

液体体積制御による微小物体操作法

東京工業大学 工学部
東京工業大学 大学院○尾畑賢一
齋藤滋規
高橋邦夫
恩澤忠男Method of Micro-manipulation by regulation of liquid volumes
by Kenichi OBATA, Shigeki SAITO, Kunio TAKAHASHI, Tadao ONZAWA

1. 緒言

液体の表面張力を利用して、マイクロメートルオーダーの物体を操作する方法は、プローブ先端が対象物に機械的に接触しないので壊れやすい物体の捕捉に適している。しかし、これまで研究例が少なく実用に至っていない。本研究では、液体体積を制御することで、対象物を操作するモデルを構築し、その実現性について理論的に検証する。

2. 微小物体操作モデル

Fig. 1は、微小球を捕捉し所定の位置に置くモデルである。(I) 微小球の真上にプローブを制御し、プローブ先端に液体を適量付着させる。(II) 微小球に接触し、プローブと球の間に液架橋を形成する。(III) 微小球を引き上げる。(IV) 置きたい場所に適量の液体を塗布し、その真上にプローブを制御する。(V) 微小球を平板に接触させ、微小球と平板の間にも液架橋を形成する。(VI) プローブに付着している液体の量を制御し、プローブを引き上げる。プローブと球の間の液架橋を崩壊させ、プローブから微小球を離脱する。このモデルでは、特に (V) から (VI) の過程でどちらの液架橋が先に崩壊するかが問題となる。そこで液架橋が崩壊する条件を数値計算により求める。

3. 球と平板間の液架橋力解析法

Fig. 3のようなZ軸対象モデルで、半径 R の球にかかる液架橋力 F を数値計算によって求める。微小物体を操作することを考慮し、液架橋力 F を以下の仮定の下に計算する。(1) 重力の影響を無視し、液架橋の形状はLaplaceの方程式に従う。(2) 液体体積 V は一定とする。(3) 静的過程を考える。(4) 接触角はYoung-Dupreの式に従う¹⁾。(5) 球と平板は剛体とする。また、一般化のために各パラメーターを以下の式で無次元化する。

$$z = Z/R, \quad x = X/R, \quad d = D/R, \quad f = F/\pi R\sigma, \quad v = V/R^3. \quad (1)$$

ここで Z, X は円筒座標で、 D は球と平板の距離、 σ は液体の表面張力である。 P, P' をそれぞれ平衡蒸気圧、液体の内圧とした時、Laplaceの方程式は

$$P - P' = 2H\sigma \quad (2)$$

となる。 H は液架橋の輪郭における平均曲率で、液架橋の形状を決める定数である。無次元平均曲率 $2HR$ は幾何的に以下の様に表せる (ϵ は液架橋の輪郭の法線と z 軸とのなす角)。

$$2HR = \frac{d(\sin \epsilon)}{dx} + \frac{\sin \epsilon}{x}. \quad (3)$$

この微分方程式を2点境界値問題として解けば形状が求まる。また、無次元化した液架橋力 f (引き付ける方向が正) は以下の様に表される²⁾。

$$f = 2[\sin \varphi \sin(\theta_1 + \varphi) - HR \sin^2 \varphi]. \quad (4)$$

ここで、 θ_1, θ_2 は球、平板における接触角、 φ は充填角である (Fig. 3 参照)。

4. 数値解析の結果と考察

Fig. 2は液架橋力曲線である。曲線の傾きが正の時、液架橋はばねのような挙動を示し、負のときは力学的平衡を保てない。液架橋を崩壊させるには、液架橋力の最大値より大きな力を逆方向に加えればよい。この時の臨界液架橋

力を f_c とする. 各液体体積における臨界液架橋力 f_c を示したグラフが Fig. 4 である. 例えば $\theta = 0^\circ$ の場合, Fig. 1 の操作において捕捉する時はなるべく液体体積を小さくすれば良いことがわかる. 置く時はプローブと球の間の液量を増やし, 平板に塗布する液量を小さくすれば良い. 接触角が十分小さい時, サブフェムトリットルオーダーの液体を平板に塗布できれば, 数マイクロメートルの微小球を操作できることがわかる. また, Fig. 4 は各接触角における液架橋力曲線の相変化も示しており, マイクロボンディングなど幅広い分野で役立つであろう.

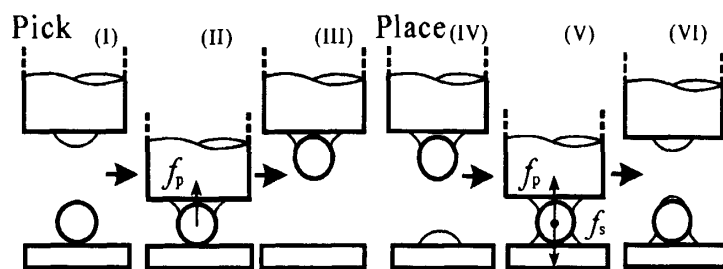


Fig. 1 Schematic illustration of pick/placing procedure.

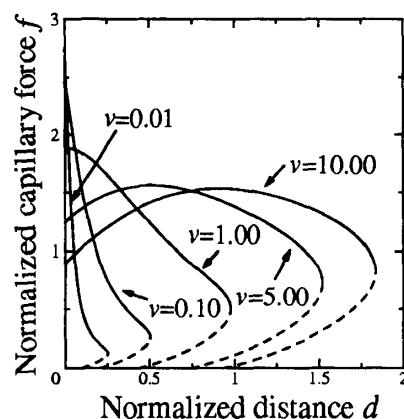


Fig. 2 Capillary force curve ($\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$)

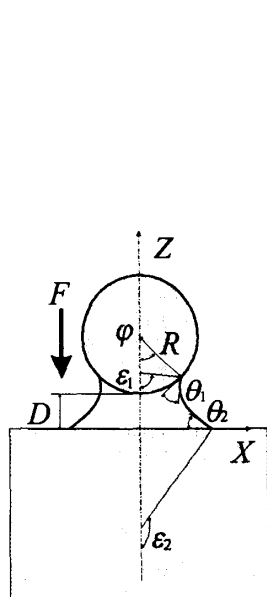


Fig. 3 Liquid bridge between a sphere and a plate

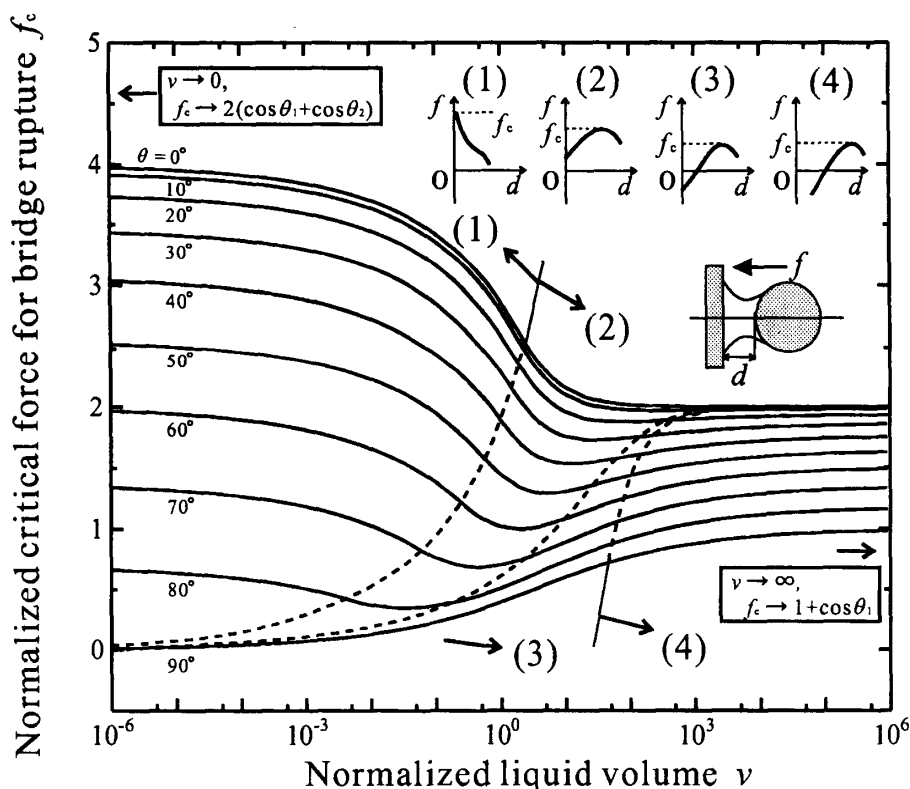


Fig. 4 Relation between liquid volume and the critical force, and threshold for four phases of force-curve ($f = \frac{F}{\pi R \sigma}$, $v = \frac{V}{R^3}$). (1) f_c appears on $d = 0$. (2) f_c appears on $d > 0$. (3) $f < 0$ on $d = 0$. (4) Liquid bridge is undefined on $d = 0$.

参考文献

- 1) Jacob N. Israelachvili, "Intermolecular and Surface Forces", Academic Press, New York (1985), pp301-322
- 2) F.M. Orr, L.E. Scriven, and A.P. Rivas, "Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary force", J. Fluid Mech, vol 67, part 4 (1975), pp 723-742