

文章编号 1004-924X(2009)08-1928-07

复合式 MEMS 微夹持器的研制

陈立国, 刘柏旭

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为实现对亚毫米微小构件稳定夹取及可靠释放等操作,研制了一种复合式微夹持器。采用有限元软件分析了微夹持器的机构及动力特性。应用 MEMS 体硅工艺将静电梳齿驱动与气动吸放集成构成复合式驱动,气动吸放的引入改善了微夹持器的操作性能,S形柔性梁结构的设计将梳齿驱动的直线运动转化成末端夹爪的转动实现了夹持操作。两种不同尺寸的微夹持器,有效扩展了微夹持器的夹持范围。根据微夹持器的操作控制需求,设计了微夹持器静电驱动控制系统以及气压控制系统。在 80 V 的驱动电压下,微夹持器末端夹爪位移可达 25 μm 。针对 100~200 μm 的小球进行了微操作实验,实验结果表明,静电梳齿驱动结合真空吸附能够使夹取操作更加稳定,基于闭环控制的气路正压力能有效克服小球与夹爪之间的粘附力,实现可靠的释放操作。微夹持器基本满足 100~200 μm 微小构件的操作需求。

关键词:微机电系统;微操作;微夹持器;静电梳齿驱动;气动吸放

中图分类号:TH703.6;TN305 **文献标识码:**A

Development of hybrid-type MEMS microgripper

CHEN Li-guo, LIU Bai-xu

(*Robotic Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: In order to realize the steady and reliable operations of microobjects, a hybrid-type electrostatic silicon microgripper integrated with gas pipes for aspirating and blowing operations is developed and its structure and dynamic characteristics are analyzed by the Finite Element Analysis (FEA). Gas pipes integrated in this novel microgripper are used to improve its picking and placing capability and a bulk micromachining technology is employed to fabricate the microgripper from single crystal silicon wafers. The linear horizontal motion generated by an electrostatic microactuator is converted into the rotational motion of the arm by the S-type flexible beam system to realize the gripping motion. Moreover, the grippers with two different dimensions are designed to expand the manipulating range and the gas pressure control system and electrostatic comb drive control system are designed for controlling the microgripper. Experiments show that the deflection is 25 μm at the arm tip of the gripper in a driving voltage of 80 V, and the microobjects can be picked and placed successfully from 100 μm to 200 μm in the experiment, which indicates that this microgripper realizes the steady manipulation and can satisfy the micromanipulation of the microobjects from 100 μm to 200 μm .

Key words: MEMS; micromanipulation; microgripper; electrostatic comb driving; aspirating and blowing operation

收稿日期:2009-01-19; **修订日期:**2009-02-25.

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(No. 50725518); 国家自然科学基金资助项目(No. 50805040); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA042315)

1 引言

随着微机电系统 (MEMS) 的迅速发展,对微操作与微装配技术的需求日益迫切^[1]。微作业工具作为实现微操作的关键部件,是连接微观系统与宏观系统的关键环节。自 Kim 等人于 1989 年研制出静电制动微夹持器以来,以微夹持器为代表的微作业工具方面的研制受到国内外的广泛关注^[2]。随着微操作对象尺寸的逐级减小,尺度效应的影响逐渐显著。在微米级尺度下,范德华力、静电力、表面张力等表面力已经取代体积力占据主导地位^[3-4]。一方面,由于尺度效应的影响,微小器件很容易粘着于微夹持器上而实现拾取操作,但很难实现稳定释放^[5]。另一方面,微小构件形状特征以及不同的操作定位需求也对微夹持器的夹持方式提出了要求,如对象可接触位置的选择性、可接触面积的大小等,都对微夹持器的设计提出了更高的要求。因此,结构紧凑、体积小、能够对微小构件实施稳定拾取及可靠释放、并广泛适用于多种形状的微小构件、满足微小构件不同操作定位要求的微夹持器将能更好地适用于微装配作业。

本文采用体硅工艺成功研制出了静电驱动结合气动吸放的复合式 MEMS 微夹持器。在微夹持器中心刻蚀出的槽与玻璃键合后形成气路,真空负压使微夹持操作更稳定,气路正压则克服了粘附力影响可实现可靠释放,有效实现了微作业工具的集成化与小型化。

2 复合式 MEMS 微夹持器设计

2.1 微夹持器总体结构设计

静电驱动部分主要由固定梳状电极、可动梳状电极、柔性悬梁以及 S 形柔性梁等组成。在硅片背面刻蚀出的槽与玻璃键合后形成气路,用于气动吸放,夹持器的结构如图 1 所示。

柔性悬梁与 S 形梁结合,有效增大了微夹持器夹爪的夹持范围,同时将夹爪夹持表面加工成锯齿形结构可增大表面粗糙度以减小接触面的粘附力。

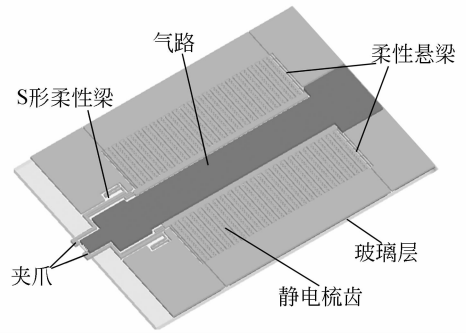


图 1 微夹持器结构模型

Fig. 1 Structure model of microgripper

微夹持器末端夹爪最大位移设计为 $25\ \mu\text{m}$,为适应不同尺寸的操作对象,设计了两种尺寸的微夹持器,一种张合量为 $100\sim 150\ \mu\text{m}$,另一种为 $150\sim 200\ \mu\text{m}$,工作过程中可以根据操作对象的尺寸大小,选择相对应的微夹持器。

2.2 微夹持器工作原理

静电梳齿驱动部分在固定梳状电极和可动梳状电极之间施加电压,固定梳状电极不动,可动梳状电极使柔性悬梁发生形变,S形柔性梁构成位移放大与转换结构,将柔性悬梁所产生的纵向位移转换为微夹持器夹爪横向的张合位移,同时进行位移放大,从而带动夹持器末端夹爪运动。

拾取操作时,静电驱动配合真空吸附实现稳定夹取;释放操作时,基于闭环控制的气路正压力有效克服粘附力的影响实现可靠释放。

2.3 静电驱动设计

2.3.1 结构设计

设计了侧向平动矩形梳齿结构,梳齿静电驱动结构如图 2 所示。

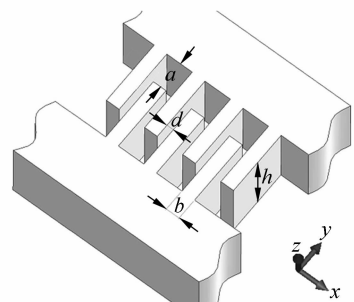


图 2 梳齿结构示意图

Fig. 2 Dimensions of comb finger electrodes

如果忽略边缘效应的影 响,静电驱动力为^[6]:

$$F_y = \frac{dE}{dy} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{dy} = n\epsilon U^2 \frac{h}{d} - \left(n - \frac{1}{2}\right) \epsilon U^2 \frac{bh}{a^2}, \quad (1)$$

式中 ϵ 为介电常数, b 为梳齿的宽度, n 为梳齿对数, d 为梳齿之间的间隙, a 为平动梳齿与固定梳齿两侧非交错部分的长度, h 为侧向平动梳齿在 Z 方向上的厚度, U 为作用在梳齿对两端的驱动电压。

2.3.2 结构尺寸设计

拟定的设计目标为针对 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的微小构件进行微操作的微夹持器,根据设计需求,设计微夹持器夹爪开合量为 $50 \mu\text{m}$,并设计了两种尺寸的微夹持器。由公式(1),静电驱动力与梳齿对数、梳齿厚度以及电压的平方成正比,与梳齿间隙成反比,依此指导结构尺寸设计,设计参数如表 1 所示。通过计算验证,所设计的微夹持器满足设计需求。

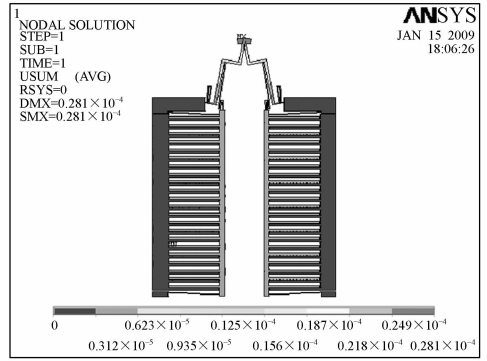
表 1 微夹持器具体尺寸参数

Tab.1 Detailed dimensions of microgripper

梳齿对数	2 904	梳齿厚度	$50 \mu\text{m}$
梳齿间隙	$2.5 \mu\text{m}$	梳齿宽度	$5 \mu\text{m}$
器件厚度	$50 \mu\text{m}$	器件尺寸	$6\ 000 \mu\text{m} \times 4\ 200 \mu\text{m}$ (两种) $6\ 000 \mu\text{m} \times 4\ 000 \mu\text{m}$

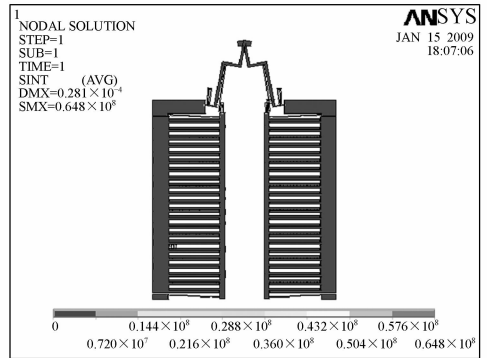
2.3.3 有限元分析

应用 ANSYS 10.0 对微夹持器进行位移及应力分析,以 N 型硅为原材料(100 面),弹性模量 E 取 169 GPa ,泊松比取 0.278 ,建立微夹持器的有限元模型。采用三维四面体单元 SOLID92 对实体模型进行单元划分。当动齿与定齿之间施加的电压为 80 V 时,由公式(1)计算出静电力大小。在 ANSYS 仿真分析中将所计算出的静电力作为载荷施加给微夹持器,ANSYS 仿真分析得到梳齿直线位移为 $8 \mu\text{m}$,夹爪在驱动力作用下绕 S 形梁的固定点转动,转化成水平位移为 $28 \mu\text{m}$,位移约放大了 3.5 倍。微夹持器的有限元分析如图 3 所示。



(a) 位移分析

(a) Displacement of microgripper



(b) 应力分析

(b) FEA of stress

图 3 微夹持器有限元分析

Fig.3 FEA of microgripper

为了对微夹持器的动态性能做出预测,使用 ANSYS 10.0 提供的子空间法(subspace)求解器对该系统结构进行模态分析,表 2 为分析得出的前四阶模态的频率,相应的模态振型如图 4 所示。

表 2 微夹持器固有频率

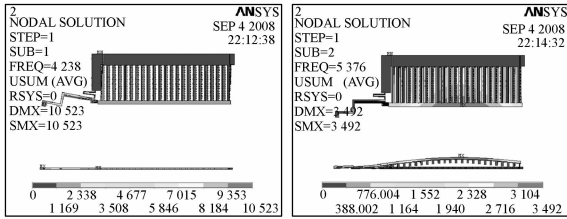
Tab.2 Resonant frequency of microgripper

阶数	1	2	3	4
频率 (Hz)	4 238.4	5 375.8	7 871.7	10 081

图 4 (a)、(b)、(c)、(d)分别为夹持器的第一、第二、第三和第四阶模态振型图。

从微夹持器模态分析图可以看出,第一阶振动模态表示 Z 方向上的驱动梳齿保持不变,梳齿

沿着 X 方向运动,驱动夹持端张合;第二、三、四阶振动模态在 X 和 Y 方向上梳齿和夹持端几乎保持不变,而是在 Z 方向上振动。其中,第一阶模态振型是微夹持器工作过程所需要的。

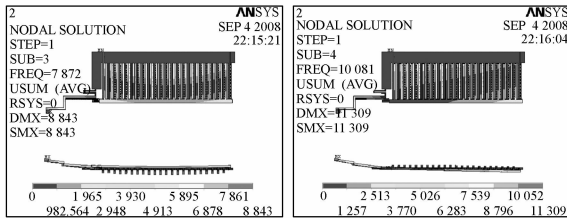


(a) 一阶模态

(b) 二阶模态

(a) The first model

(b) The second model



(c) 三阶模态

(d) 四阶模态

(c) The third model

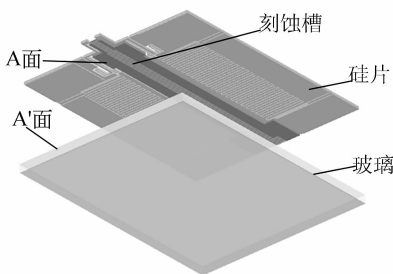
(d) The fourth model

图 4 微夹持器模态分析图

Fig. 4 Model shapes of microgripper

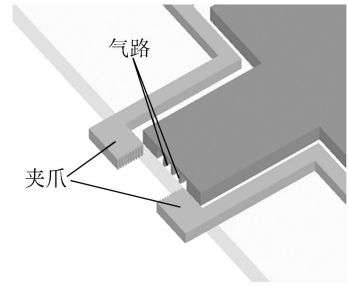
2.4 微夹持器气路设计

为实现 MEMS 集成化与小型化的要求,采用体硅工艺加工出微夹持器的气路。首先在硅片背面刻蚀出若干个槽,而后再将硅片背面(A 面)与玻璃 A'面键合形成气路。气路形成过程及结构如图 5 所示。



(a) 气路形成示意图

(a) Vacuum formation



(b) 微夹持器末端结构

(b) End effector

图 5 气路结构

Fig. 5 Structure of gas pipes

每个槽的截面尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$,键合后气路末端形成 2 个或 4 个方孔(两种尺寸微夹持器),以满足对不同尺寸微构件的操作要求。

2.5 微夹持器加工工艺

深度反应离子刻蚀技术(DRIE)的日益成熟^[7],使得采用体硅微机械技术制作微夹持器成为可能。微夹持器材料选择双面抛光的 N(100)型硅片,厚度为 $300\ \mu\text{m}$,设计工艺流程:(a) 背面上光刻出中心通气孔的槽;(b) 采用 DRIE 工艺在背面刻蚀出气路窗口,刻蚀深度为 $55\ \mu\text{m}$;(c) 涂光刻胶;(d) 光刻释放窗口;(e) 采用 DRIE 工艺在背面刻蚀释放窗口,刻蚀深度为 $20\ \mu\text{m}$;(f) 进行硅玻璃键合;(g) 使用 KOH 溶液将硅层减薄至 $70\ \mu\text{m}$,而后在硅层表面溅射一层 Al,形成电极;(h) 光刻梳齿及末端结构;(i) 释放正面梳齿及末端结构。微夹持器工艺流程如图 6 所示,微夹持器电镜图及实物图如图 7、图 8 所示。

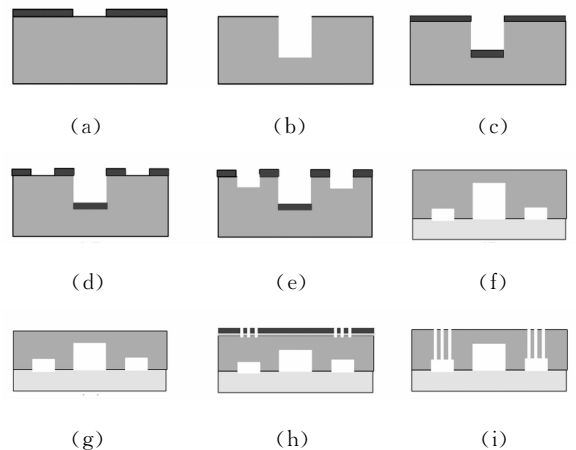


图 6 微夹持器工艺流程

Fig. 6 Processes of microgripper fabrication

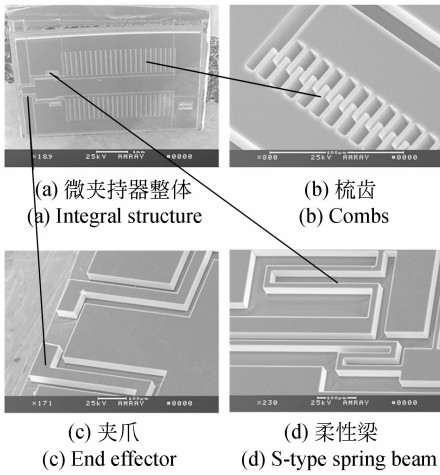


图 7 微夹持器电镜图

Fig. 7 SEM images of gripper

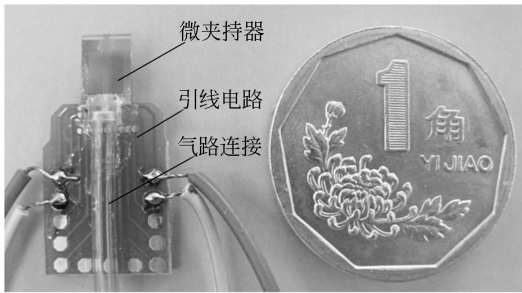


图 8 微夹持器实物图

Fig. 8 Photograph of microgripper

3 微夹持器驱动控制设计

3.1 静电驱动控制系统

针对静电驱动微夹持器存在驱动失稳等问题设计了静电驱动控制系统,要求其输出大范围可控的稳定电压。该控制系统采用了内嵌数模转换器的ADuC842单片机系统作为控制芯片,和信

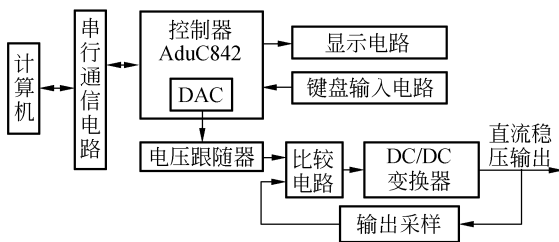


图 9 静电驱动系统控制系统原理图

Fig. 9 Schematic of comb drive control system

号采集与反馈电路一同构成闭环控制系统,控制DC/DC (Direct Current) 变换器产生大范围的稳定电压,静电驱动控制系统如图 9 所示。

3.2 气压控制系统设计

气压控制系统在夹持时负压产生吸取力,实现稳定的夹持;释放时,利用正压克服微小构件与微夹持器夹爪的粘着力实现可靠释放。因此,正压和负压是重要的控制指标,在控制系统中引入工作压力反馈来提高控制精度。控制系统原理如图 10 所示。

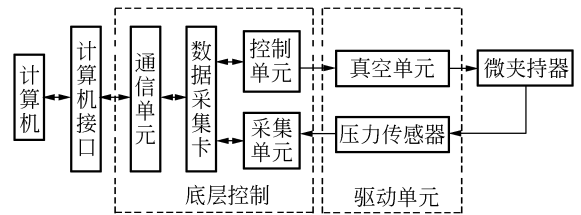


图 10 气压控制系统原理图

Fig. 10 Schematic of pressure control system

4 微夹持器性能测试及实验

复合式 MEMS 微夹持器测试系统主要由计算机(包含图像采集卡以及多功能数据采集卡)、静电驱动控制系统、气压控制系统、显微视觉摄像头、复合式 MEMS 微夹持器组成,如图 11 所示。

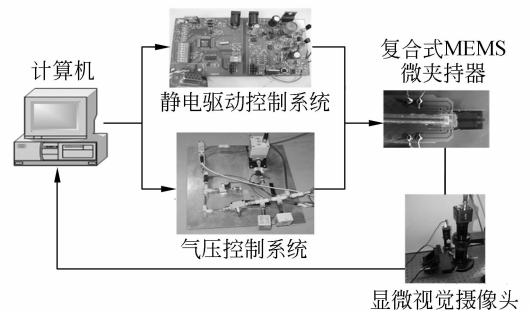


图 11 微夹持器控制系统

Fig. 11 Control system of microgripper

气路正压控制电压为 0~0.16 V,电压间隔为 0.01 V,得到的输入控制电压与微夹持器气路输出电压值特性曲线如图 12 所示。

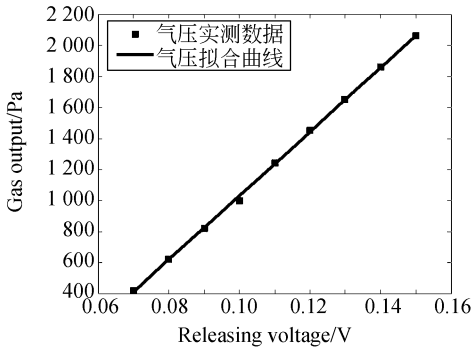


图 12 释放电压与气路输出压力特性

Fig. 12 Relationship between releasing voltage and output pressure

静电驱动控制系统输出控制电压幅值为 0~80 V,单个夹爪最大位移量为 25 μm ,所设计的两种尺寸的微夹持器夹爪开合量分别为 100~150 μm 和 150~200 μm 。由于 S 型梁的结构在进入大挠度范围会在力学上出现非线性变化,因此实际位移和理论位移值在末段有一定的偏差。但微夹持器实际张合量已满足设计和应用的要求,因此所出现的偏差不影响微夹持器正常工作。驱动电压的平方与单个夹爪位移关系如图 13 所示。

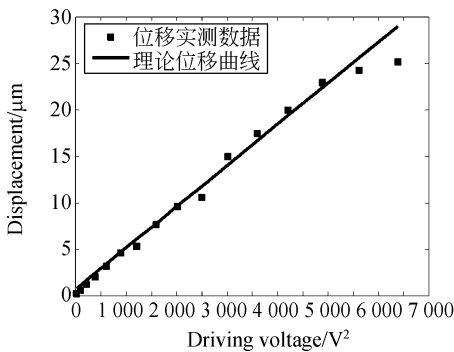
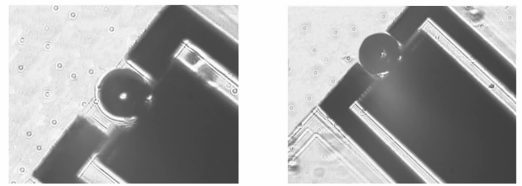


图 13 张合量曲线图

Fig. 13 Curve of opening range

利用设计的微夹持器针对 100~200 μm 的小球进行微操作实验。图 14 给出了小球拾取过程。首先真空负压将小球吸至拾取孔,而后夹爪闭合进行夹持,实现稳定的拾取操作。图 15 给出



(a) 吸附 (b) 夹持
(a) Vacuum adsorption (b) Gripping

图 14 拾取操作

Fig. 14 Picking operation

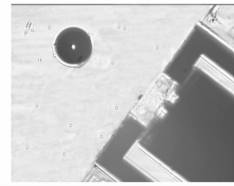


图 15 释放操作

Fig. 15 Releasing operation

了释放操作过程,夹爪张开后气路产生正压力将小球释放,通过控制气压的大小来控制释放位置。

5 结 论

本文针对亚毫米级微小构件的稳定操作等要求,设计了新型复合式驱动的微夹持器。介绍了微夹持器工作原理,设计了微夹持器的体硅加工工艺,并进行了微夹持器结构及动态性能仿真。然后设计了微夹持器控制系统。在 0~80 V 驱动电压作用下,所设计的两种尺寸的微夹持器夹爪开合量分别为 100~150 μm 和 150~200 μm 。针对 100~200 μm 的微小构件进行微操作实验,通过多次实验,证明了微夹持器对多数不同材料的微小构件都能实施稳定操作,基本能够满足 100~200 μm 的微小构件的操作要求,微操作具有一定的可靠性,并能满足微小构件不同操作定位要求,有效实现了微作业工具的集成化与小型化。

参考文献:

[1] 张培玉,武国英,郝一龙,等. 微夹钳研究的进展与展望[J]. 光学精密工程,2000,8(3):292-296.

ZHANG P Y, WU G Y, HAO Y L, et al.. Development of microgripper technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):292-296. (in Chinese)

[2] 李勇,李玉和,李庆祥. 基于体硅工艺的静电致动微夹持器制作工艺分析[J]. 光学精密工程,2003,11

(2):109-113.

LI Y, LI Y H, LI Q X. Fabrication process analysis for electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(2):109-113. (in Chinese)

- [3] 尹燕丽, 朱邦太, 陈海夔, 等. 毫米级微型机器人操作手的研制和操作特性[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6):531-534.

YIN Y L, ZHU B T, CHEN H Y, *et al.*. Design and operational properties of a manipulator for millimeter-size microrobot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(6):531-534. (in Chinese)

- [4] MENCIASSI A, EISINBERG A, IZZO I. From "Macro" to "Micro" manipulation; models and experiments [J]. *IEEE/ASME Transactions on*

Mechtronics, 2004,7(2):311-314.

- [5] SINAN HALIY O D, REGNIER S, JEAN-CLAUDE GUINOT, MAD, the adhesion based dynamic micro-manipulator[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2003,10(22):903-916.

- [6] KIM CH J, PISANO A P, MULLER R S, *et al.*. Polysilicon microgripper[J]. *Sensors and Actuators*, 1992,11(33):221-227.

- [7] 王家畴, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 基于体硅工艺的定位平台制作工艺分析研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):636-641.

WANG J CH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. Development on a micro-gripper integrating force sensor based on the MEMS technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):636-641. (in Chinese)

作者简介:



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,副教授,主要研究方向为微操作和微驱动机器人。E-mail:clg@hit.edu.cn



刘柏旭(1985—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事微操作及微驱动技术方面的研究。E-mail:liubaixu1985@163.com

● 下期预告

RBPF 多特征融合多光谱目标自适应跟踪

李春鑫¹,王孝通²

(1. 海军大连舰艇学院 博士生队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

针对复杂背景下视频目标跟踪的实时性和可靠性问题,提出了基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波的颜色矩形特征和方向边缘信息融合的自适应跟踪算法。该算法采用 Rao-Blackwellized 粒子滤波提高滤波算法性能,采用积分图像快速计算颜色特征和方向边缘信息,根据跟踪实际情形,利用模糊逻辑自适应调节各特征权值,提高算法的跟踪速度和精度。视频跟踪仿真试验表明该算法是稳健的,跟踪精度高,实时性好。能够在复杂的背景下对可见光及红外等运动目标进行有效、可靠的跟踪。