

基于压电驱动的多指微操作工具及实验研究

孟凯, 陈涛, 杨湛, 刘会聪, 孙立宁

(苏州大学 江苏省先进机器人技术重点实验室 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021)

摘要:针对目前微纳操作对微纳操作工具的需求,设计并制造了一种结构简单、柔性模块化、高精度的压电驱动的多指微操作工具。通过实验验证了该多指微操作工具在单指、双指及三指工作模式下均能良好地完成相应的微纳操作,操作成功率在85%以上,夹持范围为10~800 μm 。通过改变执行末端,调整操作策略,可完成对不同尺寸、材质、结构的微球的拾取与释放。同时,使用多指微操作工具完成微球组装与超显微成像微球操作实验,证明了该操作工具具有重要的实际应用意义。

关键词:微纳操作器;微机电系统;压电驱动器;柔性操作器;多指执行器

中图分类号:TN384;TP241.3

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.010

Experimental Study on Piezoelectric Driven Micro-operating Actuator With Multi-fingered Structure

MENG Kai, CHEN Tao, YANG Zhan, LIU Huicong, SUN Lining

(Nano Science and Technology, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Robotics &

Collaborative Innovation Center of Suzhou, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: According to the demands of micro-manipulation tools in the field of micro-nano manipulation, a modular multi-finger micro-operating tool with simple-structure, high-flexibility and high-precision was designed and fabricated. Each finger in the actuator was driven by piezoelectric ceramic actuator. The experiments on the multi-finger micro-operating actuator under the single-finger, double-finger and triple-finger working modes were carried out to verify the abilities of manipulating various micro-targets with sizes ranging from 10 μm to 800 μm , and the success rate of more than 85% was achieved. The pickup and release of microspheres with different sizes, textures and structures can be completed by changing the end-effectors and adjusting the operating strategy. At the same time, the experiments of the microsphere self-adhesive assembly and the microsphere operation of ultra-microscopic were carried out by using multi-means micro-operation tool, which proved that the operation tool has important practical application significance.

Key words: micro-manipulators; micro-electro-mechanical systems (MEMS); piezoelectric actuators; flexible manipulators; multi-finger actuator

0 引言

近年来,微纳操作技术在生物工程、光学工程、微纳装配和微电子技术中被广泛运用,而负责实现微对象拾取、搬运、装配的微纳米操作工具也得到了快速发展。多种不同类型的微操作工具已被开发与制造,但其结构复杂,研发周期长,且大部分功能单一,柔性较差,夹持范围小,操作对象类型有限^[1-4]。

同时,微尺度操作时,存在范德华力、表面张力、静电力等粘附力,粘附力是影响微纳操作工具操作微对象的关键因素。现有的微操作工具无法很好地控制粘附力对操作的影响,在拾取和释放微对象时可靠性与精度较差。所以,在微纳操作领域急需能够良好控制粘附力,成本低,操作范围广,柔性强的微纳操作工具。

收稿日期:2017-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61673287,61433010);国家“八六三”计划基金资助项目(2015AA042601)

作者简介:孟凯(1994-),男,江苏扬州人,硕士,主要从事微纳操作的研究。通信作者:陈涛(1980-),男,河南三门峡人,副教授,博士,主要从事微驱动与微操作的研究。E-mail:cht22@sina.com。

针对以上问题,设计并制造了一种多指微操作工具,其具有较大夹持范围,结构简单,基于模块化设计,便于零件的改进与更换;同时,可更换的执行末端及不同的操作方式,使得该微操作工具能够操作不同尺寸、材质、结构的微对象。由于压电驱动方式具有输出位移分辨率高,输出力大,响应快及无间隙等优点^[5],故本设计采用压电陶瓷致动器作为驱动部件。为了验证该多指微操作工具的工作性能,本文通过实验验证了微操作工具在单指、双指及三指模式下,对不同尺寸及材质的微球的操作能力。通过微球组装及超分辨率成像微球操作实验,验证了该多指微操作工具的实际应用能力。

1 多指微操作工具

1.1 多指微操作工具整体结构

多指微操作工具的整体结构如图1所示。3个单指微操作工具分别安装在微动调节座的左、中、右的位置,微动调节座能对每个单指在3个自由度方向进行微动调节。每个单指微操作工具均是独立的单指模块,方便安装和损坏后的更换,单指模块均使用相同的设计方案与加工方法,从而具有相同的输出特性。多指微操作工具的整体尺寸约为107 mm × 94 mm × 67 mm。

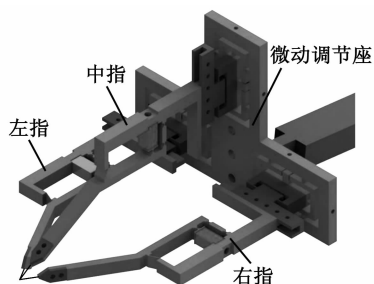


图1 多指微操作工具整体结构

1.2 单指结构

单指结构的设计采用杠杆放大原理,选用压电陶瓷致动器作为驱动,图2为杠杆原理示意图。压电陶瓷作用于A点,使单指的位置从 OB_1C_1 移动到 OB_2C_2 ,偏转角 θ_3 为

$$\theta_3 = \arctan(e/f) \quad (1)$$

执行末端的运动轨迹公式为

$$\begin{aligned} [x + c \times \cos(\theta_1 + \theta_2)]^2 + \\ [y - c \times \sin(\theta_1 + \theta_2)]^2 = c^2 \end{aligned} \quad (2)$$

执行末端在y方向的位移为

$$y = c \times \cos(\theta_1 + \theta_2) - b \quad (3)$$

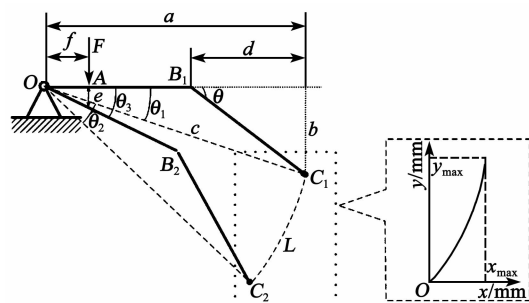


图2 杠杆原理示意图

实际设计时, $a=62.5$ mm, $b=17.33$ mm, $c=64.86$ mm, $f=5.5$ mm, $\theta=30^\circ$ 。图3为单指微操作工具的结构示意图。图中,z轴微动调节座用来连接单指与微动调节座;有5对固定螺纹孔,每对固定螺纹孔均可用来安装单指模块,从而可根据不同尺寸的操作对象,调节相应的夹持范围。压电陶瓷致动器通过预紧螺钉安装在单指模块内,选用有较大输出范围的叠层式压电陶瓷制动器。柔性铰链选用直圆柔性铰链。回弹机构用于确保执行末端随压电陶瓷振动的可靠性与灵敏度。执行末端采用可替换的设计方式,可以使用不同的执行末端来完成不同的操作任务,执行末端使用可拆卸粘接剂实现固定。压电陶瓷提供0~150 V的驱动电压,通过激光测距探头可测得单指位移为0~21.7 μm,则双指的夹持范围为0~43.4 μm,单指执行末端的位移分辨率为145 nm/V。

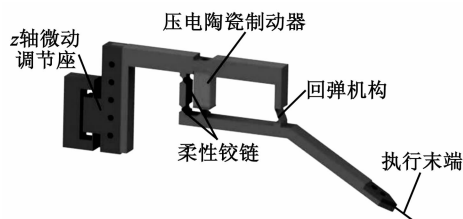


图3 单指结构示意图

1.3 微动调节座

微动调节座的结构如图4所示,它有3个调节块,每个调节块包含2个通孔和1个螺纹孔,用于安装与调节单指微操作工具。

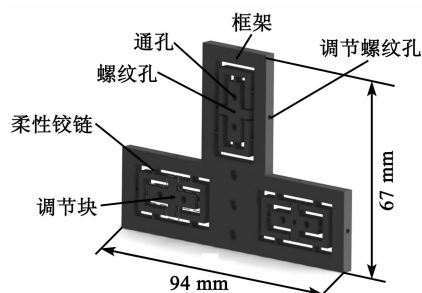


图4 微动调节座结构示意图

调节块通过倒圆角直梁型柔性铰链与调节座框架相连接,在每个调节块周围,都会在调节座框架上制出对应的 3 个螺纹孔,转动安装在这些螺纹孔上的调节螺钉,可实现调节块在 x 、 y 方向的微动调节,安装在调节块上的单指微操作工具的位置也会相应地被调节。

2 实验研究

2.1 实验系统组成

实验系统如图 5 所示,多指微操作工具安装在三轴精密滑台上,基板及操作对象放置在两轴精密滑台上,通过精密滑台的移动,使操作工具能够精确地接近被夹持对象。两套工业相机和显微镜头被安装在三轴精密滑台上,通过显示屏能够方便地观测操作过程。实验系统所使用的精密滑台的分辨率为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。为了提高微操作的可靠性,整个实验系统放置在温度、湿度可控的洁净间内。

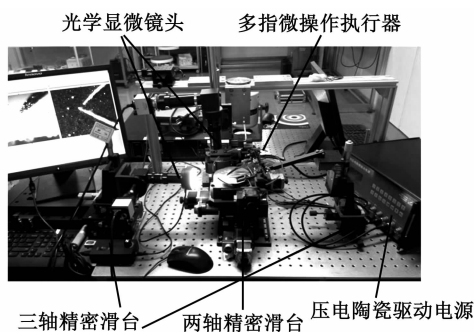


图 5 微动操作实验平台

各个单指工具为独立的操作单元,因此,多指微操作工具可以根据具体的操作任务切换单指、双指及三指工作模式。

2.2 单指操作实验

单指操作时,依靠粘附力对微对象进行拾取与释放,如图 6(a)所示,使用钨探针作为单指执行末端,利用粘附力,拾取直径为 $\varnothing 80\ \mu\text{m}$ 的硼酸硅盐微球。由于用来释放微球的基板上涂了能增大粘附力的胶质,所以,微球能够被粘附在上面,从而实现释放。如图 6(b)所示,通过单指的搬运操作,将微球在基板上摆出“SUDA”的字样。经过 50 次单指操

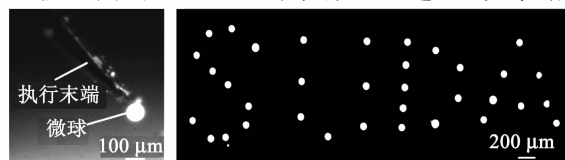


图 6 单指操作实验

作实验,拾取成功率为 86%,释放成功率为 88%。

2.3 双指操作实验

相较于单指操作,双指操作具有更强的加持能力,能够不依赖于粘附力拾取微对象。如图 7(a)~(c)所示,两钨探针作为执行末端,在压电陶瓷致动器的驱动下,夹持直径为 $\varnothing 60\ \mu\text{m}$ 的硼酸硅盐球,通过移动精密滑台,使微球离开基板,完成拾取操作。但在释放微球时,仍然要考虑粘附力的影响,如图 7(d)所示,与单指操作时一样,微球被放置在涂了胶质的基底上,并通过双指的搬运被排成了一列。利用该方式进行 50 次实验,拾取成功率为 96%,释放成功率为 90%,操作可靠性较高。

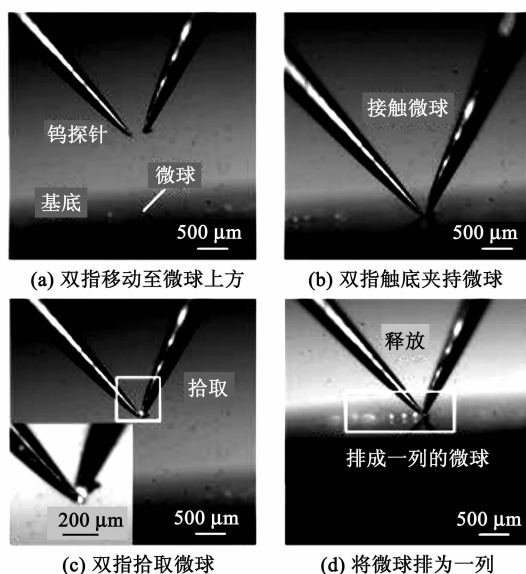


图 7 双指钨探针排列微球实验

在操作空心、易碎、大体积的物体时,采用上述的机械夹持方式时,会破坏操作对象的结构,故而需要改变操作策略与执行末端。以直径为 $\varnothing 800\ \mu\text{m}$ 的空心二氧化硅球为例,采用粘附拾取与振动释放的操作方式,如图 8(a)所示,中指与右指采用光纤作为执行末端,利用执行末端与空心微球之间的粘附力完成拾取操作。室温下,经过 50 次实验,单根光纤的拾取成功率较低,仅为 42%。为了提高操作可靠性,两根光纤同时进行拾取操作,以增大对微球的粘附力,操作成功率提高至 88%。在释放时,对中指的压电陶瓷致动器施加正弦信号,使中指的执行末端产生振动,敲击空心微球,完成释放,图 8(b)为空心微球的释放状态。经过 20 次实验,当施加电信号电压 20 V、频率 1 000 Hz 时释放成功率为 85%。

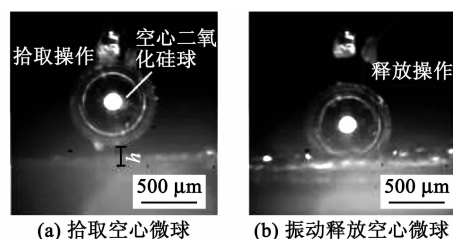


图 8 双指光纤操作空心微球实验

上述的粘附拾取与振动释放的操作方式同样适用于其他类型的操作对象。调整光纤角度,可以操作直径为 $\varnothing 80\ \mu\text{m}$ 的合金球。图 9(a)为利用粘附力将合金球拾取的过程,由于微球较小,故只用单一执行末端粘附拾取微球。如图 9(b)所示,将中指移动到微球上方,同样利用压电陶瓷产生振动,将微球敲击释放。经过 10 次实验,当对压电陶瓷施加电信号的电压为 20 V,频率在 1 000 Hz 与 1 200 Hz 时有较高的释放成功率,可以达到 90%。

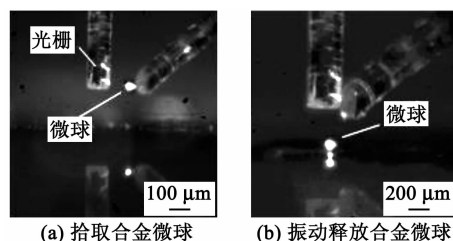


图 9 双指光纤操作合金微球实验

由于双指的相互协作,相较于单指而言,双指操作模式有更大的夹持范围,可操作多种微对象,操作过程不完全依赖粘附力的改变。

2.4 三指操作实验

三指工作模式中,左指与右指两指夹持操作对象,中指敲击或振动释放微对象。三指工作模式能对尺寸更微小的对象进行精密操作,图 10 是三指操作直径为 $\varnothing 10\ \mu\text{m}$ 二氧化硅的微球的过程。图 10(a)为各单指的执行末端,左指为 AFM 探针,中指与右指为钨探针。由图 10(c)可知,当微球被搬运到目标位置时,左、右两指张开,由于微球与执行末端之间的粘附力,微球会粘附在钨探针上,无法被释放,这时便需要第 3 指来协助完成释放操作。由图 10(d)、(e)可知,中指移动至微球正上方,通过压电陶瓷致动器产生振动,将微球敲击释放到基板上。整个操作过程,不论是拾取还是释放均不依赖于粘附力,即操作时无需对基板进行任何特殊处理。三指工作模式有更强的适应能力,能满足更苛刻的操作条件。

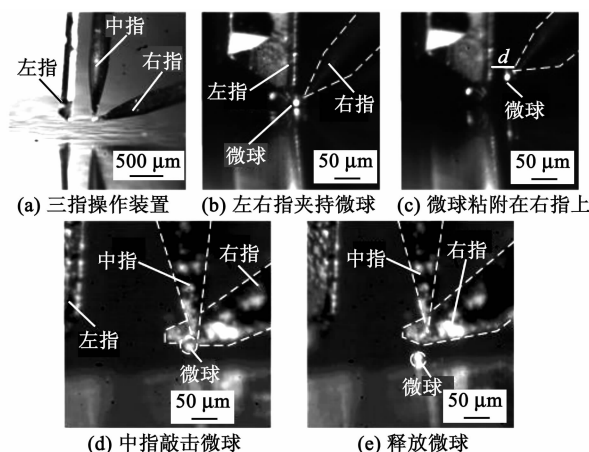


图 10 三指操作实验

2.5 拓展应用实验

拓展应用实验分为多层微球的自粘附组装操作和超分辨率成像微球操作实验。

多层微球组装操作,是在单层微球的基础上完成第二层微球的组装。本次实验的目的是用微球完成三棱锥的组装,图 11(a)为已经组装好的三棱锥第一层,3 个微球两两相邻,微球半径为 $60\ \mu\text{m}$ 。图 11(b)中,两个钨探针执行末端夹持一个尺寸相同的微球,该微球将作为三棱锥的第二层,放置在 3 个底层微球上。由于要利用微球与微球之间的粘附力完成自粘附释放,故需要通过提高温度、增大表面粗糙度和静电处理等方式来减小微球与钨探针之间的粘附力,以增大实验成功率。由图 11(c)、(d)可知,微球在接触底层 3 个微球时,能被粘附在 3 个微球之上,完成微球三棱锥的组装。该实验完成了微对象的三维组装,具有重要的现实意义。

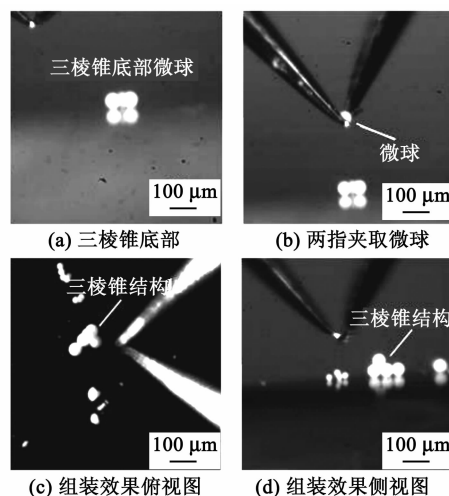


图 11 微球组装实验

利用微球透镜可以实现光学显微镜突破衍射极

限,实现超分辨率成像,其结构图如图 12(a)所示,但是,将微球洒落在样品表面的传统方法,无法控制微球的位置,并有可能破坏样品表面结构。利用多指微操作工具可以控制微球的释放位置,从而对样品表面的特定区域显微成像。通过组装微球可以对样品表面连续的一整块区域进行观察,从而拓展显微区域,其效果如图 12(b)所示。

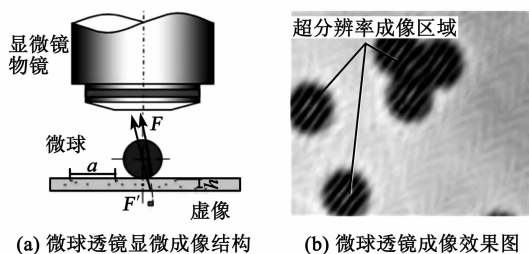


图 12 超分辨率成像微球实验

3 结束语

本文设计并制造了一种基于压电驱动的多指微操作工具,该微操作工具具有柔性化工作特性,由 3 个单指微操作工具和微动调节座组成,结构简单,有较大的夹持范围。每个单指的执行末端可更换,以适应不同的操作任务。通过实验分别验证了微操作工作单指、双指及三指的工作能力,拾取与释放操作成功率在 85% 以上。采用不同的操作方式,能够对不同材质、结构的微球进行操作,操作的微球尺寸最小为 $10\ \mu\text{m}$,最大为 $800\ \mu\text{m}$,其中,三指操作模式能够不依赖于粘附力完成微纳操作。利用该多指微操作工具完成了微球组装和超分辨率成像微球操作的实验,这样的拓展应用证明了该操作器具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 郝永平,董福祿,张嘉易,等. 基于 MEMS 机构装配的微夹持器研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(5): 596-601.
HAO Yongping, DONG Fulu, ZHANG Jiayi, et al. Study on micro-gripper based on MEMS mechanism assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(5): 596-601.
- [2] XU Qingsong. Design, fabrication, and testing of an MEMS microgripper with dual-axis force sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 6017-6026.
- [3] 高群,周鹏骥,王晓东. 一种非对称式压电驱动微夹持器[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(6): 435-440.
GAO Qun, ZHOU Pengji, WANG Xiaodong. An asymmetric micro-gripper actuated by piezoelectric ceramics[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(6): 435-440.
- [4] 包丽雅,周嫔. 用于微装配的二级放大微夹持器的设计与实验[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(1): 47-49.
BAO Liya, ZHOU Xian. Design of micro-gripper with two-stage amplifier for micro-assembly and its experimental research[J]. Machine Design and Research, 2014, 30(1): 47-49.
- [5] 姚萌,杜慧玲,史翔,等. 无铅压电叠层驱动器极化工艺及驱动性能研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 92-96.
YAO Meng, DU Huiling, SHI Xiang, et al. Study on the polarizing technique and driving performance of stack actuator based on lead-free piezoelectric ceramic[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1): 92-96.

(上接第 41 页)

子的压电陶瓷执行器动态 Preisach 迟滞模型[J]. 中国机械工程, 2009, (12): 1468-1472.

LI Li, LIU Xiangdong, HOU Chaozhen, et al. Dynamic hysteresis preisach model of a piezoceramic actuator based on asymmetric exponential function hysteresis operators[J]. China Mechanical Engineering, 2009, (12): 1468-1472.

- [4] TZEN J J, JENG S L, CHIENG W H. Modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design[J]. Precision Engineering, 2003, 27(1): 70-86.

- [5] 曾祥进,黄心汉,王敏. 基于 Dahl 模型的压电陶瓷微夹钳控制研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(7): 766-769.
ZENG Xiangjin, HUANG Xinhan, WANG Min. Study

on piezoelectric micro-gripper's control based on dahl model[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(7): 766-769.

- [6] 李巍. 压电作动器迟滞非线性建模与补偿控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

- [7] 郭亚子,朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. 压电与声光, 2017, 39(04): 520-524.

GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectrics stack actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(04): 520-524.

- [8] 李丽,牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.