

[No.98-8(I)]

機械力学・計測制御部門講演会

D&D'98

conference



自然との対話

1998年8月17日(月)~20日(木)

於 北海道大学工学部

機械力学・計測制御講演論文集 [Vol.A]

Vol.A: ダンピング, 耐震・制振・免震, 電磁力関連のダイナミクス, 振動・音響利用の新展開, 計測・信号処理・異常診断, 広領域, パターンの形成と複雑さ, メカトロニクスにおける運動と振動の制御, 流体関連振動とそのアクティブコントロール
Vol.B: ロータ・ダイナミクス, 感性計測と設計, 広領域, スポーツ工学/ヒューマン・ダイナミクス, ダイナミカルシステムの非線形制御, 非線形現象の解析と応用と制御, 磁気軸受の応用, モード解析, シェル構造ダイナミクスの新展開, 最適設計, 振動基礎, 自動車の運動制御, マルチボディ・システムのダイナミクスと制御

主 催: 日本機械学会 機械力学・計測制御部門

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階 TEL (03)5360-3500・FAX (03)5360-3508

協賛: 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 自動車技術会, 情報処理学会, 人工知能学会, 精密工学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本音響学会, 日本建築学会, 日本原子力学会, 日本航空宇宙学会, 日本神経回路学会, 日本スポーツ産業学会, 日本造船学会, 日本鉄鋼協会, 日本トライボロジー学会, 日本ファジイ学会, 日本油空圧学会, 日本ロボット学会, バイオメカニズム学会, 日刊工業新聞社

407 操作力が空隙や運動の関数で表されるとき のマニピュレーションに関する考察

A study of manipulation when forces are presented by the function of the air gap or motion

○岡 宏一 (東京大学)
清水勝己 (東京大学)

樋口俊郎 (東京大学)

Koichi OKA, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Toshiro HIGUCHI, University of Tokyo
Katsumi SHIMIZU, University of Tokyo

In this paper, we study new manipulation methods which control forces by kinetic factor, such as air gap or velocity. For examples, there are magnetic force, electrostatic force, elastic force, Coriolis force, eddy current force, intermolecular force, atomic force, and so on. These forces are listed and are classified by the direction of the force (attractive or repulsive) and the derivative of the force (plus or minus). The features of the proposed manipulator system using these forces are describe. An experimental system is introduced.

Key Words: Manipulation, Non-contact, Motion Control, Force Adjustment Mechanism

1 はじめに

物体を操作することは、対象物に操作力を与えその力を制御することによって行われると考えることができる。たとえば、通常のロボットマニピュレータのハンドが対象物を操作するときには、ハンドは対象物と接触（把持）することによって力を伝達し操作する。接触によって対象物に力を働かせ、その力を制御することによって任意の動作を実現する。力を制御する方法として、モータの電流を制御し直接トルクを調整することによる方法のほかに、手先に柔らかい弾性体を取付け手先の位置を制御し、手先と対象物のギャップを変化させることにより、間接的に力を調整する方法も考えられる。

しかし、力を伝達することを考えると、必ずしも接触を伴う必要はない。磁気力、静電力などは非接触で力を伝達することが可能である。対象物に対して与える操作力を何らかの方法で調節することによって、マニピュレーションを行うことができると考えられる。操作力を調整する方法として、その起磁力や電圧などを変化させる方法が一般に考えられているが、別の方法として、磁力や静電力の発生源と対象物とのギャップを調整することによって対象物に働く力を変化させることができる。

このように、距離などを変化させることによって操作力を調整できることを考えると、運動を制御するという機械的な操作力調整機構をもったマニピュレータを構成できるはずである。本研究では、距離を変化させることによって調整できる操作力について具体的な例をあげ、それらの発生力の特徴に基づいてマニピュレータを構成するために必要な情報を考慮し分類する。分類された力を用いてマニピュレーションを行うための構成法やそのようなマニピュレー

タの特徴などについて考察する。最後に具体的なマニピュレーションの例として微小な浮上機構を試作した。この試作装置のモデルに基づいて数値シミュレーションを行うことにより、提案したマニピュレータを構成することの可能性を示す。

2 発生力がギャップなどで決定される操作力

操作力をギャップによって調整できる力の具体例を以下に挙げられる。その中で主なものを Fig. 1 に示した。図中、右の物体が操作する対象物であり、左側が手先である。手先の左右の運動に応じて対象物に働く力が調節できることを表している。S, Nがあるものは永久磁石、+, -があるものは電極、材料が特定されるものはその左に説明を加えてある。発生力に関しては力の主成分（左右方向の力）と、それに垂直な成分（上下方向の力）に分類して考察する必要があるが、今回は簡単のために主成分のみを考える。

(i) 弾性体を介した接触をとるもの。これは、位置決めをおこなうことによって対象物に力を働かせることができる。

(ii) 磁力、静電力などの同極。この場合は反発力が生じる。この力はギャップが小さくなれば大きくなり、逆にギャップが大きくなれば、力は小さくなる。

(iii) 磁力、静電力の異極。逆に吸引力が働き、ギャップが大きくなれば、力の大きさは小さくなる。

(iv) 永久磁石と強磁性体、静電気と導体など。iii) と同様にギャップが大きくなれば力は小さくなる。

(v) 永久磁石と超電導体。第1種超電導体か、第2種かによって反発か吸引か異なる。

(vi) 分子間力、原子間力など。iii) の場合と同様。

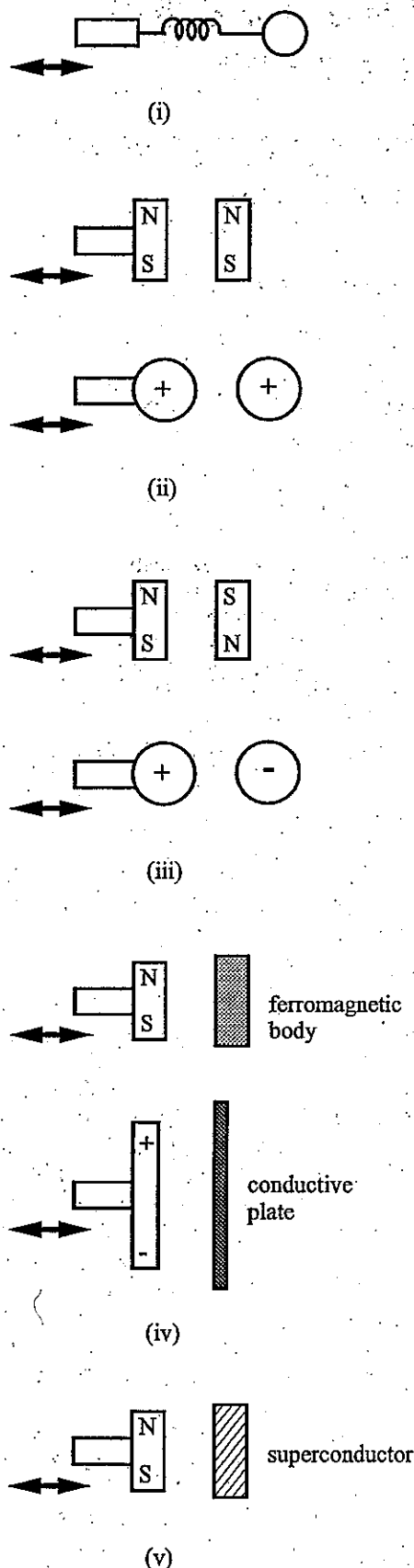


Fig. 1 Various force adjustment mechanisms by motion control

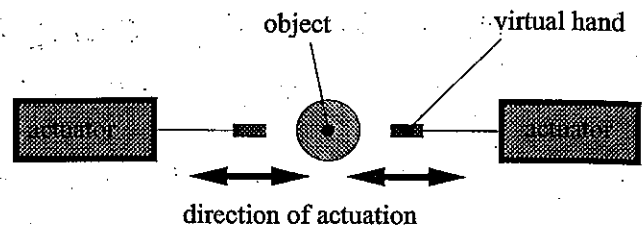


Fig. 2 Force Adjustment Mechanism by Air Gap Control

(vii) コリオリ力、渦電流による力、電磁誘導による力、ヒステリシスによる力など。これらは、物体が運動することによって力が働く力である。コリオリ力や渦電流による力の大きさは近似的に速度に比例した力と考えられる。

今回の考察では、(i) から (vi) までを考察の対象とする。これらの力は、その大きさが対象物とのギャップのみによって表現でき、発生力 f はギャップ d の関数として次式のように表されると仮定する。ただし、発生力は吸引力を正とする。

$$f = f(d) \quad (1)$$

式 (1) で表現できる操作力を次のように分類する。

a) 発生力は吸引力、ギャップが大きくなると吸引力は大きくなる。(v)

$$f > 0, \frac{\partial f(d)}{\partial d} > 0 \quad (2)$$

b) 発生力は吸引力、ギャップが大きくなると吸引力は小さくなる。(iii), (iv)

$$f > 0, \frac{\partial f(d)}{\partial d} < 0 \quad (3)$$

c) 発生力は反発力、ギャップが大きくなると反発力が小さくなる。(i), (ii), (v))

$$f < 0, \frac{\partial f(d)}{\partial d} > 0 \quad (4)$$

d) 発生力は反発力、ギャップが大きくなると反発力は大きくなる。

$$f < 0, \frac{\partial f(d)}{\partial d} < 0 \quad (5)$$

なお、(v) のばあい、吸引力か反発力かは第 1 種または第 2 種の超電導によって異なる¹⁾。

4 種類に分類された力を用いて、1 自由度の操作が行えるように、Fig. 2 に示すような機構を考える。中央にあるものが操作対象物であり、両側に位置する仮想ものが仮想ハンドである。仮想ハンドとは対象物の間に a) から d) までに示したような力が働くような機構であるとする。左右に同じ種類の仮想ハンドを用いるものとする。

このような機構の開ループでの安定性を考える。開ループが安定であるとは、操作対象物が平衡位置からずれたときに平衡位置に復元するような力が働くことであるとする。結果を Table 1 に示す。

Table 1 Stability of Manipulation System with Open Feed-back Loop

	$f > 0$	$f < 0$
$\frac{\partial f(d)}{\partial d} > 0$	stable	stable
$\frac{\partial f(d)}{\partial d} < 0$	unstable	unstable

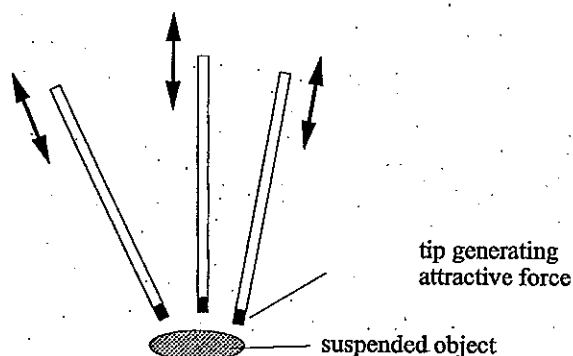


Fig. 3 Illustration of Manipulator Controlling Force by Air Gap

3 非接触操作力調節機構を用いたマニピュレータの特徴

前章では操作力を4つに分類したが、ここでは非接触で力を発生できる力を用いてマニピュレータを構成した場合について考察する。このようなマニピュレータの構想図をFig. 3に示す。この図では、対象物とマニピュレータの手先との間には、前章で示したような力が働いているものとし、3本の棒の根元の運動を制御することにより対象物を非接触で把持し操作するものである。このようなマニピュレータは次のような特徴を持つ。

1) 非接触で操作できるために、ハンドリングの瞬間における塵埃の発生がない。通常に接触形のハンドでは、対象物を把持する時に接触点から塵埃が発生する。非接触であれば原理的に発塵から開放される。

2) 対象物が柔軟なもので外部からの力に弱いものでも操作可能である。非接触で操作するため、対象物に大きな力を加えずに物体を持つことができる。

3) 非常に小さなものを浮上操作させる可能性がある。小さいものの場合、接触形ではハンドにくっついてしまう可能性がある。これは対象物を定位置に置く場合に問題となる。非接触であればその問題はない。また、原子間力や分子間力などを応用して、原子レベルでの対象物の操作の可能性がある。このような力では、発生力を直接制御できないため、ギャップを変化させることによって、操作力を調整することが有効であると考えられる。

4) 浮上のための制御ループが必要となることがある。前章に述べたように平衡点に維持するだけにでもフィードバック制御が必要である場合もある。操作性からこのことは不利である。

4 試作装置

前章では、提案した操作力調整機構を持つマニピュレーションの特徴を述べた。これらの特徴を確認するための装置として、微小な浮上システムを構成することを目的とし

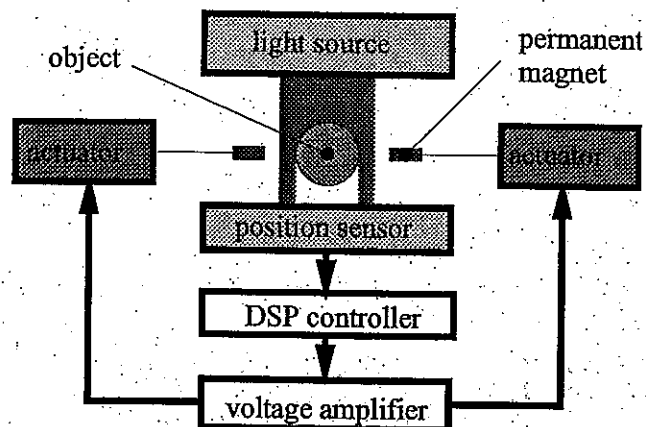


Fig. 4 Illustration of the Proposed Manipulation System



Fig. 5 Photograph of Piezoelectric Actuator

た1自由度の試作装置を製作した。Fig 4にその構成を示す。アクチュエータの出力端である針の先端に永久磁石をとりつけてある。永久磁石をアクチュエータによって左右に駆動し、対象物との距離を制御する。永久磁石の運動を制御することによって操作力を調節することができ、対象物を水平方向に操作可能であると考えられる。

永久磁石を駆動するためのアクチュエータとして、Fig. 5に示すような拡大機構付きの圧電素子を用いた²⁾。中央にある圧電素子の伸縮の運動が、上方に伸びる針状ワイヤの出力端に拡大されて出力される。150 Vの電圧印加で約0.28 mmの出力端変位が得られる。ワイヤの系は0.2 mmである。

装置の外観をFig. 6に示す。対象物の水平方向の位置検出器としてPSD素子を用いた。図中正面向こう側に直立している緑色の基板がPSD素子を含んだ回路基板である。こちら側からレーザ光を照射し、その影の軌跡を検出することで変位を得る構造である。PSDからの位置信号に基づいて、DSPを用いてデジタル制御を行い、アクチュ

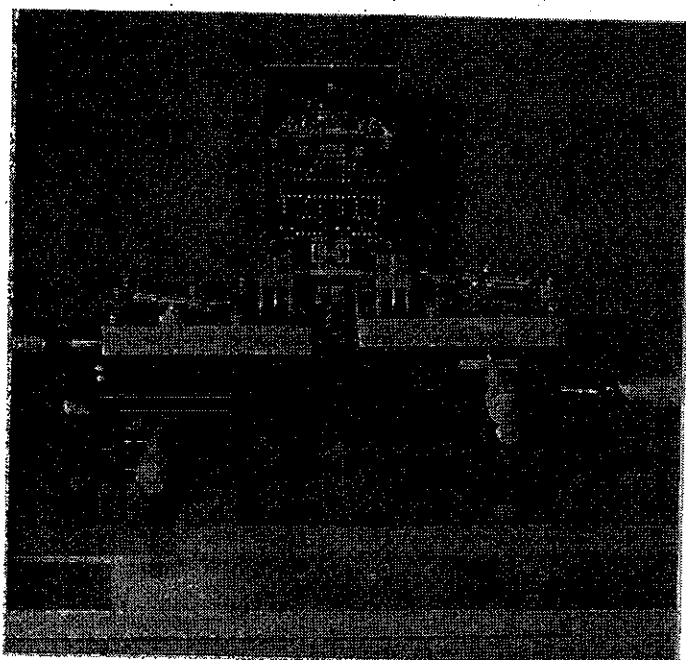


Fig. 6 Photograph of Experimental Setup

Table 2 Values of Experimental Manipulator

	symbol	value	unit
mass of object	m_0	32.4	mg
mass of magnet part	m_1	68.4	mg
force constant of actuator	k_t	34.3	mN/V
spring constant of actuator	k_1	17.8	kN/m
damping constant of actuator	ξ	0.5	Ns/m

エータ用のアンプを介して、永久磁石を駆動するシステムとなっている。

永久磁石は Sm-Co 磁石の円筒形で、その大きさは直径 1 mm、長さ 2 mm、重さ 55 mg である。操作対象物は直径 1 mm の鉄球で重さ 32 mg である。磁石はアクチュエータに接着剤を用いて取付けた。両側から伸びたワイヤの先に磁石が取付けられている。ワイヤはその変形を防ぐために、アルミに 0.3 mm の穴をあけてそれを通して支持されている。マニピュレータシステムの諸元および記号を Table 2 に示す。

5 シミュレーション

試作した装置において、実際に非接触で操作可能なことを確認するために Table 2 に示した値を用いて数値シミュレーションを行った。コントローラは対象物の変位に基づいて PD 制御を行うものとし、左右のアクチュエータには正負が逆の入力信号を加えるものとした。磁石の吸引力は予備実験によって対象物との距離との関係を求め、平衡点付近で線形化して計算した。フィードバックゲインは、 k_p 、 k_d をそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインとして、 $k_p = 6 \times 10^5$ V/m、 $k_d = 200$ Vs/m とした。シミュレーションは平衡位置から対象物が 0.1 mm ずれたところから、平衡位置に収束する様子を記録した。

対象物の運動の様子を Fig. 7 に示す。図からわかるように、まず対象物は上方に動き、その後平衡位置に収束して

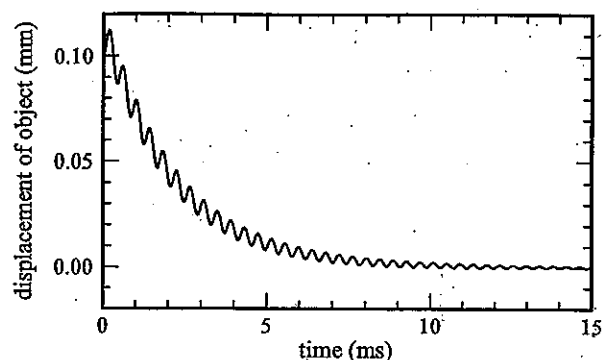


Fig. 7 Simulation Result

いることがわかる。これは左右の磁石の初期状態が平衡位置であるためである。この結果、提案したマニピュレータの構成の可能性が確認された。

また、対象物の動きには周期の早い振動が重畳している。この振動は解析の結果、アクチュエータに含まれるバネと磁石の質量から求めた共振周波数にほぼ一致することが確認された。

6 まとめと今後の課題

操作力を機械的な運動によって調整できる機構を考え、それを用いてマニピュレーションを行うことを提案した。そのような操作力の種類を考え、その特徴を述べた。微小なマニピュレーションを目指した実験装置の紹介を行い、シミュレーションを行った。

現在試作装置において、安定した非接触浮上は実現できていない。この原因は、デジタル制御のための応答の遅れと、微分演算の誤差の影響であると考えられる。シミュレーションでも確認されたがアクチュエータは約 3.5 kHz で共振をおこす。制御系のサンプリングは 5 kHz に設定しているため、この共振を制御することはできない。サンプリング周期を短くすると速度を求めるために差分を用いているために精度が非常に悪くなり、十分な速度フィードバックが不可能となる。

この対策として、コントローラをアナログ回路によって構成する方法、オブザーバによって速度を検出することによってサンプリング周期を短くする方法、ローパスフィルタを用いてアクチュエータの振動に対してコントローラが制御を行わない用にする方法などが考えられるが、これらのことは今後実験を行う予定である。

今後の研究の展開として、操作力を用いたマニピュレーションの構成法を種々の操作力に対して体系化して考察すること、実験装置における対象物の把持が行えるようにすること、さらには、より小さなマニピュレーション装置を開発することなどがあげられる。

参考文献

- 1) E. H. Brandt: Levitation in Physics, Science, 243, 349, (1989)
- 2) 矢野健: 圧電縦効果を用いたインパクトプリンタの研究, 東京大学博士論文, (1988)