小型自走機械群による超精密生産機械システム(第3報)*

—毛細管捕獲プローブの設計と応用—

青山 尚之** 新野 弘司***

An Ultra Precision Production System Organized by Miniature Robots (3rd Report) - Development of Capillary Capturing Probe and Surface Clearing Operation -

Hisayuki AOYAMA and Koji NIINO

This paper deals with the precise miniature robot which has been developed to perform surface clearing operation. The basic principle of this mechanism for precise locomotion is based on the combination of piezo elements and electromagnets for providing an inchworm manner. In order to capture such small objects on the surface, the unique capillary probe that the water in the tube can be pushed off by the magnetic piston and then the object can be taken in the water drop with the help of surface tension force was designed and fabricated. As a primary experiment, it was confirmed that the capillary probe was successfully capable of capturing several small materials such as metal ball, particle and scraped paper. And the tiny robot with the capillary probe succeeded in capturing the small object on the surface and conveying it to the trash, and then throwing it away.

Key words: miniature robot, capillary probe, magnetic piston, solenoid, piezo element, electromagnet

1. 緒 言

近年高性能なアクチュエータの出現や微細加工技術の発展により、超小型の自走機構やロボットの製作が比較的容易になってきている。特にマイクロマシン技術により非常に小さな部品や機能素子が供給されるようになったことは今後益々この分野の発展が期待される。筆者らは卓上において多数の超小型精密機械を用いた柔軟な精密生産システムの構築を目標とし、これまでに圧電素子と電磁石で構成される小型の精密自走機械を提案し、これが平面だけでなく壁面、天井面を含めた自由曲面上を精密移動できることを示した¹⁾。また前報ではこの機構を基台とし、小型2自由度の電磁アクチュエータを搭載し、これが工具を駆動することで連続的な微細打痕を自動加工するシステムについて論じた²⁾。

一方、超小型機械に搭載した工具により機械的加工を行う場合、切削屑が発生することや作業中の粉塵が作業面に落ちることは避けられず、これらを除去することが必要とされた。表面の微小物を捕獲あるいは吸着する方法はマイクロマニピュレーションの研究分野としても注目されさまざまな報告がされている。一般にはピンセット状の工具で物理的に把持する方法³⁾や表面張力⁴⁾を利用するもの、あるいは静電気力、空気吸引力を利用するものが知られている。また最近ではレーザー光線⁵⁾を利用するものも報告されている。しかし超小型自走機械に搭載することを想定した場合、そこに搭載できる大きさが制限されることや捕獲・吸引させるための作動源および給電系が小さくならないことの制約条件があり、これらの方法をそのまま利用することは難しい。例えば、ピンセット状のマイクロ工具、表面張力あるいは静電気力を利用する場合、これらの工具

を対象物に接触させるかまたは極めて近くまで接近させなければならず、このために第2のアクチュエータなどが必要になる。また空気吸引力やレーザー光線を利用する方法もこれを動作させる動力源は非常に大きいので超小型自走機械には搭載できない。

そこで本論文ではできるだけ単純な構造と簡単な動作原理で表面上の微小物を捕獲・排出できる機構について検討を行っている。ここでは寸法が1mm以下の微小物を対象とし毛細管内の水を管内に挿入した円筒磁石をソレノイドからの磁力で瞬間的に押し引きし、毛細管先端部から対象物に向けて水滴を伸縮させる機構を提案している。この時、水滴は細管の開口部からほとんど広がらずに対象物に到達する。さらに水滴が接触した瞬間に対象物は水滴との表面張力によって水滴内に捕獲され、水滴が引き戻される。捕獲した微小物を排出する場合は磁力を制御し、磁石の動作距離と速度を調整することで簡単に毛細管先端から排出することができる。以下の章ではこの毛細管捕獲プローブの構造、原理および設計方法について述べるとともに、その基本性能を実験的に明らかにしている。さらに応用として実際に超小型自走機械に搭載し、表面上の微小物の捕獲、搬送および排出動作を行った結果を記している。

2. 毛細管捕獲プローブの構造と原理

前述したように超小型自走機械に搭載できる容積と重量は限られているため、捕獲プローブは小型でしかも供給系を含めた動作エネルギーも小さいことが必要である。さらに第2の機械的アクチュエータの搭載を避けるため、捕獲プローブは少なくとも数mm程度の作動距離を有することや特殊な作動液を必要としないことも好ましい。そこで図1に示すように内部に水を満たし、それを超小型のピストンで駆動する毛細管プローブを提案する^{6), 7)}。細管の内部にはその内径より少し小さい径を有する円筒形の永久磁石を挿入し、この磁石を挟むように細管

* 原稿受付 平成12年12月12日

** 正会員 電気通信大学(調布市調布ヶ丘1-5-1)

*** 学生会員 電気通信大学大学院

外周の上下にソレノイドコイルを巻いている。円筒形磁石は上下にNS磁極を配し、ソレノイドからの斥力の釣り合いで位置決めされるように構成されている。細管内面と円筒磁石との間に隙間を設けるのは毛細管現象により特別な動力なしに作動液体をある程度の高さまで吸い上げることが可能になるためと後述するように水中でソレノイドピストンを駆動させる際に生じる抗力をあまり大きくしないためである。図2にはこの毛細管プローブの動作原理を示しており、同図の上部はソレノイドコイルに印加する駆動電流波形を示している。細管の開口部から水滴を静かに成長させると水の表面張力と自重の釣り合いにより洋梨型になるが、水滴を素早く押し出すとその形が細長くなる。円筒形磁石の瞬間的な往復動作により水滴が伸長し、水滴先端が対象物へ接近する。そして接触した時、それを捕獲し直ちに管内へ収納することができる。その特徴をまとめ次のようになる。

- (1)円筒磁石が下方に素早く移動すると細管内の水が開口部から押し出され、広がらずに先端が対象物に到達する。
- (2)対象物と水滴先端が接触すると水と物体の界面に作用する表面張力が物体の自重より大きければ、物体は水滴内に取り込まれる。
- (3)捕獲と同時に円筒磁石は元の位置に戻り、物体は一旦収納される。
- (4)捕獲した微小物を排出させる場合は円筒形磁石を急激に引き上げ、捕獲物だけを水滴先端から離脱させるか、または開口部において水滴を最大伸長させ、捕獲物を水滴といっしょに開口部から離脱させる。

3. 設 計

前章で述べた機能を有する毛細管捕獲プローブを実現する場合、次の挙動や条件を予備実験により物性値等の補正を行いながら総合的に設計する必要がある。液体の表面力は接触する物体の表面の状態や温度などで大きく変化し、またその動的な現象の厳密な解析は難しくまた本論文の主旨ではないため、次のような簡略的な設計を行っている。

3.1 使用する細管の直径

まず最初に毛細管現象で自然に引き上がる水位と細管のおおよそ内径および使用できる円筒形磁石の直径を設定する。自走機械によって毛細管プローブを水面に接触させた時、表面張力により吸い上げられる水位は管内の円筒形磁石が完全に液中にある必要がある。毛細管の内径が細いとその水位は高くなるが機構の一部が不自然に突出するため好ましくない。また毛細管内径が大きいと水位が低くなり、径が大きく短い円筒形磁石を使用することになるが毛細管先端から突出させる水滴のストロークが短くなり、作動範囲が小さくなる。2～3mmの作動範囲を確保するためには少なくとも最初に10mm程度の水位が必要であり、内径約1mmの毛細管で十分である。

3.2 細管開口部の界面で生じる実際の表面力

細管先端から水を静かに成長させ、水滴の自重により細管から離れる瞬間の水滴の大きさを調べることで使用する細管と水との界面で作用している実際の表面力 H を求めることができる。細管口から離れる直前の水滴を直径 D_d の球と仮定し、その概算重量を求め開口円周長で除した値を便宜的に管と水滴との界面で作用する表面力としている。これは後述するように捕獲できる物体の最大重量の目安となる。管の外径 D_c 、水の密度 ρ 、重力加速度 g とすれば管口付近の単位長さ当たりの表

Fig.1 Structure of capillary capturing probe

Fig.2 Principle of capillary probe and control signal to solenoid coils

面力 H は次式で算出できる。

$$H = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D_d}{2} \right)^3 \rho g / (\pi D_c) \quad (1)$$

3.3 管内における円筒形磁石の移動と排水量

前節でも触れたようにこの機構は細管に巻き付けたソレノイドコイルで発生する磁界を変化させ、細管内の円筒型小型磁石を駆動している。細管と円筒磁石には前述したように隙間を設

けているが、円筒磁石を素早く動かすと水が狭い間隙を流れるためにより大きな抵抗力を受けるようになる。このため限られた電磁力により円筒形磁石を素早く駆動する場合、あまり間隙を小さくすることができない。一方、押し出される水量は間隙が大きくなると粘性流体の速度分布により間隙に停留する水量が多くなるため排水できる水量は少なくなる。

(a) 管壁効果と押し出される水量

管内を移動する物体に働く抗力 F は次式で考えることができる。まず物体が球形の場合を想定し、ストークスの式が適用できるとすれば、

$$F = 3\mu\pi dk_h U \quad (2)$$

$$k_h = \frac{1 - 0.759(d/dc)}{1 - 2.105(d/dc) + 2.087(d/dc)^5 + 0.726(d/dc)^6}$$

ここで μ は水の粘性、 d は物体の直径、 d_c は管内径、 U は速度である。 k_h は管壁効果による補正係数であり、Harbmanの近似式を参照している⁹⁾。これによれば d/dc が0.6の時、 $k_h=10$ 、また0.7および0.8の時はそれぞれ $k_h=20$ 、45となり間隙が小さくなると急激に抗力が大きくなる。円筒形の場合、この効果はさらには大きくなると考えられる。つまり円筒磁石の径が細管の内径に近づくと、速度に比例する減衰項が大きくなり円筒磁石の動きが妨げられ、結果的に細管開口部の水滴を瞬間的に突出させることが難しくなることを意味する。この理由から円筒形磁石の外径をあまり大きく設定することができず、細管内径との間にある程度の間隙を許容しなければならない。予備実験では使用する小型円筒磁石を十分な大きな水槽内で静かに自然落下させ、平衡に達した落下速度から速度項に比例する減衰係数を算出し、これにHarbmanの補正係数を乗じて管壁効果を考慮した減衰係数を求めている。なお細管内を自然落下させてその平均速度から減衰係数を求めた実験も行い、この補正の結果と近いことは確認している。

次に磁石の移動により押し出される水量を考える必要がある。取り扱いを簡単にするため細管内壁と円筒磁石の間隙の流れを速度勾配が一樣なケット流と仮定する。この時、図3に示すように間隙における水の移動量は円筒径磁石と細管に挟まれた部分の体積の半分と近似できる。つまり押し出される全水量 W はこの水量と円筒径磁石の断面が移動する体積との和であると考えることができる。 s を円筒形磁石の移動量、 k は管内径に対する円筒磁石直径の比 d/dc とし、 k が0.5程度以上の範囲で次式を近似的な排水量としている。

$$W = \frac{\pi s d_c^2 (1 + k^2)}{8} \quad (3)$$

これは円筒形磁石の外径を小さくすると逆に押し出せる水量が少なく、水滴を伸長できなくなることを意味する。

(b) 電磁力の変化による駆動・位置決め

この機構は円筒磁石を2つのソレノイドの斥力で駆動・位置決めしているため、円筒磁石の移動量は単純に上下ソレノイドが発生する磁界から受ける力が平衡する位置から求められる。ソレノイドの巻き数が制限されるため、使用する円筒形磁石の磁界の強さはできる限り大きい方がよい。中心線上のコイル端から ξ だけ離れた点において有限長の空芯ソレノイドで発生する磁界 H_m は、コイルの長さ L 、平均半径 a 、単

Fig.3 Drained water pushed by magnetic piston

位長さ当たりの巻き数 n とすると次式で一般に与えられる⁹⁾ (図6参照)。

$$H_m = \frac{k n_i I_i}{2} \left\{ \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + a_i^2}} - \frac{\xi - L_i}{\sqrt{(\xi - L_i)^2 + a_i^2}} \right\} \quad (4)$$

この時、磁界内に置かれた点磁荷 m_b に対しては $F_m = H \cdot Em_b$ の力が作用する。ここで円筒形磁石の場合はその両端面から磁界が発生していると考えているが、実際は駆動する磁石の大きさが無視できず、また磁界の乱れやコイルの巻き方の不整合などのため補正係数 k_c が必要となり、ここでは後述する簡単な予備実験により決定している。

3.4 印加電流の大きさと印加時間

駆動回路を簡単にするために上下ソレノイドの印加電流は単純な矩形波としている。前述したようにソレノイドからの磁力が釣り合う位置で円筒形磁石は静止する。釣り合っている状態からそれぞれのコイルへの印加電流を差動的に変化させると力の平衡が崩れ、新しい釣り合い点まで移動する。この時、近似的に磁石に作用する力を新しい釣り合い点からの距離に比例する復元力とすると、水の満たされた細管内の質量 m の磁石の運動を簡単な2次系運動方程式で考えることができ、次式のような時間-変位曲線が得られる。これにより減衰係数または直径比に応じた挙動が予想できる。

$$x = e^{-\xi \omega t} \left\{ x_0 \frac{e^{\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t} + e^{-\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t}}{2} + \frac{\xi x_0}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \frac{e^{\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t} - e^{-\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t}}{2} \right\} \quad (5)$$

$$\omega n = \sqrt{\frac{kt}{m}}, \quad \xi = \frac{ct}{2\sqrt{m \cdot kt}}$$

ここで k_f は磁界の非平衡によって発生する磁力をばねとして近似した時の弾性係数である。 c_f は円筒磁石が水の満たされた細管内で移動する場合の減衰係数であり、前述したように管内を移動する物体に働く抗力に相当する。この機構は粘性抵抗が支配的であるためその応答は過減衰系となり、前述したように間隙が小さくなると管壁効果により抵抗が急激に大きくなることに注意しなければならない。この式からコイルに電流を印加し、初期位置から新しい釣り合い点までに到達させるために必要十分な印加時間を求めることができる。それ以上の時間通電しても磁石は静止したままであり、逆に管内の表面張力により水滴が自然に吸い上げられることになる。また差動的に変化させる電流値の幅が大きければ大きいほど磁力による復元力が大きくなり、見かけ上ばね定数の大きな系となる。これは円筒形磁石の移動速度を大きくすることになり、水滴を素早く押し出すことができるが、逆にコイルで発生するジュール熱も大きくなるので使用しているソレノイドコイルの熱容量を考慮しなければならない。

ここまですべて整理するとまず使用する細管内径や円筒形磁石の直径が決まれば、磁石が管内を移動する時のおおよその減衰係数 c_f を式(2)から求めることができる。また上下ソレノイドコイルの巻き数と円筒形磁石の磁界の強さから、磁界の変化時に対する磁力の釣り合い点を求めることができる。この結果、円筒形磁石の移動距離およびその移動に要する時間および排水量などが求められる。この移動に必要な時間は前述したように水滴が管内の表面張力によって球状に戻ろうとする時間より十分小さいことが必要であり、また排水量は必要な水滴の伸長量に見合う量でなければならない。

3.5 伸長した水滴が対象物を捕獲し、収納できる条件

水滴に接触した捕獲対象物は界面で生じる表面力の垂直方向成分 T が物体の自重を越えた時水滴内に取り込まれ、自重と平衡する位置で静止する。この場合、接触角は水と物体との濡れ性により大きく左右される。また液体と物体の界面長の大きい方が捕獲に必要な表面力が容易に得られる。図4に毛細管と同程度の直径を有する球状物体を捕獲する時のモデルを示している。簡単のため物体と水との接触角を θ 、水滴が物体を覆う深さを h 、表面張力 σ_L 、物体の半径 r_m とすれば次式が成立する時、すなわち上向きの表面張力 T が物体の自重 W より大きければ物体は捕獲される。ただし、物体と床面との間には他の表面力が作用していないとする。

$$T = 2\pi\sqrt{2h \cdot r_m - h^2} \cdot \sigma_L \cdot \cos\left(\alpha + \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

例えば、水滴と同程度の直径を有する直径1mmの銅製の球を捕獲する場合、界面での水と物体の接触角が90度程度であれば、0.1mmの深さで水滴が球に接触するだけで水滴に取り込まれる。

3.6 捕獲物を排出させる条件

捕獲した微小物を排出する場合、瞬間に水滴が管内に戻るようにソレノイドの印加電流を調整し、磁石を移動させる。この時、物体と液滴先端部との界面で発生している表面力がもはや物体を支えることができず、物体は落下する。上部が凸形の微小物の場合、表面力が直ちに小さくなるので容易に物体だけを水滴先端部から離脱させることができる。また物体が軽量で平坦形状の場合、物体と水滴との間の表面力が自重に比べて大きくなり、この部分で切り放すことが難しくな

Fig.4 Surface tension force between water drop and small object

Fig.5 Developed capillary probe with tandem solenoid coils and magnetic piston

る。そのため水滴を最大限伸長し、物体を含む水滴を細管開口部で離脱させればよい。

4. 毛細管捕獲プローブの試作と基礎実験

前章で述べた設計指針に基づいて試作した毛細管捕獲プローブを図5に示す。磁力の算定や液体と細管開口部の界面力などは予備実験で実際の値を確認し、物性値や設計式を補正しながら試作を行った。小型自走機械に搭載することを考慮し、まず使用する毛細管の内径や円筒形小型磁石の外径を検討した。実際に使用した円筒形磁石の寸法は直径 $d=1.0\text{mm}$ 、長さ $L_m=5\text{mm}$ 、材質はネオジであり公称1500ガウスの磁界の強さを有している。また細管内に表面張力により水が自然上昇する

水位以下にこの磁石の初期位置がなければならぬため、下部コイルの巻き長を6mm以内とした。上部コイルは円筒形磁石の押し出し力を大きくするために、下部コイルよりも巻き数を多くしており上下非対称形である。ソレノイドコイルは素線径0.26mmを使用し、本体に搭載できる大きさの制限から下部コイル長 $L_1=6.1\text{mm}$ 、平均半径 $a_1=2.0\text{mm}$ 、巻き数を約100回、また上部コイル長 $L_2=16.4\text{mm}$ 、平均半径 $a_2=1.5\text{mm}$ 、巻き数を約150回とした。

4.1 電磁力と円筒形磁石の可動範囲の算定

使用した円筒形磁石とコイルに発生する磁力とこれに向かい合わせ、差動的な入力信号を与える時の移動ストロークを求める。まずコイルを巻いた毛細管に円筒磁石を入れ垂直に立てた状態でコイル端と磁石下端の距離 x を0にするに必要な電流を求める。この時、コイルは磁石の自重を支える磁力を発生していると見なすと式(4)より補正係数 k_c を求めることができる。使用したコイルについてこの補正係数はそれぞれは4.1と10.1であった。次にこのソレノイドコイルを毛細管に巻き付けた時、その間に置かれた磁石に作用する力を求める。磁石の長さを考慮し、磁石の位置に対してどのような力が作用するかを図6に示す。この図では上下のコイルの間隔 H_s を3.5mmとし、磁石に作用する力がコイルへの印加電流 I を0.1から0.5Aまで変化させた時にどのように変化するかを示したものであり、これよりpush-pull動作させた時の可動範囲を力の平衡点から求めることができる。例えばそれぞれのコイルへの印加電流を上部コイル0.1→0.5A、下部コイル0.5→0.2Aと瞬間に変化させれば、円筒磁石の可動範囲は図より約3.4mm

Fig.6 Magnetic piston positioning and dimension of capillary probe

であることが予想できる。また印加電圧を変えた瞬間の非平衡時の等価ばね係数も磁石の移動距離と磁力の差から近似的に求めることができる。

次に使用する毛細管と円筒形磁石に設ける間隙を考える。式(2)の管壁効果を考慮し、式(5)で説明した磁石の時間-変位曲線に具体的な数値を入れて計算した結果を図7に示す。ここでは磁石径と細管内径の比をパラメータとして、それぞれに対する減衰項を求めて計算した。直径比が1に近い場合、減衰の影響が著しくなり、水滴を瞬間的に押し出すことが難しく、突出する水滴が伸長する前に球形に近づく。そのため水滴が捕獲対象物に届かなくなる。詳細な内容は紙面の関係で省略するが、直径1mm程度の水滴では0.1秒程度で表面張力が平衡する球形に戻るため、少なくとも0.05秒以内で水滴を突出させる必要があり、図より直径比が0.75以下であれば良いことが分かる。しかし直径比が小さすぎると素早く円筒磁石を駆動できるが、式(3)で示したように逆に押し出せる水量が少なくなり、結果的に水滴の作動範囲が小さくなる。直径比が0.7の時、円筒磁石と細管との間隙がない場合の約75%の水量しか押し出すことができず、これ以下になれば水滴の作動範囲が小さくなる。これらのことから円筒磁石と細管の間隙は直径比で0.7～0.75が適当であることがわかる。つまり直径1mmの円筒形磁石を使用する場合、毛細管の内径は1.3～1.4mmが適当であることになる。また平衡点に達するまでの時間は0.05～0.08秒であり、前述したようにソレノイドコイルへの電流の印加時間の目安となる。またこの可動範囲からおおよその排水量も求められ、これが細管開口部から円筒形状に突出したと仮定すれば、液滴の伸縮長を予想することができる。内径1.3mmの毛細管を使用すると式(3)で計算された排水量は 3.52mm^3 であり、相当する円筒状水滴の長さは約2.7mmとなる。これは目視による観察結果が3mmでありほぼ一致している。

5. 捕獲・排出実験と小型自走機械への搭載

図8に前章で設計試作を行った毛細管捕獲プローブを用いて、微小物の捕獲実験を行った結果の1例を示す。直径0.8mm

Fig.7 Transient response of the magnetic piston under the high damping ratio in the capillary tube. ($m=0.0027\text{g}$, $k_t=0.001\text{N/mm}$)

Fig.8 Sequential photographs of experimental results showing that the water drop can approach the small target and capture it quickly

Fig.9 Isometric view of the small robot with the capillary capturing probe

Fig.10 Surface clearing operation performed by the miniature robot with the capillary capturing probe

の銅球や0.4mmのアルミ球の捕獲に成功している。さらにガラス破片、紙切れ、消しゴムのかすなどの捕獲も可能であることを確認している。しかし表面に油などが付着した微小物は撥水性を有するため捕獲できず、本捕獲プローブを適用することはできない。図9にこの毛細管捕獲プローブを小型精密自走機械に搭載した写真を示す。自走機械はこれまでに開発したものと同様の構造であり本体の中央部に毛細管プローブを取り付けている。図10にこの捕獲プローブを搭載した小型精密自走機械を操作し、面上におかれた微小物(0.8mmの銅球)を捕獲し、投棄位置まで精密に搬送し、排出する一連の動作を行った結果を示す。自走機械の操作は操作者の目視と手動であるが、所定の機能を実行できることが確認された。

6. 結 言

本論文では小型自走機械に搭載可能でしかも単純な構造、原理で表面上の微小物を捕獲・排出できる機構として毛細管式の捕獲プローブを提案した。これは毛細管内の水をソレノイドと円筒形磁石で瞬間的に伸縮させ、先端部と対象物との界面に作用する表面力を利用して捕獲する。この機構を設計する場合に考慮しなければならない要件を整理し、その簡易設計方法を示した。そして実際に毛細管捕獲プローブを設計し、その性能を確認するとともにこれを圧電素子と電磁石で構成する小型精密自走機械に搭載し、面上にある微小物を捕獲し、所定の場所で投棄できることを確認した。今後は捕獲対象物の位置や高さを精密に測定する視覚センサーを搭載し、自動的に対象物を見つけ水滴の突出量を調整できるように改良し、さらに液滴の混合や攪拌機能についても検討する予定である。基礎実験に協力いただいた平岩慎也君(現、(株)パルステック工業)に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 青山尚之, 岩崎隆之, 佐々木 彰, 深谷次助, 下河辺 明: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第1報)-自走機械の設計と試作, 精密工学会誌, 59, 6(1993)1007.
- 2) 青山尚之, 加藤秀剛: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第2報)-精密点描加工と遠隔制御, 精密工学会誌, 64, 12(1998)1797.
- 3) Y.Ando: Microgrippers, J. of Robotics and Mechatronics, 2, 3(1990)214.
- 4) F.Arai, D.Ando and T.Fukyda: Adhesion Forces Reduction for Micro Manipulation Based on Micro Physics, Proc. of Workshop on MEMS, (1996)354.
- 5) A.Ashki, J.M.Dziedzic, J.E.Bjorkholm and Seven Chu: Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, Opt. Lett., 11, (1986)288.
- 6) 青山尚之, 平岩慎也, 岩田 太, 佐々木 彰, 深谷次助: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第15報)-毛細管を用いた捕獲プローブの搭載, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995)603.
- 7) H.Aoyama, S.Hiraiwa, F.Iwata, J.Fukaya and S.Sasaki: Miniature Robot with Micro Capillary Capturing Probe, Proc. of the 6th Int. Symp. on Micro Machine and Human Science, (1995)173.
- 8) J.Happel and H.Brenner: Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers(1983).
- 9) たとえば川村雅恭: 電磁気学, 昭晃堂(1974)など.