

振動を用いた凝着力緩和とその微細操作への応用

著者	Watanabe Tetsuyou, Iwasaki Makoto, Matsumura Hidekazu, Jiang Zhongwei
雑誌名	日本機械学会論文集. C編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C
巻	74
号	1
ページ	23-30
発行年	2008-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/9888

振動を用いた凝着力緩和とその微細操作への応用*

渡 辺 哲 陽^{*1}, 岩 崎 誠^{*2}
松 村 英 和^{*3}, 江 鐘 偉^{*4}

Adhesion Forces Relaxation by Oscillation and Its Application to Micro Manipulation

Tetsuyou WATANABE^{*5}, Makoto IWASAKI,
Hidekazu MATSUMURA and Zhongwei JIANG

^{*5} Graduated school of Natural Science & Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

This paper addresses to develop a novel strategy to relax the adhesion forces for picking and placing operation in a micro range. In a micro range, the attracting forces such as the van der Waals, capillary, and electrostatic forces become dominating due to a scaling effect. The attractive forces cause the adhesion between the object and the endeffector. Therefore, it is hard to manipulate an object in a micro range. This paper shows that when an oscillating endeffector approaches to an object, the adhesion between the object and the oscillating endeffector can be reduced. Also, based on the experimental analysis, we clarify the relation between the oscillation and the pushing amount of the endeffector on the object, where the adhesion force can be released effectively. Using this relaxation method and the relation, we develop a strategy for picking and placing operation in a micro range. This strategy provides an accurate manipulation. Some experimental results show the effectiveness of this approach.

Key Words: Piezo-Element, Micro Manipulation, Adhesion Forces, Micro-Mechanism, Electro-magnetic Induced Vibration, Micromachine

1. 結 言

小型電子部品組立、医療、生物、製薬など多岐に渡る分野において、人の手を介さずに、大量処理、繰り返し処理、高速・高精度処理を可能にする微小物体操作手法の開発が望まれている。マイクロ領域では、寸法効果のため、ファン・デル・ワールス力、表面張力、静電気力などの面積や長さ按比例する力が、重力、慣性力などの体積に比例する力より支配的となる。これら引力（ファン・デル・ワールス力、表面張力、静電気力など）は、対象物と操作機具との間に凝着力を引き起こす。このため、ピックアンドプレイス操作のような単純な操作であってもその実現は容易ではない。特に操作機具から微小対象物を分離することは難しい。

本論文では、このような凝着力がはたらく環境下における微小物体操作問題を扱う。微小物体分離に関して、これまで様々な研究がなされている。新井ら⁽¹⁾

は吸着形エンドエフェクタの開発を行っている。エンドエフェクタに微小なマイクロ空孔を形成し、温度により空孔の圧力を制御し微小対象物を吸着、分離するシステムである。しかし、使用環境により温度は変化する。使用環境が限定されてしまう。また、取り扱うことのできる対象物の大きさは空孔の大きさに依存する。Zeschら⁽²⁾はガラス製のピペットを用いてその内圧をコンピュータ制御できるバキュームグリップングツールを開発している。しかし取り扱うことのできる対象物の大きさはピペット先端の穴の大きさに依存する。また、分離後の微小対象物の制御は難しい。Rolletら⁽³⁾はテーブル（基盤）よりエンドエフェクタの方がより大きな表面エネルギーを持つ場合において、微小球形対象物をピックアンドプレイスする手法を開発している。問題はエンドエフェクタからの微小対象物分離である。Rolletらはエンドエフェクタを傾けることで分離に成功している。しかしながらこの手法でピックアンドプレイスできる対象物は限られている。そこでHaliyo⁽⁴⁾らは新たな分離手法を開発している。エンドエフェクタを振動させ、微小対象物にエンドエフェクタから分離可能な大きさの加速度を与える。こ

* 原稿受付 2007年5月14日。

^{*1} 正員、金沢大学大学院自然科学研究科(☎920-1192 金沢市角間町)。

^{*2} 学生員、山口大学大学院理工学研究科(☎755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。

^{*3} 山口大学大学院理工学研究科。

^{*4} 正員、山口大学大学院理工学研究科。

E-mail: jiang@yamaguchi-u.ac.jp

れにより微小対象物がエンドエフェクタから離れるという手法である。しかしながら、微小対象物を分離するためには大きな加速度を与える必要があるため、分離後の微小対象物の制御は難しい。斉藤ら⁽⁵⁾はSEM下において微小対象物をピックアンドプレイスする手法を提案している。しかしながら提案されている手法は、環境、対象物、エンドエフェクタに関わる全てのパラメータが既知であることを前提にしている。実際のマイクロ環境下では、様々な因子が複雑に絡み合うため、全てのパラメータを知ることは大変困難である。実際、実験による検証は行われていない。斉藤ら⁽⁶⁾は静電気力を制御して、微小対象物を分離する方法を提案している。しかし、分離後の微小対象物の挙動を制御することは大変困難である。谷川ら⁽⁷⁾は並進3自由度を有する指を直列に二つ配置したマイクロフィンガーモジュールを開発している。このモジュールは、人間により遠隔操作されるシステムである。このため、微小対象物の分離は、操作者の技能に依存することとなる。

本論文では、微小対象物をピックアンドプレイスするマイクロマニピュレーション時において問題となる微小対象物の分離について、微細振動により表面張力を弱め凝着力を緩和する方法ならびに、微細振動による凝着力緩和を用いたマイクロマニピュレーション方法を提案する。

本論文の構成について説明する。まず、振動を用いた凝着力緩和方法を提案する。エンドエフェクタを微細振動させながら、テーブル(基盤)上にある対象物に接触させる(近づけると、テーブル(基盤)と対象物の間に比べ、エンドエフェクタと対象物の間の凝着力が小さくなる。このため、大きな加速度を与え、対象物を振り落とす手法に比べ、エンドエフェクタと対象物を位置制御しながら正確に分離できる、という手法である。

次にこの手法の適用範囲について調査する。この凝着力緩和手法をマイクロマニピュレーションに応用する場合、最も重要なことは、ある大きさの振動を用いて凝着力を緩和している場合、(凝着力を緩和しながら)エンドエフェクタをどの程度対象物に押し付けることができるかである。この量が大きければ対象物により安定に把持することができる。逆に少なければ把持が不安定になってしまう。この調査により、振動をどのように調節すればよいかの知見を得る。

最後に、振動を用いた凝着力緩和手法ならびに押し付け量と振動に関する知見をもとに、微小対象物のピックアンドプレイス操作手法を提案する。押し付け量

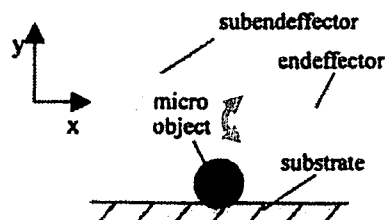


Fig. 1 Target system

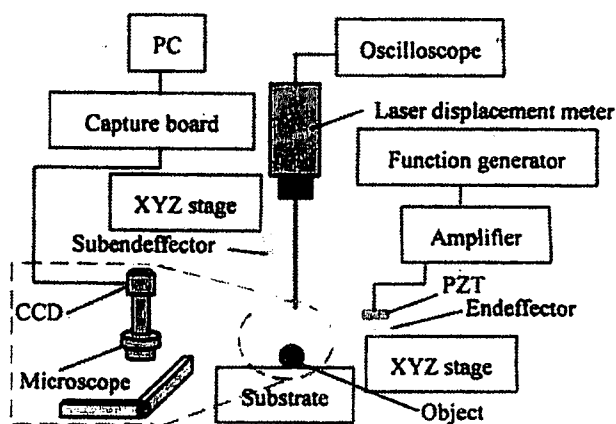


Fig. 2 Overview of the experimental setup

と振動に関する知見をもとに、確実な凝着力緩和を保証するマイクロマニピュレーション手法を提案する。この手法は、従来のものと違い、正確な対象物操作を可能にする手法である。本手法の有効性を実験により検証する。

2. 対象とする系

対象とする系を図1に示す。マイクロ領域において、エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタにより、基盤上の微小対象物をピックアンドプレイスするマニピュレーションを考える。マニピュレーションの概要について説明する。まず、エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタで基盤上の微小対象物をつかみ、紙面上方向に動かす。次に、紙面下方向に動かすことにより、微小対象物を基盤上の目標位置に置く。最後に、微小対象物からエンドエフェクタ、サブエンドエフェクタの分離を行う。分離時に、エンドエフェクタを振動させ、凝着力を緩和させることにより分離を可能にする。詳しくは5・1で説明する。エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタは梁構造とし、共に自在に操作可能なマイクロマニピュレータに取り付けられている。エンドエフェクタには加振用の圧電素子を取り付けている。問題を簡単にするために、以下の仮定をする。エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタ、基盤は同じ材質

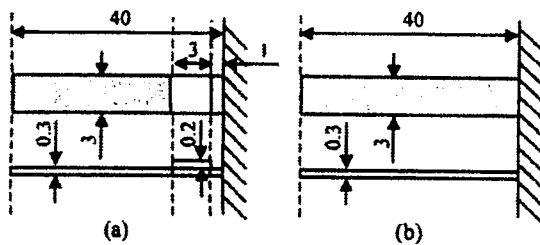


Fig. 3 Overview of the endeffector and subendeffector

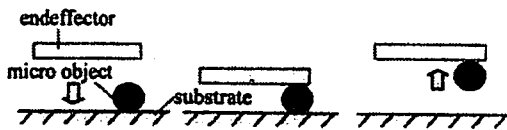


Fig. 4 Micro object adhered to endeffector

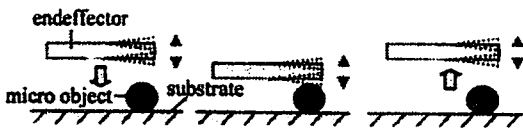


Fig. 5 Relaxation of adhered forces

である。微小対象物の形状は球形である。重力は働かない。エンドエフェクタ（初期状態）、サブエンドエフェクタ、基盤はアースを行い、電位差を0とする。

2.1 実験システム 本実験装置は図2に示すように、マニピュレーションシステム、顕微鏡システム、加振システム、変位計測システムから構成される。

マニピュレーションシステムは、エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタ、基盤、微小対象物から構成され、ピックアンドプレイス操作を行う。図3の(a)にエンドエフェクタ、(b)にサブエンドエフェクタの概要図を示す。エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタは共に、銅を材料とした片持ち梁で、寸法は $3 \times 40 \times 0.3$ [mm] である。梁は圧延加工されたもので、研磨などの表面処理は行っていない。銅のヤング率は 1.02×10^{11} [N/m²]、ポアソン比は0.35、密度は 8900 [kg/m³] である。エンドエフェクタには、微小加振させるために圧電素子（富士セラミックス、Z0.2T50 \times 50 \times 50S-WC6）を 3×3 [mm] のサイズに切断し、導電性接着剤で固定端より 1 [mm] の位置に貼り付けている。基盤はエンドエフェクタと同じ材質である銅の梁をアルミ板に固定することで構築している。エンドエフェクタはXYZステージ（駿河精機、PMZG413）に固定されておりPCで操作可能である。微小対象物は粒径約 200 [μ m] のガラス球（ユニオン、ユニピース）と粒径約 152 [μ m] の銅球を使用する。ガラス球のヤング率は 7.05×10^{10} [N/m²]、ポアソン比は0.17、密度は 2500 [kg/m³] である。銅球の

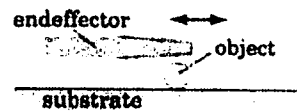


Fig. 6 Overview of the experiment

ヤング率は 1.30×10^{11} [N/m²]、ポアソン比は0.343、密度は 8960 [kg/m³] である。

顕微鏡システムは、顕微鏡（MORITEX、ML-Z07545）、CCDカメラ（IAI、CV-S3200）、キャプチャーボックス（V-STREAM、VS-TV2800R）、PCから構成されている。操作概要は顕微鏡に取り付けたCCDカメラを通して、モニタ画面に表示される。また、操作の様子はキャプチャーボックスを介してPCに送られ保存される。

加振システムは、ファンクションジェネレータ（YOKOGAWA、FG120）、アンプ（NF、4010）、圧電素子から構成されており、アンプを介してファンクションジェネレータの出力を圧電素子に加えることで、エンドエフェクタに振動を与える。

変位計測システムは、レーザー変位計（SONY、VL10）、オシロスコープ（YOKOGAWA、DL1700）、PCから構成されている。エンドエフェクタの先端変位はレーザー変位計により計測され、オシロスコープに送られ観測される。オシロスコープのデータはPCに送られ処理される。

3. 凝着力緩和の方法

図4に示すように、エンドエフェクタを微小対象物に近づけていき接触させ離す。この場合、エンドエフェクタ-微小対象物間に凝着力が働き、エンドエフェクタに微小対象物が付着してしまう場合がある。

これに対処する方法として、図5に示すような振動を用いた凝着力緩和の方法を提案する。

振動させたエンドエフェクタを対象物に近づけると、エンドエフェクタは対象物と衝突を繰り返す。この場合、微小対象物-基盤間に比べ、微小対象物-エンドエフェクタ間では、凝着力がはたらく時間が非常に短い。加えて、スクイズ効果⁽⁸⁾による圧縮力が微小対象物-エンドエフェクタ間にはたらく。このため、微小対象物-基盤間に比べ微小対象物-エンドエフェクタ間にはたらく凝着力は小さくなる。したがってエンドエフェクタを対象物に接触させた後でも対象物を確実にエンドエフェクタから分離することができる。

3.1 凝着力緩和効果の検証 エンドエフェクタ-微小対象物間の凝着力が緩和されることを検証するため、図6に示す実験を行う。

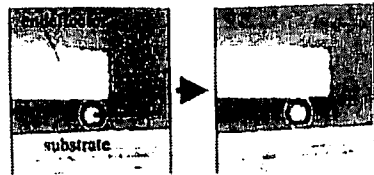


Fig. 7 Confirmation of reduction effect of adhesion forces in the case where endeffector is oscillated

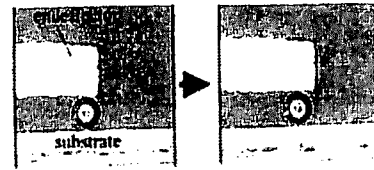


Fig. 8 Confirmation of reduction effect of adhesion forces in the case where endeffector is not oscillated

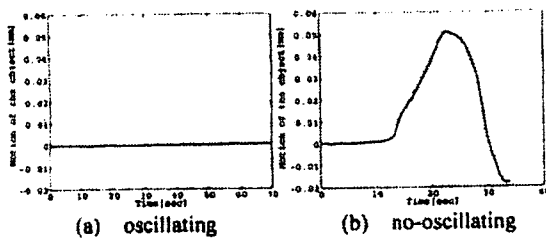


Fig. 9 Motion of the object center in the case where oscillating and no-oscillating endeffector move from side to side

まず、基盤上の微小対象物にエンドエフェクタを接触させる。次に、エンドエフェクタを左右に動かす。このとき、エンドエフェクタ・微小対象物間の凝着力が微小対象物・基盤間の凝着力より小さいとエンドエフェクタは微小対象物表面上を滑る。凝着力が緩和されていないと多くの場合、微小対象物は転がる。そこでエンドエフェクタを加振した場合としない場合の実験を行った。

エンドエフェクタを振幅 10[V] の正弦波(4 次モード)で振動させたときの実験結果を図 7 に示す。図 9(a)には、微小対象物の中心位置の推移を示す。図 7 に示すように初期状態の微小対象物の中心を原点とする。図 7、図 9 からわかるように、凝着力が緩和され、エンドエフェクタが微小対象物表面を滑るため、微小対象物は動かない。エンドエフェクタに振幅 20, 30[V] の電圧を与えたときも同様の結果を得ることができた。

次に、エンドエフェクタを振動させていないときの実験結果を図 8 に示す。図 9(b)には、微小対象物中心位置の推移を示す。凝着力を緩和できず、微小対象物が転がるため、微小対象物の中心位置が変化することがわかる。結果から、振動を用いることにより凝着力が緩和されていることがわかる。

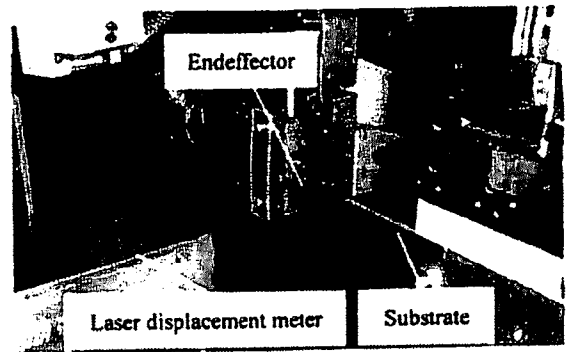


Fig. 10 Photo of the experimental setup

3・2 凝着力緩和方法の問題点 本手法を使用しても、微小対象物からエンドエフェクタを分離できない場合がある。微小対象物にエンドエフェクタを押し付ける量が大きい場合である。エンドエフェクタを高周波振動させながら、基盤上にある微小対象物に接触させ(近づけた後)、エンドエフェクタを基盤から離す。凝着力を緩和できた場合は、エンドエフェクタに微小対象物が付着しない(図 5)。しかし、押し付け量が大きく凝着力を緩和できない場合は、エンドエフェクタに微小対象物が付着してしまう(図 4)。この問題を解決するため、次章においてこの手法の適用範囲について実験により解析する。

4. 凝着力緩和と押し付け量との関係

4・1 解析概要 振動を用いた凝着力緩和方法を使用して、微小対象物をピックアンドプレイス操作する場合、微小対象物にエンドエフェクタを押し付ける必要がある。しかし、3 章で述べたように、押し付ける量が大きすぎると、エンドエフェクタに微小対象物が付着してしまう。この問題を解決し、分離を確実なものとするため、エンドエフェクタを微小対象物に押し付けていく時の現象を調べる。

4・2 実験装置 ここでは、エンドエフェクタ・微小対象物間の物理現象を把握することが主題なので、図 10 に示すように、マニピュレーションシステムからサブエンドエフェクタを取り除いたシステムを使用する。

4・3 押し付けの影響

4・3・1 実験概要 エンドエフェクタに取り付けた圧電素子への印加電圧を一定とし、エンドエフェクタ・微小対象物間の距離を変えて実験を行う。微小対象物には粒径 200[μm] のガラス球を使用する。入力電圧を振幅 5[V] の正弦波、周波数を 4 次モードの共振周波数である 3.171[kHz] としてファンクションジェネレータにより振動を起こす。エンドエフェクタが微小対

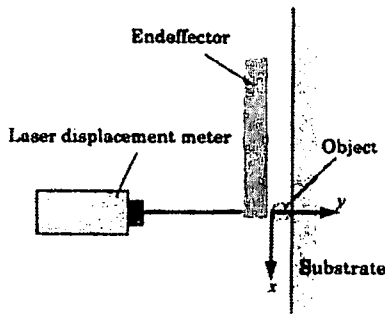


Fig. 11 Overview of experiment

Table 1 Mode of the endeffector

Mode	Peak frequency(Hz)
1	111
2	644
3	1688
4	3171

Table 2 The relation between y and the frequency of adhesion to the endeffector

y[μm]	Frequency of adhesion / number of trial times
0~7	0/10
8	2/10

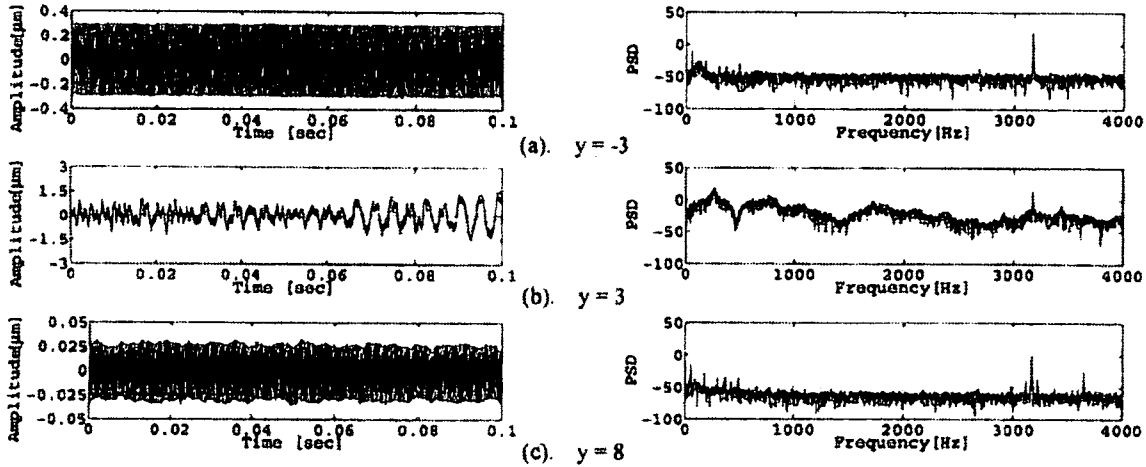


Fig. 12 Experimental results for glass (5V)

象物に接触していない際の振幅は $0.3[\mu\text{m}]$ である。ただし、エンドエフェクタのセッティング、温度などの条件により、振幅値が異なることがある。1次モードは、振幅の大きさが粒径に近い程大きいため、マイクロマンピュレーションに用いるのは不相当である。3次モードでは、振幅が非常に小さいために振動による凝着力緩和効果を十分に得ることができなかった。2, 4次モードでは、凝着力緩和効果を得ることができた。基本的な現象は同じであったので、ここでは、一例として、4次モードの場合の結果を示す。

PCにより、XYZ ステージを操作し、エンドエフェクタを移動させる。図11に示すようにエンドエフェクタと微小対象物の距離は $y[\mu\text{m}]$ で表す。エンドエフェクタが微小対象物に近づく方向を正とする。エンドエフェクタと微小対象物の距離は静的変位を計測可能なレーザー変位計(KEYENCE, LC-2400)で計測し、エンドエフェクタと基盤の距離が、微小対象物の直径に相当する $200[\mu\text{m}]$ の位置を原点とする。エンドエフェクタを $y = -3$ から $y = 8$ まで $1[\mu\text{m}]$ ずつ微小対象物に近

づけていく。 $y = 0$ 以降でエンドエフェクタと微小対象物は接触する。そのときのエンドエフェクタ動的先端変位をレーザー変位計 (SONY, VL10) を用いて計測する。

4・3・2 実験結果 結果の一例を図12に示す。左側の図はエンドエフェクタの先端変位の推移を、右側の図は、そのFFT解析の結果を示している。有限要素解析ソフト(ANSYS)を使用して、エンドエフェクタの1端固定-他端自由梁についてモード解析を行い、FFT解析の結果と比較する。モード解析の結果を表1に示す。 $y = 0$ から7では、図12(b)に示すように振幅は接触前 ($y = -3$) の振幅より大きくなり、4次モードに加え下位のモードが見られる。ここでは一例として $y = 3$ のときの結果を示す。 $y = 8$ では、図12(c)に示すように接触前の振幅よりも小さい振幅になり、下位モードが見られなくなる。

この際、 y の各値において、それぞれ10回ずつエンドエフェクタを基盤から離すという実験を行った。結果を表2に示す。 $y = 0$ から7の範囲では凝着力を緩和

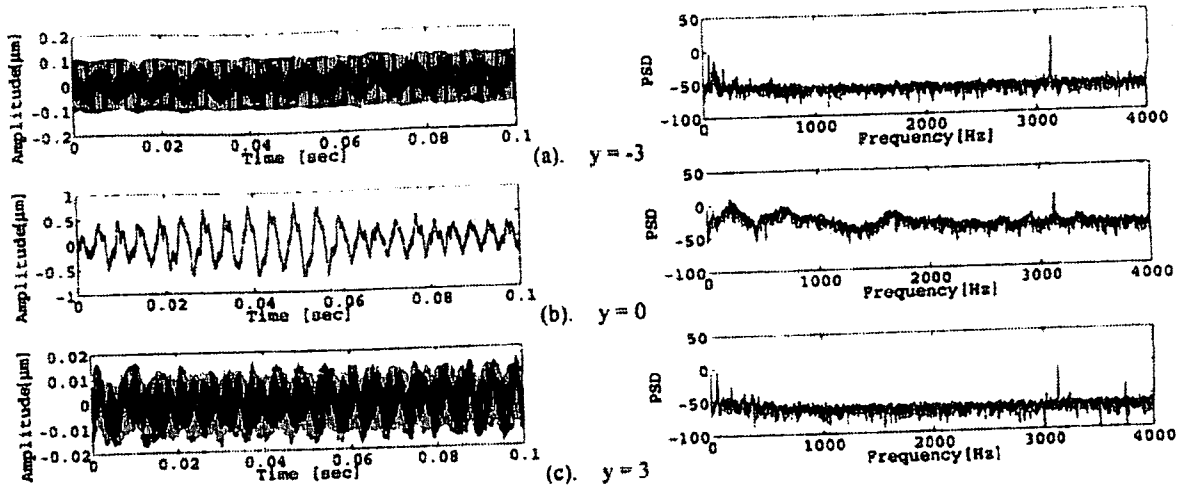


Fig. 13 Experimental results for glass (2.5V)

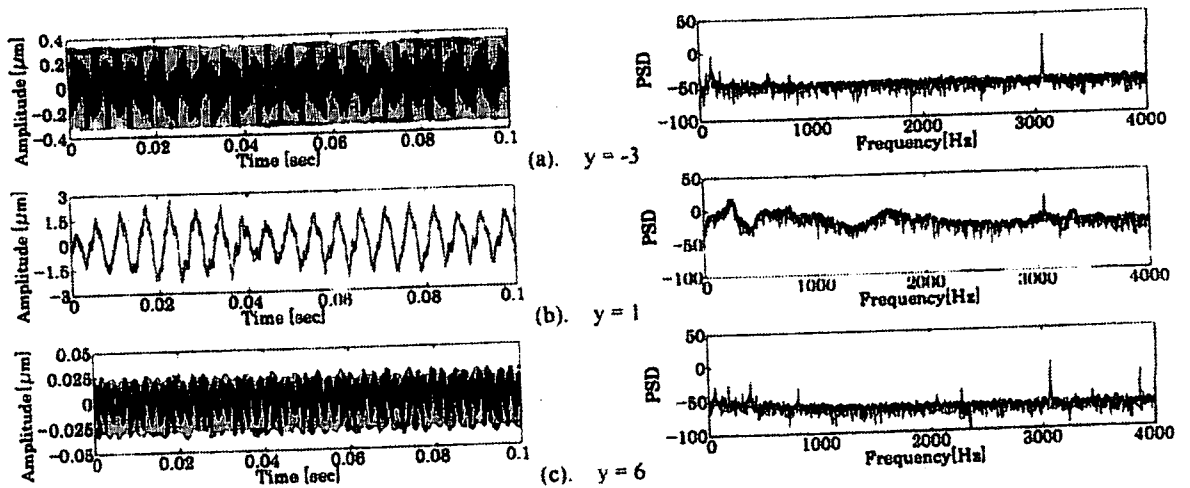


Fig. 14 Experimental results for Cu (5V)

でき、微小対象物がエンドエフェクタに付着することにはなかった。しかし、 $y=8$ の場合、微小対象物がエンドエフェクタに付着する現象が2回ほどみられた。

結果から $y=0$ から 7 の場合、エンドエフェクタに微小対象物が凝着することなく、微小対象物からエンドエフェクタを引き離すことができると考えられる。また、 $y=8$ の状態では、振幅が小さく、振動による効果を十分に得ることができなかつたと考えられる。凝着力の中で、表面張力が最も大きいと考えられる。エンドエフェクタは振動しているので、粘性効果による表面張力の影響を受ける。表面張力が小さい状態では、エンドエフェクタへの拘束力が弱まるため下位モードが現れやすい。つまり、下位モードが見られる状態では、表面張力の影響が小さくなっているため、凝着力が低下していると考えられる。

4.4 振幅の違いによる影響 振幅の違いによる

影響を調べるために、エンドエフェクタが微小対象物に接触していない際の振幅を $0.3[\mu\text{m}]$ (入力電圧 $5[\text{V}]$) から $0.1[\mu\text{m}]$ ($2.5[\text{V}]$) に変えて $4 \cdot 3$ で述べた実験を行う。

結果の一例を図13に示す。左側にエンドエフェクタの先端変位を、右側にそのFFT解析の結果を示す。

4.5 材料の違いによる影響 微小対象物の材料が異なると働く凝着力が異なる。ガラス球と異なる材料を使用しても、凝着力緩和効果が有効であるかどうかを確かめるため、微小対象物を、粒径 $152[\mu\text{m}]$ の銅に変えて $4 \cdot 3$ で述べた実験を行う。Israelachvili⁽⁹⁾によると、ガラス球の表面エネルギーは $0.08[\text{J}/\text{m}^2]$ 、銅の表面エネルギーは $2[\text{J}/\text{m}^2]$ である。このため、ガラス球に比べ銅の凝着力は大きい。

結果の一例を図14に示す。左側にエンドエフェクタの先端変位を、右側にそのFFT解析の結果を示す。

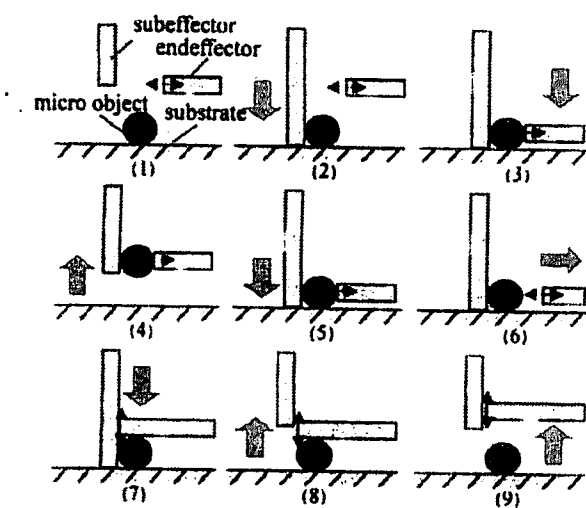


Fig. 15 Pick and place operation

4・6 解析 まとめると、振幅が接触前に比べ大きくなり、1次モードの振動が励起されている状態では、エンドエフェクタが微小対象物に凝着することなく、微小対象物からエンドエフェクタを引き離すことができる。押し付け量が大きいと振幅が小さくなり、振動による効果を十分に得ることができない。

エンドエフェクタと微小対象物が接触前の振幅を $0.3[\mu\text{m}]$ にしたときと $0.1[\mu\text{m}]$ のときを比べると、全体的な傾向は等しくなったが、振幅が小さくなるまでの y の値が、 $0.3[\mu\text{m}]$ のときと比べ短かった。このことから、振幅が大きいほうが凝着力を緩和しながらより大きな押し付け量を働かせることができることがわかった。

微小対象物の材質を変えて実験を行うと、全体的な傾向は等しくなったが、振幅が小さくなるまでの y の値が、ガラス球に比べ銅球は小さかった。ガラス球に比べ銅の凝着力が大きいため、銅のほうが凝着力緩和効果の得られる y の範囲が小さくなったと考えられる。凝着力が大きいと、エンドエフェクタに微小対象物が付着しやすくなる。そのため、押し付けられる量は小さくなる。以上より、振動と押し付け量との関係を得ることができた。

5. マニピュレーションへの応用

凝着力緩和手法をマイクロマニピュレーションに適用する場合、どれくらいの押し付け量までなら、凝着力緩和が可能であるかを、エンドエフェクタ先端変位により確認できることが判明した。本章では、これを利用した、新しいピックアンドプレイス操作手法を提案すると共に実験により、その有効性を検証する。

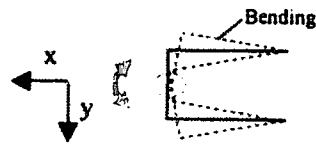


Fig. 16 Displacement in longitudinal direction for bending oscillation

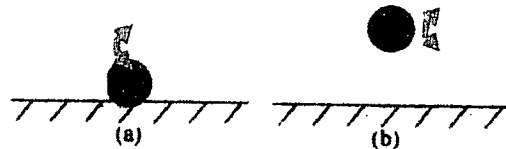


Fig. 17 Overview of placing and picking

5・1 マイクロピックアンドプレイス操作法 図15に振動を用いた凝着力緩和方法を利用したマイクロピックアンドプレイス操作法の概要を示す。マニピュレーションの手順は、(1)~(9)の順に行う。

- (1) この状態からマニピュレーションを始める。
- (2) 微小対象物にサブエンドエフェクタを接触させる。
- (3) 微小対象物に振動させたエンドエフェクタを接触させる。
- (4) エンドエフェクタとサブエンドエフェクタを紙面上方に動かすことにより、微小対象物をつかむ。
- (5) エンドエフェクタとサブエンドエフェクタを紙面下方に動かすことにより、微小対象物を基盤上に置く。
- (6) 微小対象物からエンドエフェクタを離す。
- (7) 振動させたエンドエフェクタを、微小対象物の上部に接触させる。
- (8) サブエンドエフェクタを紙面上方に動かし、微小対象物から離す。
- (9) エンドエフェクタを紙面上方に動かし微小対象物から離す。

(3), (7)では、レーザー変位計を用いて、エンドエフェクタと微小対象物の接触状態を確認する。(3), (4), (5), (6)では、長手方向の変位の変化を利用し凝着力緩和を行う。接触時、エンドエフェクタの振幅が小さい場合は、電圧を大きくして振幅を大きくする。これにより十分な凝着力緩和効果を得る。図16にエンドエフェクタ先端の拡大図を示す。図からわかるように、曲げ振動のためエンドエフェクタの先端は、 y 方向のみならず x 方向にも変位する。この時の x 方向の変位の変化を利用することで図17(a)の場合と同様に図17(b)の場

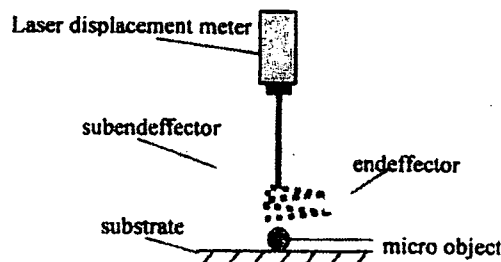


Fig. 18 Manipulation system

合でも凝着力緩和効果を得ることができる。

5・2 実験概要 図18にサブエンドエフェクタを加えた実験装置を示す。振動させたエンドエフェクタ、サブエンドエフェクタによるピックアンドプレイス操作を行う。入力電圧を振幅5[V] ((7)~(9))または10[V] ((3)~(6))の正弦波、周波数を4次モードの共振周波数である3.139[kHz]としてファンクションジェネレータにより振動を起こす。なお、エンドエフェクタが微小対象物に接触していない際の振幅は0.3[μm] ((7)~(9))または0.7[μm] ((3)~(6))である。PCにより、XYZステージを操作し、エンドエフェクタ、サブエンドエフェクタを移動させる。エンドエフェクタの先端変位はレーザー変位計で計測する。

5・3 実験結果 マニピュレーションの結果を図19に示す。4・3より、エンドエフェクタが対象物と接触している際、接触前に比べ振幅が大きくなると、凝着力を緩和できることがわかった。これを一連の操作において適用する。すなわち、対象物をつかむ際、振幅が大きくなるように(図12(b)に示すような状態になるように)押し付け量を制御する。これにより、(6)ならびに(9)において、微小対象物をエンドエフェクタに付着させることなく、エンドエフェクタを微小対象物から離すことができた。

6. 結 言

本論文ではまず、振動を用いた凝着力緩和方法を提案した。次にこの手法の適用範囲について調査した。振幅と、エンドエフェクタをどの程度微小対象物に押し付けることができるか(押し付け量を増やすことができるか)、の関係を実験により解析した。この解析により、振幅を増加させることで押し付け量を増加させることがわかった。さらに、微小対象物の材料の違いに関わらず本手法が有効であることがわかった。

最後に、提案する振動を用いた凝着力緩和手法ならびに押し付け量と振動に関する知見をもとに、確実な凝着力緩和を保証し、正確なプレイス操作が可能なるマ

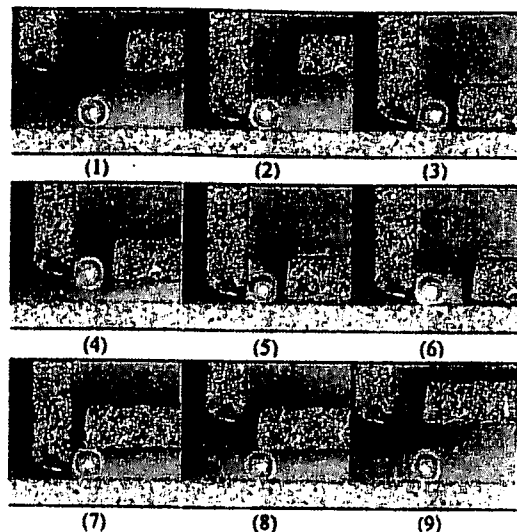


Fig. 19 Experimental results of pick and place operation

イクロマニピュレーション手法を提案し、実験によりその有効性を示した。

文 献

- (1) F. Arai, D. Andou, Y. Nonoda, T. Fukuda, Micro Manipulation Based on Physical Phenomena in Micro World(Principle and Prototype Experiments of Adhesion type Micro Endeffector), *Trans. of the Japan society of Mechanical Engineers, series C*, Vol.62, No.604(1996), pp.4630-4635.
- (2) W. Zesch, M. Brunner, and A. Weber, Vacuum tool for handling micro objects with a nano robot, *Proc. of the IEEE Int. Con. on Robotics and Automation*, (1997), pp.1761-1766.
- (3) Y. Rollot, S. R'gnier, and J. Guinot, Dynamical model for the micromanipulation by adhesion : Experimental validations for determined conditions, *Journal of Micromechatronics*, 1,4,(2002), pp.273-297.
- (4) D. S.Haliyo, Y. Rollot, and S. Re'gnier, Manipulation on of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects, *Proc. of the IEEE Int. Con. on Robotics and Automation*, (2002), pp.1949-1954.
- (5) S. Saito, H. Miyazaki, T. Sato, K. Takahashi, Kinematic Analysis of Micro-object Operation under SEM Considering the Adhesive Effect, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.20-3, (2002), pp.324
- (6) S. Saito, H. Himeno, and K. Takahashi, Electrostatic detachment of an adhering particle from a micro manipulated probe, *Journal of Applied Physics*, 93, 4, (2003), pp.2219-2224.
- (7) T. Tanikawa, T. Arai, Micro Finger Module with 3 DOF Translational Motion, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.20-2, (2002), pp.196-205.
- (8) T. Watanabe and S. Fukui, A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration, *Proc. of the IEEE Int. Con. on Robotics and Automation*, (1995), pp.1134-1139.
- (9) J. N. Israelachvili, Intermolecular and surface forces, (1996), Asakura publishing.