

リニアアクチュエータアレイによる物体搬送の試み - 魔法のじゅうたんを目指して -

学生員 及部 七郎齋 (東京大学)

正員 堀 洋一 (東京大学)

Attempt of Object Transfer by Linear Actuator Array - Aiming for Magic Carpet -

Oyobe Hichirousai, Student Member, Hori Yoichi, Member (University of Tokyo)

A novel object transfer system named "Magic Carpet" composed of linear actuator array and driven by autonomous decentralized type control algorithm is proposed. An object is manipulated by a large number of contact points with many actuators, which differs from conventional systems like belt conveyor. In this paper, the control algorithm for such "distributed manipulation" is proposed.

Due to recent development of micromachine technology, distributed manipulation becomes more important. This system has a big advantage in its fault tolerance because it has a lot of actuators with poor performance to move a large heavy object. However, it has a serious wiring problem to be solved and homogeneous structure should be introduced because of a large number actuators.

To solve these problems, "combined control of central /autonomous decentralized algorithms" is proposed and evaluated by computer simulation and experiment.

キーワード : Autonomous Decentralized System, Variable Structure Control, Object Transfer System, Distributed Manipulation

1. はじめに

物体を搬送する方法は様々なものがある。ベルトコンベアやロボットマニピレータで把握して搬送する方法が思い浮かぶ。そのどちらも世界中で用いられ、欠くことのできないものとなっている。分散マニピレーションは多数のアクチュエータにより多数の支点を通じて対象物に作用する方法で、この手法により物体搬送を実現する試みが様々なところで考えられている。多数の人がある人を胴上げをして搬送するイメージである。この方法は、

- (1) システムの耐故障性の増加
- (2) 個々の出力が小さく小型のアクチュエータでも大型で重い物体が搬送できる。

などのメリットがある。この考え方は、言い換えれば、高出力のアクチュエータを一つ用意するのではなく、低出力でシンプルな構造のアクチュエータを複数用意しそれらを複合し高出力を得る方法といえる。しかし、一般的に考えれば、低出力なアクチュエータを複数用意する方が高出力のアクチュエータを一つ用意するよりコスト的には割高であろう。なぜ最近このようなコンセプトが注

目されるようになったかといえば、マイクロマシン[†]技術により多数のアクチュエータの集積が低コストで簡単に可能となると予想されるからである。

このような多数のアクチュエータで構成されるシステムは多分なメリットを持っているが、少なからず問題点も抱えている。下記にその中で構造的に本質的に避けることができない問題点を挙げる。

(1) 通信

- 多数のアクチュエータで構成されることが前提のため、個々のアクチュエータの制御用の信号線は大した量でなくとも、多数になれば非常に膨大になる。そのためスマートなシステムの構築のためには隣接するアクチュエータとの通信だけで実現できるアルゴリズムが望ましい。

(2) 構造

- 同様にアクチュエータが多数であるため、一つ一つのアクチュエータが構造が異なるものを前提としない。一つ一つ異なるアクチュエー

[†]マイクロマシンは三つのマイクロ化、多数性、マイクロエレクトロニクスの特長を持っている。

タを製作するのは煩雑である^{††}。

問題点があったとしても、それを越える利点があると考えられるため、分散マニピレーションの研究は小型のものはマイクロマシン⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾で大型のものは我々の住んでいるマクロスケール⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾で研究が進められている。また実際に応用され、大変な成功を収めている例は超大型光学反射鏡を擁する天体望遠鏡『すばる』がある。

複数のアクチュエータが並列に動作し、対象物に作用するため、アクチュエータの協調、対象物の挙動などを考慮したアルゴリズムが必要となり、また、問題点も考慮しなくてはならぬ複雑なものが予想されるが興味深い。

2. 多数のアクチュエータで構成される Magic Carpet

研究の目的は分散マニピレーションのアルゴリズムを提案することである。利点を引き出し、問題点を克服するアルゴリズムを提案することが目的である。多数のアクチュエータで構成される物体搬送システムを想定し、その制御アルゴリズムを考察することにより、分散マニピレーションのアルゴリズムを考察する。以下で多数のアクチュエータにより構成される物体搬送システムを提案する図1のような2次元平面に多数配列したリニアアクチュエータによる物体搬送システム Magic Carpet を構築する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

搬送物体（ボール）を
任意の初期位置から目標位置へ搬送する。
 $(x_{ini}, y_{ini}) \Rightarrow (x_d, y_d)$

2次元平面 ($x_{min} \leq x \leq x_{max}, y_{min} \leq y \leq y_{max}$) に x 方向に n_x 個、 y 方向に n_y 個配列したアクチュエータ、センサ、多少の計算機能をもつ計算ユニットがひとまとまりになったモジュールによる物体搬送システムを構成する。各モジュールの機能として下記を仮定する。

センサの動作

- モジュール上に物体があるかないかを判別する。
また、どの程度の重さがかかっているかもわかる。

アクチュエータの動作

- z 方向にリニアドライブすることができ、針のようなものを出したり引いたりができる。また、その針のようなものの変位は連続的なものである (*on* か *off* のような2値ではない。)

計算ユニットの動作

- 非常に単純な計算しかできない(四則演算程度)。
また、限られたユニットとしか通信できない(隣接するユニット、通信の局所性)

提案するアルゴリズムは、上記仮定のもとで、1で指摘

^{††}マイクロマシンは半導体加工技術により製作されるため、均質構造の製作は向いているが、不均質構造の製作には不向きである。

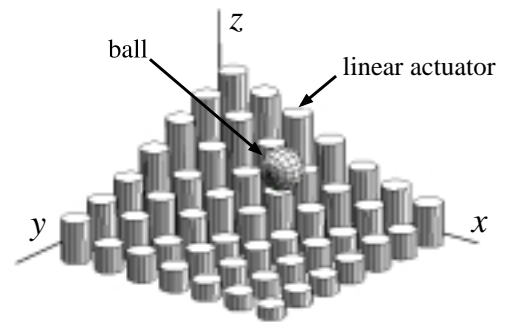


図1 想定する物体搬送システムのイメージ図
Fig. 1. Conceptual configuration of magic carpet.

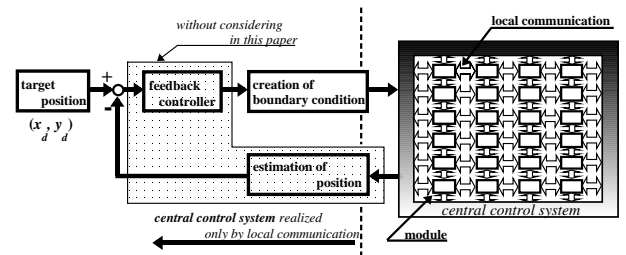


図2 自律分散集中複合制御

Fig. 2. Combined control of central / autonomous decentralized algorithms.

した局所的な通信や同質構造といった問題点を考慮しながら、

- 多数のアクチュエータモジュールの協調駆動
- 物体を目標位置まで搬送するシステムの構築が目的である。

3. 提案システムによる物体搬送

3.1 自律分散集中複合制御系 通信路確保の難しさから局所的なところしか通信できないことや各モジュールに適用するアルゴリズムは同質であるという制限を受ける。この二つの制限を考慮したシステム形態、図2の実現を目指す。各アクチュエータモジュールはマイクロプロセッサを持っていることを仮定しているから、それ自身が自律できる。しかしながら、隣接モジュールとしか通信できないという局所的な通信であるため、ただそれだけならば自律分散システムとなる。ただし、集中制御系と呼んでいるモジュールの周りを囲んでいるシステムから境界条件のように入力が入られるような形をとることにより、部分的な集中制御も可能な形となっている。そのため、このようなシステム形態を自律分散集中複合系と名付けることにする。この自律分散集中複合系では、

- 隣接するモジュールとの通信の方法
- 集中制御系での境界条件の設定

が設計のポイントとなる。最終的に実現を目指すシステム形態は図2である。本論文ではまず手始めに、搬送物体の位置の推定とフィードバックコントローラを除く部

分、アクチュエータモジュールの局所的な通信と境界条件の生成に着眼し、フィードバックを行わず前向き計算のみによる搬送アルゴリズムを提案する。

3.2 物体搬送アルゴリズム 物体搬送という目的を実現するために、『物体を転がして目標位置に運ぶなら、目標位置の力学的なポテンシャルを最小化すればよい』アルゴリズムを考えることにする。目標位置の力学的なポテンシャルを最小化するためには各モジュールには少なくとも、

- (1) 自分の座標
- (2) 目標位置の座標

の情報が必要なことは明白である。

3.1 で提案したシステムでは設計のポイントが二つあった。一つは各モジュール間でのデータのやりとり、もう一つは集中系での境界条件的な指令の生成である。自分の位置を知らせる方法と目標位置を知らせる方法についてそれぞれ、どのように隣接モジュールとの通信を行うか、また境界条件をどのように設定するかを以下で説明する。本節最後では実際のアクチュエータに適用するための離散化を行う。

3.2.1 隣接するモジュールとの通信の方法 はじめに各モジュールに自分の座標を設定することを考える。各モジュールの x 座標を設定するための変数を $u^x(x, y)$ とする。このとき $u^x(x, y)$ が解、

$$u^x = x$$

$$(x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}) \dots\dots (1)$$

を持たば、各モジュールに自分の座標を設定することができる。通信の局所性を満たしながら式 (1) のような解を持たせることが目的となる。式 (1) を満たす解を持つ方程式ならばどのような方程式でもよく、幾つか候補が考えられるが、最も簡単な Laplace 方程式 (2) を用いて実現する。

$$\frac{\partial^2 u^x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^x}{\partial y^2} = 0$$

$$(x_{\min} < x < x_{\max}, y_{\min} < y < y_{\max}) \dots\dots (2)$$

式 (2) は各モジュール間に適用される相互干渉を示す式であり、隣接モジュールとの通信方法を記述した式となっている。これにより各モジュールは自分の位置を知ることができる。また、 y 方向も同様に考え u^y とする。

つぎに各モジュールに搬送物体の目標位置を設定することを考える。各モジュールに搬送物体の目標位置の x 座標を設定するための変数を $u^{xd}(x, y)$ とする。このとき $u^{xd}(x, y)$ が解、

$$u^{xd} = x_d$$

$$(x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}) \dots\dots (3)$$

を持たば、各モジュールに搬送物体の目標位置を設定することができる。各モジュールに自分の座標を設定したときと同じ方法を用いれば、

$$\frac{\partial^2 u^{xd}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^{xd}}{\partial y^2} = 0$$

$$(x_{\min} < x < x_{\max}, y_{\min} < y < y_{\max}) \dots\dots (4)$$

となる。これにより各モジュールは搬送物体の目標位置を知ることができる。また、 y 方向も同様に考え u^{yd} とする。

3.2.2 集中制御系での境界条件の設定 式 (1) を得るためには式 (2) だけでは不十分で、集中制御系で境界条件を設定する必要がある。式 (1) を得るためには式 (2) に境界条件、

$$u^x(x_{\min}, y) = x_{\min}, u^x(x_{\max}, y) = x_{\max}, \dots (5)$$

$$u^x(x, y_{\min}) = u^x(x, y_{\max}) = x$$

を設定してやればよい。また同様に、式 (3) を得るためには式 (4) に境界条件に当たる式 (7) を集中制御系で設定してやればよい。

$$u^{xd}(x_{\min}, y) = u^{xd}(x_{\max}, y) = u^{xd}(x, y_{\min}) \dots (6)$$

$$= u^{xd}(x, y_{\max}) = x_d$$

各モジュールが変数 u^x と u^{xd} を見ていれば、各々のモジュールは搬送物体の目標位置と自分が配置されている場所に関する重要な情報を知ることができる。得られた自分の座標と目標位置の座標から搬送物体の目標位置 (x_d, y_d) の力学的なポテンシャルを最小化するために式 (7) を用いる。ただし、 (u^x, u^y) はモジュールの配置位置である。

$$z(x, y) = f(\mathbf{u}) = f(u^{xd}, u^x, u^{yd}, u^y)$$

$$= \frac{\alpha_1 \{(u^x - u^{xd})^2 + (u^y - u^{yd})^2\}}{\alpha_2 \{(u^x - u^{xd})^2 + (u^y - u^{yd})^2\} + 1} \quad (7)$$

3.2.3 実際のアクチュエータへ適用するための離散化 以上では、アクチュエータモジュールが xy 平面に連続として扱えるほど高密度で集積されていると仮定し、連続空間で設計を行った。ただし、実際の実験においてはアクチュエータモジュールは連続として取り扱えるほど集積されていない。そのため、変数 u^x は下記の (x_i, y_j) のところのみに存在する。そのため、実際のアクチュエータへ適用するため、本節で離散化を行う。

$$x_i = x_{\min} + i\Delta x \quad (i = 0, \dots, n_x - 1) \dots (8)$$

$$y_j = y_{\min} + j\Delta y \quad (j = 0, \dots, n_y - 1) \dots (9)$$

ここで $\Delta x, \Delta y$ はそれぞれ x, y 方向のモジュール間の距離で、また n_x, n_y は x, y 方向のモジュールの並びの数である。式 (1) を差分近似で離散化すると、

$$\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{u_{i+1,j}^x - u_{i,j}^x}{\Delta x} - \frac{u_{i,j}^x - u_{i-1,j}^x}{\Delta x} \right)$$

$$+ \frac{1}{\Delta y} \left(\frac{u_{i,j+1}^x - u_{i,j}^x}{\Delta y} - \frac{u_{i,j-1}^x - u_{i,j}^x}{\Delta y} \right) = 0 \quad (10)$$

となり、 u^x は、

$$u_{ij}^x = u^x(x_i, y_j) = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)^{-1} \left(\frac{u_{i-1,j}^x + u_{i+1,j}^x}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j-1}^x + u_{i,j+1}^x}{\Delta y^2} \right) \quad (11)$$

となる。式 (11) は隣接モジュールとのみの通信、モジュールの同一構造という制約条件下で実現されている。

3.3 提案アルゴリズムによる物体搬送実験 ここでは、提案手法による方法で行ったシミュレーションと実験結果を示す。表 1 はシミュレーションと実験に用いたパラメータである。実験は実際に実験装置を製作し、その実験装置を用いて行っている。実験装置は 64 個のアクチュエータモジュールにより構成され、その 64 個のアクチュエータモジュールの上にゴムシートを覆い被せ、その上にピンポンボールをおき、その挙動を観察するシステムとなっている。実験装置の構成の詳細は付録に示す。

図 3, 4 は搬送物体 (ピンポンボール) の挙動でそれぞれシミュレーションと実験結果である。図 3, 4 中の時間応答は、初期位置 $(5.5\Delta x, 5.5\Delta y) = (0.3575, 0.3575)$ [m] から定常誤差を伴って目標位置 $(1.5\Delta x, 2.5\Delta y) = (0.0975, 0.1625)$ [m] に収束している。この定常誤差はアクチュエータ間隔 $(\Delta x, \Delta y)$ に原因がある。アクチュエータ間隔が小さければ小さいほど、この定常誤差も小さくなる。アクチュエータ間隔が搬送物体の位置制御の解像度となることは直感的にも理解しやすい。

また、図 3 の時間応答にはパラメータ α_2 を変化させた場合の時間応答の変化を見るために幾つかの α_2 での時間応答を示した (その他のシミュレーション、実験では $\alpha_2 = 50$ である)。式 (7) からわかるように、搬送搬送物体の時間応答は α_1 と α_2 の比でほぼ決まる。 α_1 を固定で、 $\alpha_2 = 40$ のときは搬送物体がカーペット上から落ちてしまう、 $\alpha_2 = 60$ のときは搬送物体が初期位置から動き出すことができない。 $\alpha_2 = 50$ 付近がほぼ良い応答を示している。 α_1, α_2 に対して搬送物体の挙動は大きく変化する。搬送物体が変わったときは α_1, α_2 を調整することにより、搬送物体の挙動を調整できる可能性がある。図 3, 4 には搬送物体の軌跡も示した (Δ は 500[ms] ごとで付けてある)。

実験結果の図 4 の搬送物体の軌跡の 3-5[s] 付近で搬送物体が不自然な挙動を示している。これは実験装置の制作上の問題に起因している。実験装置は自作のため、高精度に作ることは技術的に不可能である。そのため、カーペット表面に多少の凸凹がある。搬送物体の不自然な挙動はカーペット表面の凸凹な部分を搬送物体がそのとき移動したため、その結果として不自然な挙動を示している。また図 3,4 にはカーペットの挙動も示した。それぞれ、搬送開始直後、と搬送終了後である。

シミュレーション結果や実験結果、図 3, 4 に共通で見られるオーバーシュートや振動は搬送物体が本来持つ固有の振動でここで提案している手法では避けることができない。そのため積極的にセンサを使い、搬送物体の位

表 1 シミュレーション、実験で用いたパラメータ

Table 1. Parameters used in simulation and experiment.

Δx	0.065 [m]
Δy	0.065 [m]
n_x	8
n_y	8
(x_{\min}, y_{\min})	(0, 0)
(x_{\max}, y_{\max})	(0.455, 0.455) [m]
(x_{ini}, y_{ini})	$(5.5\Delta x, 5.5\Delta y) = (0.3575, 0.3575)$ [m]
(x_d, y_d)	$(1.5\Delta x, 2.5\Delta y) = (0.0975, 0.1625)$ [m]
α_1	0.5
α_2	50

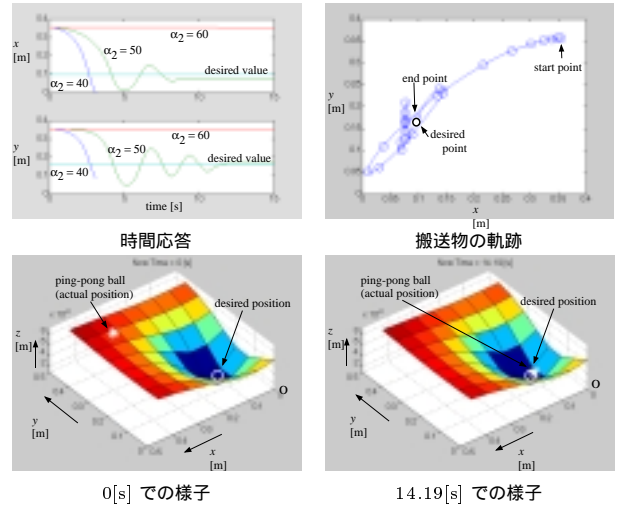


図 3 搬送物体の挙動 (シミュレーション)

Fig. 3. Behavior of ping-pong ball(simulation).

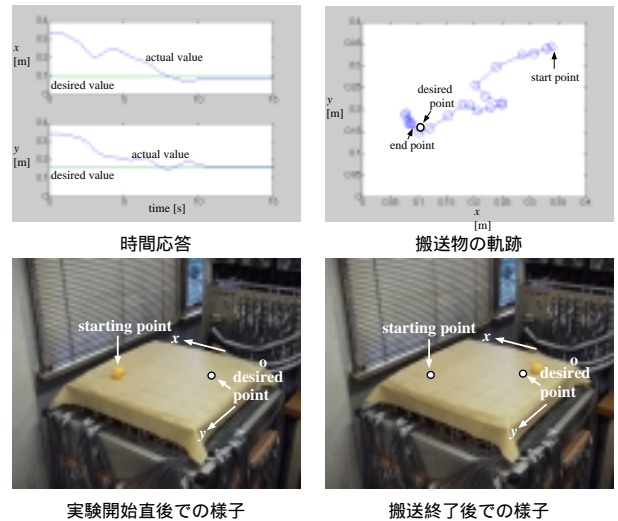
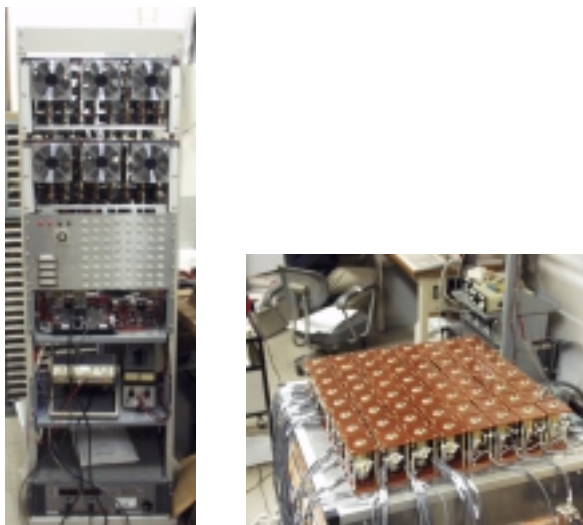


図 4 搬送物体の挙動 (実験)

Fig. 4. Behavior of ping-pong ball(experiment).

置を推定し、搬送物体のフィードバック位置制御を実現し、フィードバックコントローラによりオーバーシュートや振動を抑えることが課題と思われる。



64 個のコントローラと主電源

64 個のアクチュエータ

付図 1 実験装置の外観

app. Fig. 1. Overview of experimental setup

4. 結論

本稿では将来実現されるであろう多数のアクチュエータにより構成される物体搬送システムの構築を目指した。主として、

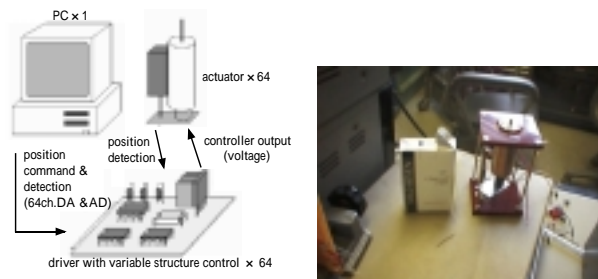
- (1) 通信の局所性、アクチュエータの同質性を満たすシステム形態の提案
- (2) 提案システム形態による物体搬送システムアルゴリズムの提案
- (3) 提案アルゴリズムのシミュレーション、実験による評価

を行った。提案手法を用いれば、通信の局所性、アクチュエータの同質性を満たしているため、物体搬送システムは劇的にシンプルな構造となる。また、シミュレーション、実験による評価からも提案手法が物体搬送アルゴリズムとしても有効であることが示された。

しかしながら、実験結果の節でも指摘したようにシミュレーション結果 (図 3) や実験結果 (図 4) に共通に見られるオーバーシュートや振動は目標位置の力学的なポテンシャルを利用して搬送する方法では避けることができず、また、最大勾配方向へ転がるもののみ搬送可能であって、直方体形状の箱やラグビーボールなどの複雑形状の搬送には向かない。より良い物体搬送を行うために、集中制御系では、搬送物体の位置を推定し、搬送物体の位置フィードバック制御によりオーバーシュートや振動を押さえ、搬送物体の形状に対してもロバストな制御系を設計することが、また各モジュールが単独で判断する自律分散制御では、それがどのように物体搬送に寄与するか考察することが今後の課題として考えられる。

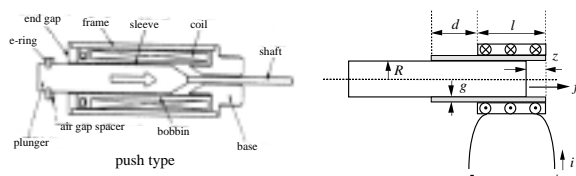
付 録

1. 提案システムの実験装置の制作



付図 2 実験装置の構成概略図とアクチュエータモジュール

app. Fig. 2. Outline of experimental setup and an actuator module.



付図 3 採用したソレノイドプランジャの構成

app. Fig. 3. Configuration of the solenoid plunger.

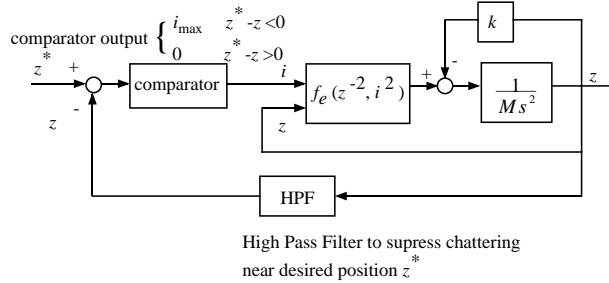
1-1 実験装置の構成 研究の目的は多数の自律アクチュエータモジュールで構成されるシステムの制御アルゴリズムを開発することである。本付録では製作した実験装置の構成を説明する。

付図 1 には実験装置の外観を示す。また付図 2 には製作した実験装置の基本構成図とアクチュエータモジュールを示す。実験装置は 64 個のモジュールにより構成される。具体的には 64 個のアクチュエータ、センサ、可変構造を持つ位置制御系、そして 1 台の PC である。64 個のプロセッサの実装は実験装置の制作上非常に困難であるため、1 台の PC でソフト上で仮想的に実現する。すなわち、実験装置自体の構成は集中制御システムであり、分散制御システムは PC 上で仮想的に実現される。64 個のプロセッサは 1 つの PC の中で仮想的に実現することとする。

また、実験装置製作の技術的な問題から高密度でアクチュエータを集積することはできない。そのため、搬送物体の自然な荷重分散を行うためにアクチュエータ表面部にゴムシートを張ることとする。

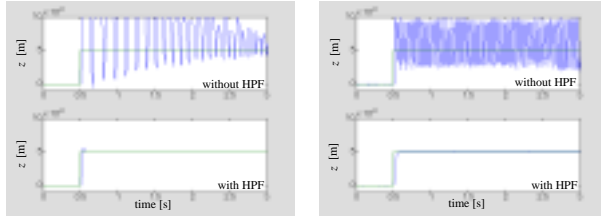
以下では、実験装置の制作上、最も工夫したソレノイドプランジャの位置制御設計を示す。

1-2 アクチュエータの位置制御系の設計 製作する実験装置のアクチュエータとしてソレノイドプランジャを採用することとする。まずはじめにソレノイドプランジャの位置制御系を設計する。付図 3 にソレノイドプランジャの構造図とその簡単な電磁気モデルを示す。位置制御系を実現するためにソレノイドプランジャには位置センサが付加されている。単純な付図 3 の電磁気モデルを用いれば、ソレノイドプランジャに発生する力を求めることができる。ソレノイドプランジャに発生する力



付図4 可変構造制御によるソレノイドプランジャの制御系

app. Fig. 4. Control system of solenoid plunger with variable structure controller.



付図5 ソレノイドプランジャの位置制御(左:シミュレーション、右:実験)

app. Fig. 5. Position control of the solenoid plunger (left:simulation, right:experiment).

は Ampere の周回積分を用い、式(付1)の形で求めることができる。得られた式から力は電流 i の2乗に比例し、位置 z の2乗に反比例することがわかる。

$$f_e = f_e(z^{-2}, i^2) = -\frac{2\mu_0 N^2 \pi R^2}{(2dz + gR)^2} i^2 \dots\dots (付1)$$

ただしここで、 μ_0, N, R, g, π, i はそれぞれ真空の透磁率、巻数、プランジャの半径、ギャップ長、円周率、ソレノイドに流れる電流である。式(付1)からわかるとおり、ソレノイドプランジャは非線形性が強い。そのため、その制御にはロバストなコントローラが必要となる。いくつかのソレノイドプランジャ位置制御用のコントローラを制作し、その結果として可変構造を持つコントローラを採用することとする^{††}。付図4に採用した可変構造制御系のブロック線図を示す。また、付図4中にあるハイパスフィルタ(HPF)は目標位置 z^* 付近での実際の位置 z のチャタリングを防止するために入れてある。

付図4のブロックで駆動されたソレノイドプランジャのシミュレーションと実験の位置応答を付図5に示す。ただし、左側図がシミュレーションによるものであり、右側図が実験によるものである。付図5からわかるように、ソレノイドプランジャは強い非線形性があるにもかかわらず、実際の位置は指令値に良好に追従している。

(平成13年3月5日受付, 同13年8月17日再受付)

^{††}スライディングモード制御は可変構造制御の代表として、その優れた制御性能がよく知られている。

- (1) K.-F.Böhringer, Howie Choset: 「Distributed Manipulation」, Kluwer Academic Publishers
- (2) S. Konishi, Y.Mita, H. Fujita: 「Two-Dimensional Conveyance System Using Cooperative Motions of Many Fluidic Microactuators」, Jour. Advanced Robotics, vol.12, no.2, pp.155-165, 1998
- (3) K.-F.Böhringer, B.R.Donald, R.Mihailovich, N.C.MacDonald: 「A Theory of Manipulation and Control for Microfabrication Actuator Arrays」, In Proc. 7th IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System, pp.102-107, 1994
- (4) J.W.Suh, R.B.Darling, K.-F.Böhringer, B.R.Donald, H.Bltes, T.A.Kovacs: 「CMOS Integrated Ciliary Actuator Array as General-Purpose Micromanipulation Tool for Small Objects」, Journal of Microelectromechanical Systems, vol.8, no.4, pp.483-496, 1999
- (5) K.-F.Böhringer, V.Bhatt, K.Y.Goldberg: 「Sensorless Manipulation Using Transverse Vibrations of a Plate」, In Proc. the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1989-1996, 1995
- (6) J.Luntz, W. Messner, H.Choset: 「Stick-Slip Operation of the Modular Distributed Manipulator System」, In Proc. American Control Conference, pp.3853-3857, 1998
- (7) H.Oyobe, H. Kitajima, Y.Hori: 「Design and Realization of Autonomous Decentralized Object Transfer System: Magic Carpet」, in Proc. 6th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp.25-29, 2000
- (8) 及部七郎齋, 堀 洋一: 「魔法のじゅうたん - 64 個のリニアアクチュエータによる物体搬送実験 -」, 平成 12 年電気学会産業応用部門大会, pp.577-580, 2000
- (9) 根本泰弘: 「『マイクロマシン』発刊に際して」, 日本機械学会誌, Vol.97, No.905, pp.252, 1994
- (10) K.J.Gabriel: 「アメリカにおける MEMS の研究プロジェクト」, 日本機械学会誌, Vol.97, No.905, pp.272-275, 1994
- (11) 藤田博之: 「マイクロマシンと自律分散」, 計測自動制御学会誌, Vol.32, pp.848-853, 1993
- (12) 藤田博之: 「自律分散マイクロシステム」, 日本機械学会誌, Vol.97, No.905, pp.298-301, 1994
- (13) 三田吉郎, Andreas Kaiser, Patrick Garda, Maurice Milgram, 藤田博之: 「形状認識を行なう分散型マイクロ搬送システム」, 第 11 回自律分散システムシンポジウム, pp.259-262, 1999
- (14) 石田好輝: 「自律分散システムの情報処理の特徴」, 計測自動制御学会誌, Vol.32, pp.830-836, 1993

及部七郎齋(学生員) 1974年6月5日生。1997年山形大学工学部電子情報工学科卒業。1999年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。1999年4月同大学院博士課程入学。現在に至る。分散マニピュレーション、制御工学に関する研究に興味を持つ。計測自動制御学会学生員。

堀 洋一(正員) 1955年7月14日生。1978年東京大学工学部電気工学科卒業, 1983年同大学院博士課程修了。助手, 講師, 助教授を経て, 2000年2月より電気工学科教授。専門は制御工学とその産業応用, とくに, モーションコントロール, メカトロニクス, 電気自動車などの分野への応用研究。最近は福祉制御工学を開始。1993年 IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞, 2000年電気学会論文賞などを受賞。電気学会, 計測自動制御学会, IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 自動車技術会などの会員。