

液滴机械手的数值仿真与试验研究

张 勤¹, 刘 俊¹, 黄维军¹, 青山尚之²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 510641 广州; 2. 日本东京电气通信大学 机械工程与智能系统系, 182-8585 东京)

摘 要: 为分析液滴机械手的控制机理, 建立液滴机械手的流体动力学仿真模型, 仿真分析液滴机械手的控制机理, 研究机械手端面形成液滴的形态跟随机械手端面形状的变化关系, 讨论影响液滴机械手性能的因素, 并通过试验验证仿真模型的正确性和提出方法的可行性. 数值仿真和试验结果表明: 通过控制各钨丝棒的上下移动量, 可以改变液体和各钨丝棒的接触壁面, 使机械手端面形成液滴的形态随之改变; 基于表面张力吸附在液滴上的微小部件的姿态将随着液滴形态的改变而变化, 从而可以实现对于微小部件姿态的控制. 适当调整机械手的参数, 如钨丝棒的数目、尺寸、各钨丝棒的移动量, 以及改变液滴的性质等, 可以满足微装配过程中各种操作目标的要求.

关键词: 表面张力; 液滴; 微操作机械手; 姿态调整; 数值仿真

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)01-0097-07

Simulation and experiments of micro-manipulator based on liquid-drop

ZHANG Qin¹, LIU Jun¹, HUANG Weijun¹, AOYAMA Hisayuki²

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, 510641 Guangzhou, China;

2. Department of Mechanical Engineering & Intelligent Systems, the University of Electro-Communications, 182-8585 Tokyo, Japan)

Abstract: Numerical fluid dynamics model of a liquid-drop micro-manipulator was built to investigate its control mechanism. Computational simulation was conducted to analyze the relationship between the shape of the liquid-drop adhered to the end of the micro-manipulator and the end shape of the micro-manipulator. The factors affecting the performance of the micro-manipulator were discussed. Experiments were carried out to verify the correctness of numerical simulation model and feasibility of the micro-manipulation method as well as the implementation of the micro-manipulator. Both the experiment results and simulation results indicate that this micro-manipulator can adjust the shape of liquid drop sticking to its end by changing the boundary surface between the liquid and needles with different combinations of six tungsten needles motion. The orientation of a tiny object attached to the liquid-drop by surface tension force can be adjusted subsequently as it alters with the shape of liquid drop. The liquid-drop micro-manipulator can be used in operating different targets in micro devices assembly by changing the parameters of the micro-manipulator, such as the size, number or displacement of the tungsten needles, as well as liquid properties.

Keywords: surface tension force; liquid-drop; micro-manipulator; orientation control; numerical simulation

在微型部件的装配中, 往往涉及到微型部件位置和姿态的调整, 这对微操作装置提出了很高

的要求, 成为实现高速、高精度微装配的技术瓶颈. 目前, 国内外对于微小部件的装配, 主要有基于微夹持器的方法^[1-5]、真空吸附的方法^[6-8]、基于黏着力方法^[9-11]等. 南京航空航天大学韩江义等^[12]提出一种夹钳式力反馈微操作系统, 通过夹钳式主手, 压电陶瓷驱动的微夹持器和主从式双反馈控制模块, 可使操作者在遥微操作中有夹持力觉临场感, 实现对于微小物体的夹持和移动操作. 日本名古屋大学的 Tanikawa 等^[13]开发了

收稿日期: 2013-03-17.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (S2013010012143); 广东省教育厅高校国际科技合作创新平台资助项目 (GJHZ1002); 机器人技术与系统国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLRS-2010-MS_16).

作者简介: 张 勤 (1964—), 女, 副教授;

青山尚之 (1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 黄维军, huangwj@scut.edu.cn.

一种双指微操作手,模仿筷子夹持物体的机理,实现对于物体的拾取、移动、旋转和释放,虽然这种直接夹持方法比较稳定,但是微尺度对于传感器的精度提出了很高的要求,且由于多指结构自身的特点,难以操作侧面高度很小的部件,只能适应特定形状的微小部件的操作.真空吸附法是通过负压的方式来吸持微小部件,具有结构简单、易于控制、工作平稳等特点,在微装配中应用最为广泛,但这种方法很难直接实现微小部件的姿态调整,而且要求微小物体吸附表面的平整度和密封性.基于黏着力方法目前主要有范德华力、静电力和表面张力吸附的方法.Feddema 等^[14]提出基于范德华力拾取微球的装置,通过改变接触表面的范德华力来拾取和释放微小物体,但范德华力通常幅值比较小且难以控制.Saito 等^[15]提出了一种通过控制探针与微粒子间的静电力来吸取和释放目标微粒的装置,但静电力容易引起电磁干扰,限制了其在实际中的应用.微尺度下液体的表面张力作用明显,不易受外界干扰,而且液滴可以柔顺变形以适合各种几何形状的微小物体,因此基于表面张力吸附的方法成为黏着力吸附法的主流.哈尔滨工业大学的荣伟彬等^[16]提出了一种基于液体介质黏着作用控制的微操作机构,利用液体的表面张力来抓取物体,并通过顶出装置减小液体与目标物体之间的黏附力,实现了目标物体的释放,但这种方法也很难直接实现对操作物体的姿态调整.东京工业大学的 Sato 等^[17]提出了一种液体表面张力驱动微小部件自适应定位方法,将表面张力应用到微小部件的姿态调整中,但只能调整特定的姿态.日本埼玉大学的 Haga 等^[18]把真空吸附法和表面张力法相结合,提出了借助液体表面张力和毛细管内负压间接吸持部件的方法,这种方法避免了直接夹持对物体带来的挤压,但只能实现部件的移动操作,无法直接实现部件三维空间内姿态的调整.Aotama 等^[19-20]提出多棒型微操作机械手的结构,利用液滴的表面张力吸附微小物体,通过改变液滴的形态,改变吸附在液滴表面的微小物体姿态,从而实现微小物体位置姿态的控制.由于液滴可以柔顺变形,对吸附表面平整度和密封性要求低,液滴机械手可以广泛适用于各种几何形状的微小物体的吸附与姿态调整,完成现有夹持器很难实现的表面凸凹,片状等微小部件的位置和姿态控制,满足微操作的需要.

本文建立了液滴机械手的流体动力学仿真模型,仿真分析了液滴机械手的控制机理,研究了机械手端面形成液滴的形态与机械手端面形状的变化

关系,并通过试验验证了仿真模型的正确性和提出方法的可行性.

1 液滴机械手的原理和结构

物体表面吸附液体形成液滴,该液滴主要受到表面张力和自身重力的作用.液体表面张力与重力之间的关系通过邦德数^[21](Bond)来表示:

$$B = \rho g r^2 / \sigma.$$

其中: B 为邦德数, ρ 为液体密度, g 为重力加速度, σ 为流体的表面张力系数, r 为液滴的特征长度.随着邦德数的减小,液滴会越来越接近球状^[22].在微尺度条件下,液滴的邦德数较小(0.05~0.10),此时液滴的表面张力占主导作用,液体的自由液面端会在液体表面张力的作用下缩聚成液滴状.当自由液面所黏附的壁面运动时,液滴也会跟随壁面运动,当壁面运动到某一位置停止运动时,表面张力将与重力达到新的平衡,液滴呈现出新的形态.利用微尺度下液体的这一性质,由1根毛细管和环绕在其周围的6根钨丝微棒组成液滴机械手,钨丝棒的直径约为0.3~1.0 mm,如图1(a)所示.液体通过注射器注入到毛细微管内,流经6根棒所围成的中心区域,在机械手末端,也就是6根钨丝棒构成的先端端面,将形成液滴.通过控制各钨丝棒的上下移动量,可以改变机械手端面形状,使液体和钨丝棒壁面之间的接触线随之迁移,机械手端面形成液滴的形态也随之改变.基于表面张力吸附在液滴上的微小部件的姿态将随着液滴形态的改变而变化,从而可以实现对于微小部件姿态的控制,如图1(b)所示.

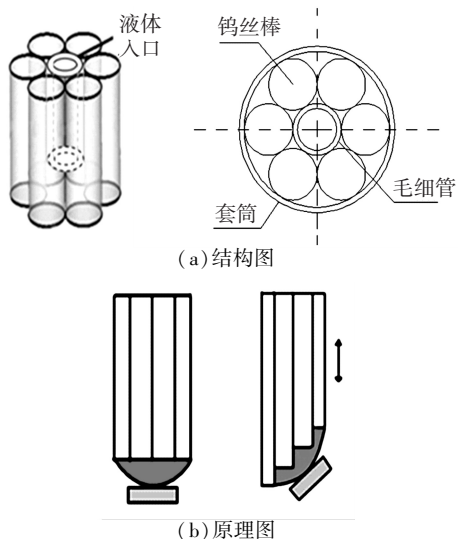


图1 机械手的结构与原理

液滴吸附微小物体时,机械手端面与物体表

面之间会形成液桥,如图 2 所示.液桥将导致固体表面和液体之间的毛细黏附作用,此时液体表面张力在竖直方向上的分量提供微小物体向上的拉升力;而水平面方向的分量提供物体侧移的力.当棒上下运动时,棒端面与操作物体端面间的间隙不断地变化,此时液桥的形态也随之不断地变化^[23],物体会在液体表面张力的作用下改变自身的姿态,去平衡微小物体重力的影响,最终达到新的平衡状态.机械手端面液滴自由液面的形态直接决定了吸持物体后形成的液桥形态,因此控制被吸附目标物体的姿态,关键就在于液体自由液面形态的控制.

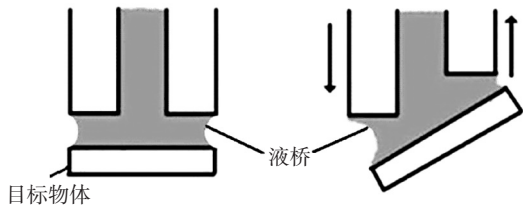


图 2 液滴吸附微小物体示意图

2 数值仿真分析

2.1 控制方程

微重力条件下表面张力是影响液体形态的重要因素^[24-26],VOF (volume of fluid) 模型^[27]能够很好地捕捉相间界面的形态,而 CSF (continuum surface force) 模型^[28]假设相间界面有一定的宽度,将表面张力转化成体积力,可以很好地解决数值模拟表面张力发散的问题.为了有效模拟出表面张力的影响以及捕捉气液界面的形态变化,选取 VOF 模型与 CSF 模型来进行数值模拟.对于黏性为常数的不可压缩流体,其基本控制方程如下:

1) 体积分数方程.

$$\partial \alpha_q / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = S \alpha_q / \rho_q. \quad (1)$$

其中: α_q 为第 q 相的体积分数, $\mathbf{v}$ 为速度, ρ_q 为 q 相的密度, t 为时间.

2) 动量方程. 对于整个计算域采用单一的动量方程,计算得到的速度场由各相共享.

$$\partial(\rho \mathbf{v}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = - \nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}}. \quad (2)$$

其中: p 为压强; $\mathbf{v}$ 为速度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}_{\text{vol}}$ 为表面张力; ρ 和 μ 分别为混合相的密度和动力黏度,这两项参数均由各相的体积分数共同决定,

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q, \quad \mu = \sum \alpha_q \mu_q.$$

式(2)中 $\mathbf{F}_{\text{vol}}$ 采用 CSF 模型求解,对于两相流,

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \frac{\rho \kappa_q \nabla \alpha_q}{0.5(\rho_p + \rho_q)}.$$

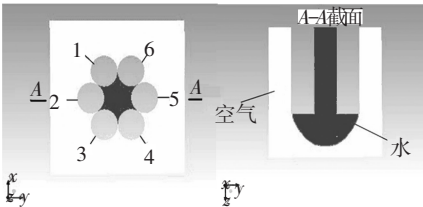
其中: σ 表示 p 相与 q 相间的表面张力系数; κ_q 为 q 相的表面曲率.

2.2 边界条件

采用建模软件 Gambit 建立由 6 根钨丝棒和 1 根毛细微管组成的机械手模型,只取流体区域作为计算区域,即将钨丝棒从流体区域中挖除,只留下钨丝壁面作为边界.将模型导入到 ANSYS 公司的商业软件 CFX14.0,对机械手先端形成液滴的形态变化进行数值仿真.液体的流动为缓慢层流流动,流速 $< 0.1 \text{ m/s}$,机械手末端液滴的形态随微棒上下运动时刻变化,因此流体流动为非定常流动.假设仿真过程中,毛细玻璃微管中液体量恒定,表面张力系数按照 20°C 下水与空气间的表面张力系数 0.0729 N/m 设定^[29],根据实验数据,设定液体与钨丝壁面的接触角为 39° .选择动网格,开启动网格设置中的层铺 (layering) 模型,使棒的端面在往复运动的过程中,周围的网格可以自动的消失与生成.因为机械手各钨丝棒的运动属于往复的线性运动,通过编写 Profile 文件,可以使 6 个钨丝棒按照指定的运动方法移动.采用滑移网格的方法,在滑移边界处设置 interface,结合六面体网格,可以消除网格在边界运动过程中产生的畸变,提高运算的精度.通过设置截面考察液滴形态的变化.

2.3 仿真实验

先将钨丝棒按排列顺序编号,如图 3 所示,设置观察截面 A-A,图中部分区域代表空气,黑色部分代表通入的液体,这里选取的液体为水.设定 6 个棒端面在同一水平面上时的位置为初始位置.



(机械手直径为 0.9 mm ,1~6 为钨丝棒,其直径为 0.3 mm)

图 3 机械手的仿真模型与观察截面

2.3.1 仿真实验 1

如图 4 所示,机械手从初始状态 4(a) 开始,首先棒 2 向上运动 2 次,每次移动 0.1 mm ,如图 4(b)~(c) 所示状态;然后棒 1、3 与棒 2 同时向上运动,每次运动 0.1 mm ,移动 3 次,如图 4(d)~(f) 所示;最终机械手先端:棒 2 与静止棒 4、5、6 相差 0.5 mm ,棒 2 与棒 1、3 相差 0.2 mm ,形成图 4(f) 所示的阶梯状.

随着钨丝棒的运动,机械手先端形状发生了

变化,毛细微管中液体在机械手先端形成液滴形态通过仿真进行模拟.在液滴量恒定的情况下,从钨丝棒的初始状态图 4(a)运动到终了状态图 4(f).对应的其端面液滴的形态变化的仿真结果如图 5 所示,对比图 4 的各个状态和图 5 中相应的仿真结果可以看出,机械手先端形成液滴的形状跟随机械手端面形状的变化而变化.

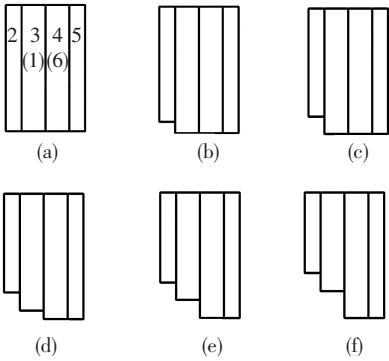


图 4 棒移动顺序图 1

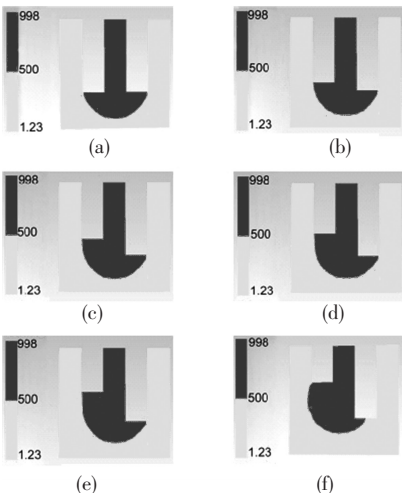


图 5 液滴形态的仿真结果 1

2.3.2 仿真实验 2

与仿真实验 1 相同的初始状态下,首先棒 5、6 同时向上运动 3 次每次移动 0.1 mm,如图 6(b)~(d)所示;然后棒 1、4 开始与棒 5、6 一起以相同的速度向上运动,每次运动 0.1 mm,运动 5 次,如图 6(e)~(i)所示.最终机械手形成的端面形状:棒 5、6 与棒 1、4 间相差 0.3 mm;棒 2、3 始终保持静止,与棒 1、4 间相差 0.5 mm.6 根棒形成的机械手先端如图 6(i)所示梯度的阶梯状.从钨丝棒的初始状态图 6(a)运动到终了状态图 6(i),对应的机械手端面液滴的形态变化仿真结果如图 7 所示.对比图 6 和图 7 中的相应各状态,可以看到液滴的形态跟随机械手端面形状的变化而变化.

实验表明,机械手先端液滴形态紧密跟随机械手先端形状的变化.仿真实验 2 中,如果只改变各个棒之间相差的梯度,使机械手先端形状为棒 1、4 与棒 5、6 和棒 2、3 各相差 0.4 mm,如图 8(a)所示,对应端面液滴形态的仿真结果为图 8(b).与图 7(i)的仿真结果比较可以看出,图 8(b)中液滴右侧凸起较大,可见钨丝棒之间梯度的细微变动,机械手先端的液滴形态即随之改变.

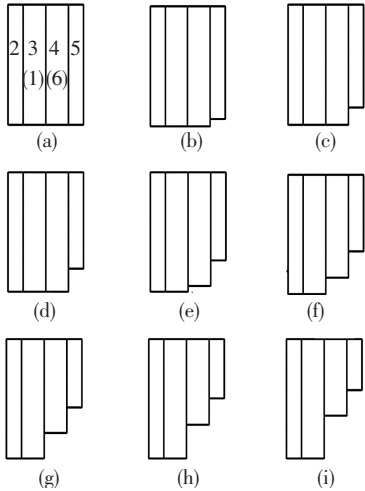


图 6 棒移动顺序图 2

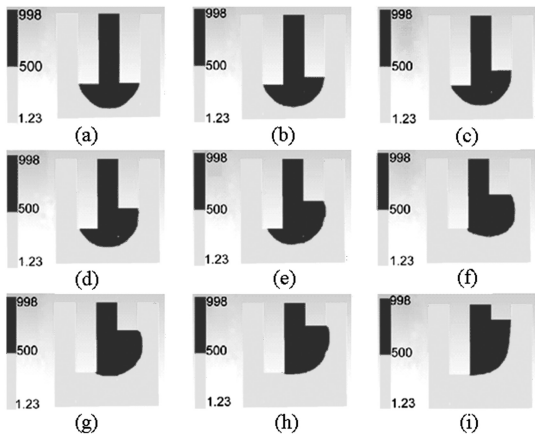
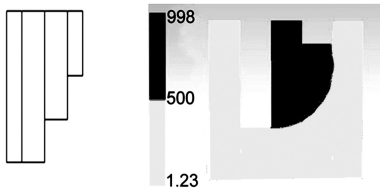


图 7 液滴形态的仿真结果 2



(a)棒形态 (b)液滴形态
图 8 液滴形态的仿真结果

3 试验研究

微小机械手的 6 根钨丝棒的运动分别由 6 个

微型步进马达 (MUED01) 驱动,通过数据采集卡将控制波形导入到放大电路,经过放大电路放大后驱动微型步进电机带动钨丝棒上下运动,采用 LabVIEW 编写控制程序,从而实现控制钨丝棒上下定量运动.试验中构成微小机械手的钨丝棒的直径约为 0.30 mm,中间的毛细微管的外径为 0.51 mm,内径为 0.35 mm. 初始状态时,毛细微管下端与 6 根钨丝棒端面的距离约为 2.0 mm.通过注射器向毛细微管内注入一定量的水,考虑试验过程中水的蒸发等造成损失,定期补充,保持形成液滴的水量基本不变.微型步进电机的单步移动步长为 0.24 μm ,通过调整 LabVIEW 程序中各通道脉冲数,便可以使机械手按照指定运动策略移动,机械手先端形状变化与微管中液体在机械手先端形成液滴形态的变化关系通过 DILITE50 型显微镜观察,并把结果传输到计算机中记录.试验的原理如图 9 所示.

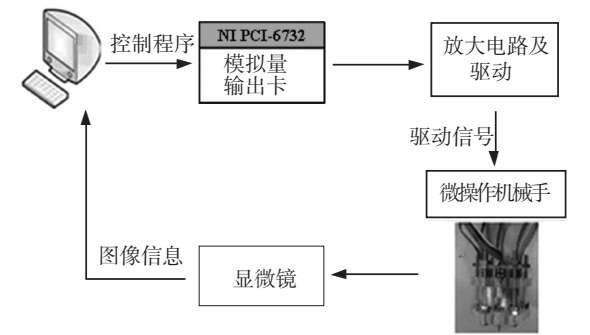


图 9 试验原理图

3.1 机械手端面形状与液滴形态关系试验

参照第 2.3 节的仿真实验进行试验,为了便于比较,试验选取与仿真实验相同的初始状态,钨丝棒分别按照图 4 和图 6 的移动顺序运动.随着机械手先端形状的变化,毛细微管中的液体在机械手先端形成的液滴形态变化的试验结果如图 10 和 11 所示.

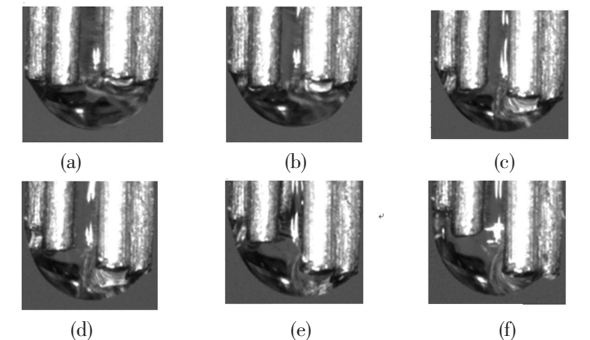


图 10 试验 1 结果 (放大倍数:90 倍)

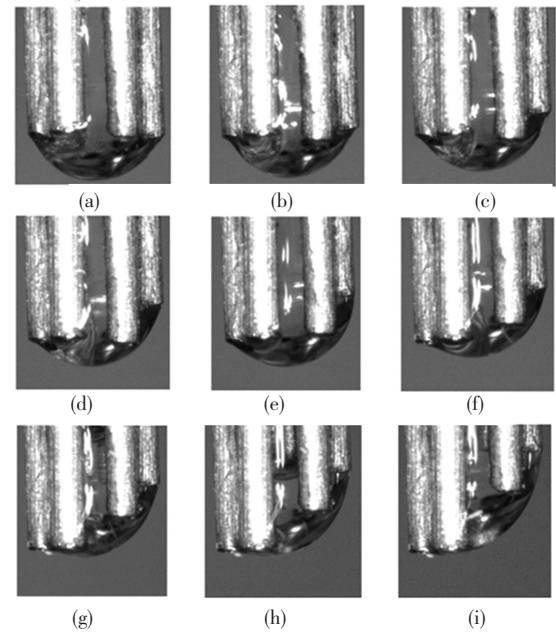


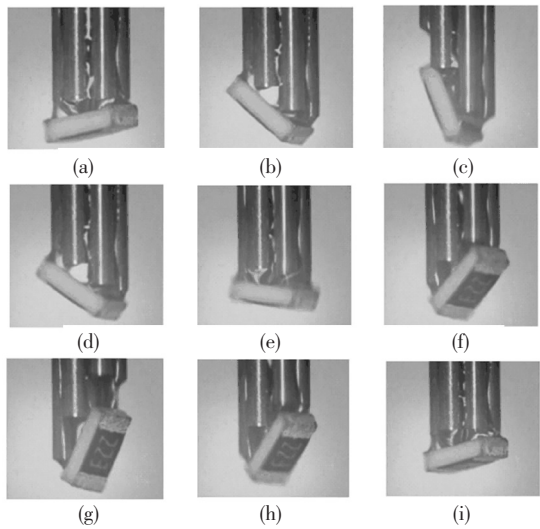
图 11 试验 2 结果 (放大倍数:90 倍)

对比仿真实验图 5 和 7 可以看出,虽然由于各钨丝棒之间个体的差异,驱动马达之间的差异,以及液滴量的控制偏差等因素对试验有些影响,但总体上看试验结果与仿真结果基本上吻合.机械手端面液体的形态跟随着棒的端面形状不断变化,在棒上升的过程中,液体呈现出上升的趋势,同时还呈现出向侧向滑移的趋势,跟踪机械手先端形状的变化.试验结果表明了建立的仿真模型的正确性.

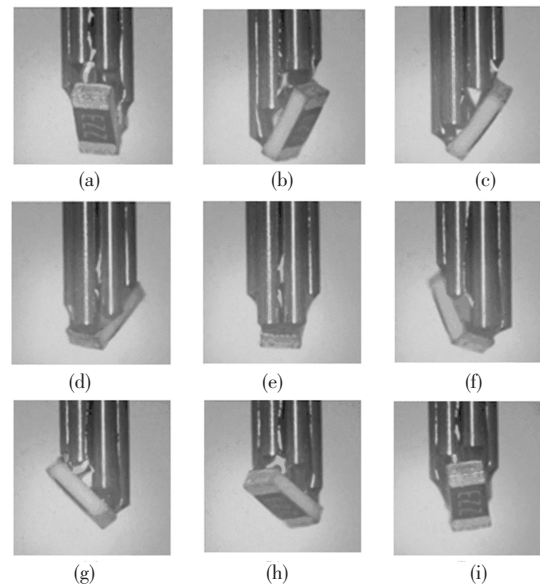
3.2 机械手吸附微小物体试验

机械手先端液滴的形态直接决定了吸持物体的姿态.

试验中,选取的微小物体 (1608 型精密电阻) 尺寸为:1.60 mm×0.85 mm×0.50 mm,质量为 2 mg.机械手的先端形状为平面时,即 6 根钨丝在同一平面上时,毛细微管内缓慢注入水,直到在机械手先端表面形成合适的液滴;然后吸附微小物体,微小物体和机械手先端之间形成液桥,在表面张力的作用下,微小物体吸附在液滴的表面;控制各钨丝棒上下移动量,调整机械手先端的形状,机械手先端形成的液滴形态也随之改变,并跟随机械手先端形状变化,从而可以控制液滴吸附的微小物体的姿态.通过顺次移动微型机械手一侧的钨丝棒可以实现微小物体的侧向的倾斜,试验结果如图 12(1) 所示;逆时针逐次改变钨丝棒的移动顺序可以实现微小物体的旋转运动,试验结果如图 12(2) 所示.



(1) 顺次移动一侧钨丝棒



(2) 逆时针逐次改变钨丝棒移动

(放大倍数:50 倍. 吸持微小物体:1608 型精密电阻,

1. 60 mm×0. 85 mm×0. 50 mm, 质量为 2 mg)

图 12 机械手吸附微小物体试验

4 讨 论

毛细微管中液体在机械手先端形成的液滴形态跟随机械手先端形状的变化而变化.通过控制机械手先端的形状,使液体和钨丝壁面之间的接触线形态发生改变,可以控制机械手先端液滴的形态,从而可以控制吸附在液滴上的微小工件的姿态.

液滴机械手的参数对吸附性能有很大的影响.可以根据操作目标要求,调整机械手的参数,满足微操作的需要.液滴机械手吸持微小物体的最大质量与液滴的表面张力系数有关.上述试验中,机械手的毛细微管中注入液体为水,试验证明液滴稳定吸附微小物体的质量<10 mg,超过此质量极限,液滴不能吸取物体或者变换姿态时脱落.

当吸附较重的微小物体时,可以在水中加入无机盐等提高液体的表面张力系数,实现不同质量微小物体的稳定操作.组成机械手的钨丝棒数目可以根据姿态控制的需要进行调整,增加钨丝棒的数目,可以提高液滴形态的控制精度,但控制系统复杂,一般取 4~8 根为宜.此外液滴的形态还受到钨丝棒表面粗糙度、安装精度、液滴量、微电机的驱动精度以及试验时的环境温度等因素影响,这些因素也会影响机械手的吸附性能,具体的影响还有待于进一步的探讨.

5 结 论

1)控制各钨丝棒的上下移动量,可以改变液体和各钨丝棒的接触壁面,使机械手端面形成液滴的形态也随之改变;吸附在液滴上的微小部件的姿态将随着液滴形态的改变而变化,从而可以实现微小部件位置和姿态的控制;基于表面张力吸附微小物体,对吸附表面要求低,液滴机械手可以对任何形状的微小物体进行操作,适用范围广.

2)适当调整机械手的参数,可以满足微装配过程中吸取目标的要求.改变液滴机械手的结构参数,如钨丝棒的数目、尺寸和钨丝棒的每步移动量,可以调整液滴机械手姿态控制的精度;通过注入不同表面张力系数的液体,可以改变液滴的表面张力,满足不同质量的微小部件吸持需要.

参考文献

[1] CLÉVY C, HUBERT A, AGNUS J, et al. A micro-manipulation cell including a tool changer[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15 (10): S292-S301.

[2] BORDATCHEV E V, NIKUMB S K. Microgripper: design, finite element analysis and laser microfabrication [C]// Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput Soc, 2003:308-313.

[3] GIOUROUDI I, HÖTZENDORFER H, KOSEL J, et al. Development of a microgripping system for handling of microcomponents[J]. Precision Engineering, 2008, 32 (2):148-152.

[4] SUZUKI A, MAE Y, TANIKAWA T, et al. Automated micro handling [C]//2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. NY, USA: IEEE, 2003:348-353.

[5] DEBÉDA H, FREYHOLD T V, MOHR J, et al. Development of miniaturized piezoelectric actuators for optical applications realized using LIGA technology[J]. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems,

- 1999, 8(3):258-263.
- [6] MICALLEF R. Overview of vacuum and gripper end effectors[J]. *Robotics Engineering*, 1986, 8(2):5-8.
- [7] ZESCH W, BRUNNER M, WEBER A. Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot [C]//1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. NY, USA: IEEE, 1997:1761-1766.
- [8] HUANG Xinhan, LIU Chang, WANG Ming. An automatic vacuum microgripper [C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. NY, USA: IEEE, 2010:5528-5532.
- [9] ARAI F, FUKUDA T. Adhesion-type micro endeffector for micromanipulation [C]//1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. NY, USA: IEEE, 1997:1472-1477.
- [10] DRIESEN W, VARIDEL T, RÉGNIER S. Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(10):S259-S267.
- [11] GRUTZECK H. Investigations of the capillary effect for gripping silicon chips [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, 11(2/3):194-203
- [12] 韩江义, 游有鹏, 王化明, 等. 夹钳式力反馈遥微操作系统的设计与试验 [J]. *机器人*, 2010, 32(2):184-189.
- [13] TANIKAWA T, ARAI T, OJALA P, et al. Two-finger Micro Hand [C]//Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. NY, USA: IEEE, 1995:1674-1679.
- [14] FEDDEMA J T, XAVIER P, BROWN R. Micro-assembly planning with Van Der Waals force [C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999:32-38.
- [15] SAITO S, HIMENO H, TAKAHASHI K. Electrostatic detachment of an adhering particle from a micromanipulated probe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(4):2219-2224.
- [16] RONG Weibin, LIU Taochou, WANG Lefeng. A method for micro-sphere manipulation based on capillary force control [C]//Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2010:259-262.
- [17] SATO K, ITO K, HATA S, et al. Self-alignment of microparts using liquid surface tension-behavior of micropart and alignment characteristics [J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1):42-50.
- [18] HAGA T, MIZONO T, TAKASAKI M, et al. Micro-assembly using Liquid surface tension:2nd report, study on working fluids[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Part C*, 2010, 76(761):69-75.
- [19] HIRATA S, SHIGETA T, AOYAMA H. Basic study of high DOF micromanipulation by surface tension using the multi-needle-type capillary [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011:739-743.
- [20] SHIGETA T, AOYAMA H, HIRATA S. Development of multi-needle-type capillary; high DOF micromanipulator using surface tension [C]//2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:819-824.
- [21] de GENNES Pierre-Gilles, BROCHARD-WYART F, QUÉRÉ D. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves [M]. New York: Springer, 2003.
- [22] ALVAREZ N J, WALKER L M, ANNA S L. A non-gradient based algorithm for the determination of surface tension from a pendant drop: Application to low Bond number drop shapes [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 333(2):557-562.
- [23] YAO M, MCKINLEY G H. Numerical simulation of extensional deformations of viscoelastic liquid bridges in filament stretching devices [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech*, 1998, 75(1/2/3):47-88.
- [24] CHO S C, WANG Y, CHEN K S. Droplet dynamics in a polymer electrolyte fuel cell gas flow channel: Forces, deformation, and detachment. I: Theoretical and numerical analyses [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 206:119-128.
- [25] KUMBUR E C, SHARP K V, MENCH M M. Liquid droplet behavior and instability in a polymer electrolyte fuel cell flow channel [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1):333-345.
- [26] de LUCA G, DRIOLI E. Force balance conditions for droplet formation in cross-flow membrane emulsifications [J]. *Journal of colloid and interface science*, 2006, 294(2):436-448.
- [27] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1):201-225.
- [28] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension [J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2):335-354.
- [29] ADAMSON A W, GAST A P. *Physical Chemistry of Surfaces* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.