermal microactuators [C] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2015:1025 – 1030.
- 13 余跃庆, 徐齐平. 柔顺机构 PR 伪刚体动力学建模与特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(3):225 – 229. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130341&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.041.
YU Yueqing, XU Qiping. Dynamic modeling and characteristic analysis of compliant mechanisms based on PR pseudo-rigid-body model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3):225 – 229. (in Chinese)
- 14 IAMONI S, SOMA A. Design and building-up of an electro-thermally actuated cell microgripper [C] // Recent Advances in Mechanical Engineering Series,2014:125 – 130.
- 15 余跃庆,张娜. 含拐点的柔顺机构动力学建模及分析[J]. 北京工业大学学报,2018,44(4):489 – 496.
YU Yueqing, ZHANG Na. Dynamic modeling and characteristic analysis of compliant mechanisms with inflection point[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(4):489 – 496. (in Chinese)
- 16 李渊,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学模型[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):345 – 353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150749&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.049.
LI Yuan, YU Yueqing. Dynamic model of parallel robot with compliant joints[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):345 – 353. (in Chinese)
- 17 RAGHAVENDRA M R A, KUMAR A S, JAGDISH B N. Design and analysis of flexure-hinge parameter in microgripper [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9 – 12):1185 – 1193.
- 18 WANG D H, YANG Q, DONG H M. A monolithic compliant piezoelectric-driven microgripper: design, modeling, and testing [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1):138 – 147.
- 19 ZHANG R, CHU J. A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation[J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(1):89 – 97.
- 20 MENCIASSI A, SCALARI G, EISINBERG A, et al. An instrumented probe for mechanical characterization of soft tissues[J]. Biomedical Microdevices, 2001, 3(2):149 – 156.