

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 -

及部七郎齋*, 堀 洋一 (東京大学)

A Magic Carpet - Object Conveyance Experiment by 64 Linear Actuators -

Hichirousai Oyobe, Yoichi Hori (University of Tokyo)

abstract: *The attempt to realize magic carpet driven by autonomous decentralized type control algorithm is proposed. The proposed system is manufactured as trial experimental setup and an experiment is done by itself. At last, a control algorithm for autonomous decentralized system is proposed. Due to the recent development of micro-machine technology, we can integrate a lot of very small decentralized modules, each of which consists of sensor, actuator and electronic circuit. However, control algorithm of such systems have not yet been developed enough. To avoid complicated wiring problem of communication network, it is assumed that the module should exchange information only with neighboring several modules. The proposed system is manufactured for developing control algorithm of such system.*

Key words: 自律分散システム、マイクロマシン、可変構造制御

1 はじめに

1.1 マイクロマシンのもつ可能性

近年の科学技術の発展により、今まで SF の世界でもてはやされていたことが現実になりつつある。SF 映画の『ミク口の決死圏』で人体の中に超小型の潜水艦で入り、患部を治療しているシーンを憶えていることでしょうか。そう、マイクロマシンとはその映画の中で出てくる超小型の潜水艦のイメージなのである [1]。

マイクロマシンの特徴 [2] は、(1) マイクロ化 (2) 多数性 (3) マイクロエレクトロニクス の 3 つを挙げることができる。マイクロ化は小さく軽く速い振る舞いを意味し、多数性はマイクロ化により小さく軽くなるため多数で大きな仕事を成し遂げるための多数化である。また、マイクロエレクトロニクスは半導体加工技術に基づくマイクロマシン製法が最も有力であるため含まれる要因である。半導体加工技術を用いれば、マイクロマシンと一緒に演算機能を持つマイクロプロセッサやセンサを組み込むことができる [3] [4] [5]。

マイクロマシンは非常に小さいし、それ一個が持つ能力は非常に小さい。そのためたくさんのマイクロマシンを協調して動かす必要がある。マイクロマシンはプロセッサやセンサなども一緒に含まれているためそれ自身も自律した自律モジュールとして振る舞いを行うことが可能である。

1.2 マイクロマシンが本質的にもつ問題点

マイクロマシンがもつ本質的な問題点として下記の 2 つが挙げられる。これらはマイクロマシン制作上本質的である。

1. 通信

- マイクロマシンは超小型のため、制御用の信号線でも非常に膨大になってしまう。そのため非常に近くにあるマイクロマシンとしか通信できない。そのため完全な集中制御は構造上不可能である。

2. 構造

- マイクロマシンの制作、加工において最も有望視されているのが半導体加工技術に起因するシリコンウエハ上にマイクロマシンを作成する方法である。半導体加工技術を用いているため同じものをたくさん作ることは非常に得意であるが、異なった構造のものをたくさん作ることは向いていない。

2 Magic Carpet の提案

マイクロマシンの可能性や問題点を考慮しながら、システムの具体的な設計を行うためにベンチマーク的な問題を設定する。そして、その問題を解決するアルゴリズムを考えることによりマイクロマシン協調のための自律分散制御を考える。以下でその問題を設定する [6], [7]。

問題の説明

Fig.1 のような 2 次元平面にたくさん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 を作りたい。

搬送物体 (ボール) を運ぶ。

$$(x_{ini}, y_{ini}) \Rightarrow (x_c, y_c)$$

2 次元平面 ($x_{min} \leq x \leq x_{max}, y_{min} \leq y \leq y_{max}$) に x 方向に m 個、 y 方向に n 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マイクロマシンモジュールによる物体搬送システムを構成する。問題として以下のようなシステムを設定する。

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)。

上記制限のもとで、次の目的を達成する自律分散制御系を設計することを考える。

1. たくさんのモジュールを協調させ駆動させる。
2. 物体を目標位置まで搬送するシステムを構成する。

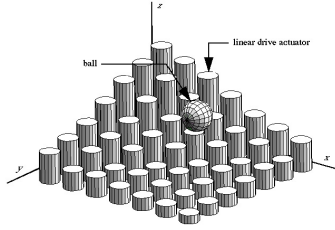


Fig. 1: Conceptual configuration of magic carpet. We try to realize this magic carpet in our real world.

3 提案システムの実験装置の制作

3.1 実験装置の構成

我々の研究の主たる目的はマイクロマシン群に適合する自律分散制御アルゴリズムを開発することにある。そのため、まずはじめに提案システムの実験装置の制作を行い、その実験装置に適合するアルゴリズムの開発を行うこととする。我々の最終的なゴールはもちろんマイクロマシンで実験装置を作ることである。しかしながら現在、マイクロマシンデバイスの研究は進行中であり、連続変位が可能なマイクロマシンリニアドライブアクチュエータの制作は難しい。そこでリアルサイズ（マイクロではない）での実験装置の制作を行うこととする。

Fig.2 に制作する実験装置の基本構成図を示す。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、そしてただ1個のPCである。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。すなわち、実験装置自体は集中システムであり、分散システムはPCの中で仮想的に実現される。

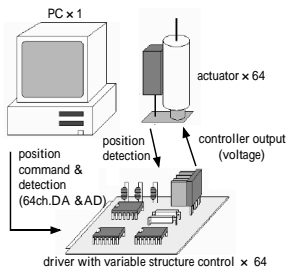


Fig. 2: Fundamental conceptual figure of experimental setup consisting of 64 variable structure controllers and main power supply.

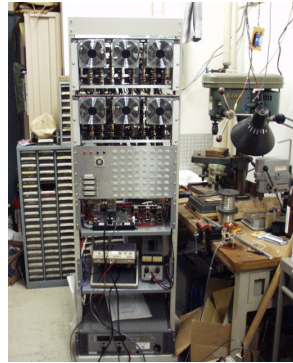


Fig. 3-a: Overview of experimental setup including 64 controllers and main power supply.

3.2 アクチュエータの位置制御系の設計

制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。Fig.4 に採用したソレノイドプランジャを示す。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。Fig.5 にソレノイドプランジャの構造図を、Fig.6 にソレノイドプランジャの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 Fig.6 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

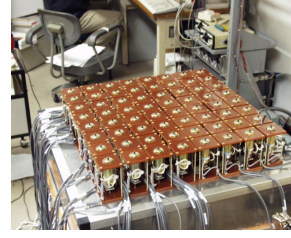


Fig. 3: A part of experimental setup, arrayed many actuators on 2-dimensional plane



Fig. 4: The real world actuator module consisting of solenoid plunger. We can easily see attached position sensor. This position sensor is putted to use position signal in feedback controller.

できる。ソレノイドプランジャに発生する力は Ampere の

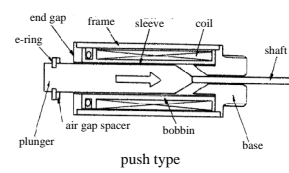


Fig. 5: Configuration of the solenoid plunger. This instrument has very simple structure. When we pass electric current on a coil inside solenoid plunger, A plunger gets sucked in the coil.

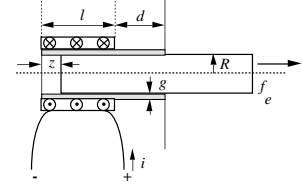


Fig. 6: Electromagnetic model of the solenoid plunger. Electromagnetic force generated in this solenoid plunger is calculated by using this simple model.

周回積分を用い、式(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。

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

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。ソレノイドプランジャは非線形性の強いため、ロバストなコントローラが必要となる。我々は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（スランディングモード制御は可変構造制御の一つとしてその優れたロバスト性がよく知られている）。

Fig.7 に採用した可変構造制御系のブロック線図を示す。また、Fig.8 は実際に制作した回路図である。Fig.7 では、コンパレータが Fig.8 では LM319 が可変構造を生成している。また、Fig.7 中にある 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。

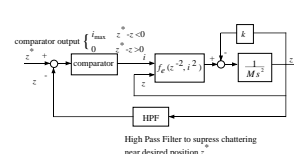


Fig. 7: Block diagram of a variable solenoid plunger including variable structure controller. This variable structure controller actually used in the experiment.

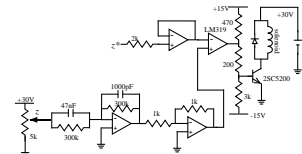


Fig. 8: Analog circuit of a variable solenoid plunger including variable structure controller. This variable structure controller actually used in the experiment.

3.3 各アクチュエータの位置制御

Fig.8 の回路で駆動されたソレノイドプランジャの位置応答を Fig.9 に示す。Fig.9 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の追従している。

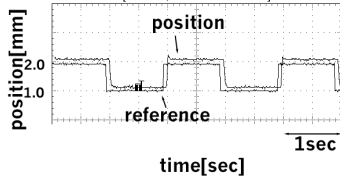


Fig. 9: Position response with variable structure controller. We can see a good agreement between the command and actual position.

4 提案システムによる物体搬送

4.1 自律分散集中複合制御系

1.2 で指摘したようにたくさんのアクチュエータで構成されるシステム（例えばマイクロマシン）はローカルなところしか通信できないとか各モジュールに適用するアルゴリズムは同質であるなどの拘束を受ける。この2つの拘束下でシステム形態として Fig.10 を提案する。このシステム形態は各々のモジュールは互いにローカルなところでしか通信できない。ただし、集中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になっている。この集中系と呼んでいるシステムははじめに指摘した拘束条件を満足し、全体の制御を行うこととなる極めて重要なものとなる。

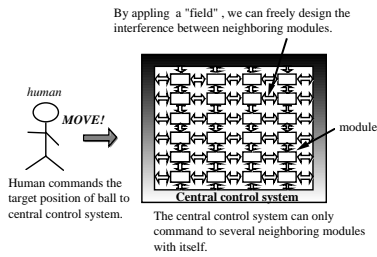


Fig. 10: Combined control of central / autonomous decentralized algorithms.

4.2 物体搬送アルゴリズム

4.1 で提案したシステムでは2つのことを考えなくてはならない。1つは各モジュール間でのデータのやりとり、もう1つは集中系での境界条件的な指令の生成である。物体搬送という目的に対して、『物体を転がして目標位置に運ぶなら、目標位置に穴を作ってやればよい』というキーワードをもとにアルゴリズムを考えることにする。では、目標位置に穴をつくってやるためには各モジュールはどんな情報が必要なんだろう？各モジュールには最低、

1. 自分の座標
2. 目標位置の座標

の情報が必要である。自分の座標と目標位置の座標がわかれば、各モジュールは目標位置を原点とする相対座標系を生成することができる。したがって、自分の動きに何らかの重みづけを行うことができる。目標位置から遠いものはあまり働かなくても良いだろうということである。では、自分の座標

と目標位置を知らせるための場と境界条件（集中制御系の働き）はどのようになるのだろうか。自分の位置を知らせる方法と目標位置を知らせる方法を順を追って説明する。

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よう。各モジュールの x 座標を設定するための場を $u_x^{cd}(x, y)$ としよう。このとき $u_x^{cd}(x, y)$ が解、

$$u_x^{cd} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} x + x_{\min} \quad (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}) \quad (2)$$

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。局所的な通信のみで自分の座標を設定するために通信の局所性を満たすような形で式(2)のような解を持たせたい。幾つかあるだろうが代表的なものとして、

$$\frac{\partial^2 u^{xcd}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^{xcd}}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

$$u^{xcd}(x_{\min}, y) = x_{\min}, u^{xcd}(x_{\max}, y) = x_{\max}, \quad (4)$$

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

を用いよう。式(3)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、式(5)は境界条件として集中制御系で設定される値である。このような方法を適用すれば、通信の局所性を満たしながら各モジュールは自分の座標を知ることができる。また、 y 方向も同様に考え u^{ycd} とした。

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よう。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場を $u^{xc}(x, y)$ としよう。このとき $u^{xc}(x, y)$ が解、

$$u^{xc} = x_c$$

$$(x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}) \quad (5)$$

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様な方法を用いれば、

$$\frac{\partial^2 u^{xc}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^{xc}}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

$$u^{xc}(x_{\min}, y) = u^{xc}(x_{\max}, y) = u^{xc}(x, y_{\min}) \quad (7)$$

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

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^{yc} とした。

つぎに各モジュールの座標と搬送物体の目標位置の座標から実際に曲面を作ることを考える。各モジュールの座標と搬送物体の目標位置がわかれば搬送物体の目標位置を基準とした相対座標系を作ることができる。したがって何らかの重みづけをその相対座標系に基づき行うことができる。

最初に示したように搬送物体を目標位置まで運びたいのなら目標位置に穴を空ければ自然と搬送物体は目標位置に転がるだろうというアナロジーのもとに、具体的に相対座標系を用いて考える。穴を空けたければ穴が空くような下記の関数を用いられたい。以上から搬送物体の目標位置 (x_c, y_c) に簡単に穴を空けることができる。

$$z(x, y) = f(\mathbf{u}) = f(u^{xc}, u^{xcd}, u^{yc}, u^{ycd}) \quad (8)$$

$$= \frac{\alpha \{(u^{xcd} - u^{xc})^2 + (u^{ycd} - u^{yc})^2\}}{\alpha \{(u^{xcd} - u^{xc})^2 + (u^{ycd} - u^{yc})^2\} + 1}$$

5 結果

5.1 シミュレーション結果

Table 1: Parameters. Simulation was done with those parameters.

Δx	0.1
Δy	0.1
num. of module along x-direction	11
num. of module along y-direction	11
(x_{min}, y_{min})	(0,0)
(x_{max}, y_{max})	(1,1)
(x_{ini}, y_{ini})	(0.6,0.6)
(x_c, y_c)	(0.4,0.4)
α	5

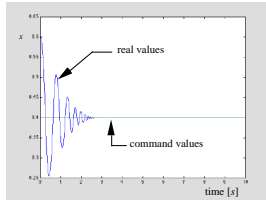


Fig. 11: Simulated time response of the object transfer along x -direction. The ball converges to the desired position with vibration. This algorithm moves the ball to the hall by using gravity. Whereby ball locus with vibration is very natural. Here, the hall digs in desired position.

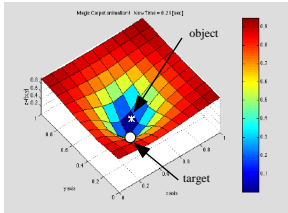


Fig. 12-a: Surface curve at 0.21[s].

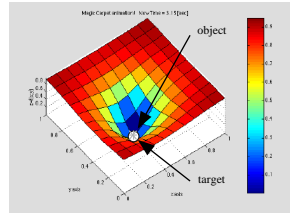


Fig. 12-b: Surface curve at 3.15[s].

Fig. 12: Interpolation curves between each actuator top.

5.2 実験結果

Fig.13 に実験の様子を示す。Fig.13 はデジタルカメラで撮影したデータである。Fig.13 から搬送物が目標位置に転がり搬送されていることがわかる。提案システムにより物体搬送をするかどうかを別にすれば、提案手法が有効であることが確認できたといえる。

6 まとめ

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マイクロマシンシステムを想定し、その物体搬送システムの構築を目指した。主として、

1. 多数のアクチュエータにより構成される実験装置の試作
2. 指摘した拘束下での物体搬送アルゴリズムの提案

を行った。提案したシステムに提案アルゴリズムを適用し、シミュレーションと実験の両側面からその有効性を評価した。

個々のアクチュエータ出力は小さいが全体としては大きな出力を発生するというシステムは今後増えていくことが予

Fig.11 に時間応答を示した。これにより搬送対象物の位置が目標値に振動しながら収束しているのがわかる。このシミュレーションでは整定にほぼ3秒ほどかかっているがこれは搬送物により大きく異なる。Fig.12-a には 0.21[s] での曲面を示した。搬送対象物が目標値に向かって動いているのがわかる。また、目標値を極小値とする曲面が描かれていることも同様になる。Fig.12-b には 3.15[s] での曲面を示した。Fig.12-b では完全に目標値に収束していることがわかる。

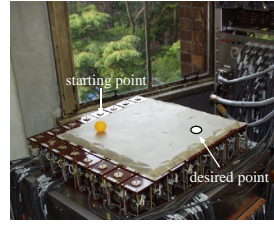


Fig. 13-a: Experimental picture (1). This picture is appearance before the experiment.

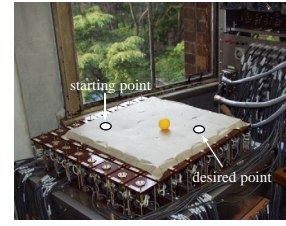


Fig. 13-b: Experimental picture (2). This picture is appearance during the experiment.

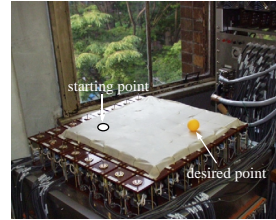


Fig. 13-c: Experimental picture (2). This picture is appearance after the experiment.

Fig. 13: Experimental results. These are static pictures before the experiment, during that and after that. We can easily see the movement of a ping-pong ball.

想される。多くの人たちが従来なかったこのようなシステムに興味を持っていただければ著者らにとっても大きな喜びである。また、試作した実験装置による興味深い実験などあれば、ご指摘いただければこれもまた大きな喜びである。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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, Oct. 1993
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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, Oct. 1993
- [7] Hichirousai Oyobe, Hiroaki Kitajima, Yoichi Hori: Design and Realization of Autonomous Decentralized Object Transfer System:Magic Carpet, Proceedings of Advanced Motion Control, pp.25-29, 2000
- [8] Satoshi KONISHI, Yoshio MITA, Hiroyuki FUJITA: Two-dimensional conveyance system using cooperative motions of many fluidic microactuators, Advanced Robotics, Vol.12, No.2, pp.155-165, 1998