ミリマシン技術による多自由度システムの制御*

村上俊之**

大西公平***

A Control of Multi-degree-of-Freedom System by Millimachine Technology /
Toshiyuki MURAKAMI and Kohhei OHNISHI

Key words: motion system, micro actuator, multi-degree-of-freedom system, soliton, force transmission mechanism

1. はじめに

本稿では、近年注目されているミリマシン技術を利用することで可能となるであろう新たなロボットの機構技術、制御技術について著者独自の観点から解説する。

産業用ロボットの導入により、各工場における生産性の向上、製品の品質高が促されたことは言うまでもない。また、マイクロプロセッサおよび制御技術の発達によりロボット自身の制御性能も著しく向上している。すなわち、現在のロボット（主に人間の腕を模擬したマニピュレータ）において、その機構を最大限に生かしたマニピュレーション技術が確立されているといっても過言ではない¹⁾。一般に、これらの産業用ロボットは、あらかじめ教示された作業をこなすために設計されており、作業内容に応じた適応的な動作を行うには困難な状況にある。しかしながら、大量生産から多品種少量生産へ変遷しつつある現在の産業界では、人間のように多機能でかつ柔軟な動作を行えるロボットの開発に関心が寄せられている。一方、現状のロボットの構造では人間のようにしなやかな動作を実現することが難しいことも周知のことである。これは、ロボット自身の自由度が低いことに起因しており、ロボットの機

構技術と密接に関係する。すなわち、所望の動作の実現精度を低下させることなく、ロボット自身の自由度を高めることが今後の課題としてクローズアップされる。そこで、本稿ではミリマシン技術を導入した多自由度システムの構成法を示し、その制御法について簡単に紹介する。ここで、従来のミリマシン技術の着眼と異なる点は、ミリマシンを用いて mm オーダ（あるいは μm オーダ）の動作を実現することが目的ではなく、本稿ではマクロな動作を実現しようとしている点にある。

2. 多自由度システムの構成

2.1 多自由度システムの基本構成

さて、自由度を増やすためにはロボットの構造をいかにすべきであろうか？ 直感的な発想では、従来のリンク機構（1つの関節により2つ以上のリンクが結合され、関節に設置された1つ以上のアクチュエータにより駆動される機構）を延長することで、多自由度なロボットを実現することができる。しかしながら、ロボットシステムが大規模となるばかりでなく、各関節に存在するバックラッシュやフレキシビリティの影響が蓄積され、ロボット先端での位置決め精度を向上することが困難となる。従って、従来のリンク機構とは異なるロボットの構造を考察する必要がある。ここで、従来のロボットを駆動方式の観点から再検討してみよう。前述したように、リンク機構からなるロボットは関節に設置されたアクチュエータ（電磁力を利用したサーボモータなど）により駆動される、いわゆる集中駆動方式となっている。集中駆動方式では、機構の複雑化を招かずにロボットの自由度を増やすことが可能であるが、基本的にロボットシステムの規模が大きくなり、かつ出力/重量比が低くなるため効率的な駆動方式であるとは言い難い。一方、集中駆動方式と対比して考えられる他の駆動方

* 原稿受付 平成5年12月20日

** 慶應義塾大学理工学部（横浜市港北区日吉3-14-1）

*** 正会員 慶應義塾大学理工学部
村上俊之

1993年慶應義塾大学大学院後期博士課程修了，工学博士。同年同大学理工学部電気工学科助手。現在、ロボットおよびモーションコントロールに関する研究に従事
大西公平

1980年東京大学大学院博士課程修了，工学博士。現在、慶應義塾大学理工学部電気工学科助教授。現在、モーションコントロールおよびパワーエレクトロニクスに関する研究に従事

図1 多自由度システムの構成法

式として分散駆動方式があげられる。分散駆動方式は、アクチュエータ自身を小型化しそれを多数連結することによって大きな出力を得ようとするものであり、コンパクトな多自由度システムの構成に有効であると考えられる。幸いなことに、最近の加工技術等の急速な進歩により、近い将来mmあるいは μm オーダのアクチュエータが実現可能であると考えられ、分散駆動方式による多自由度システムの構成に大きな期待が寄せられることは間違いない^{(2)~(5)}。

多自由度システムの理想的なモデルとしては、筋肉システムが挙げられる。この場合、1つの筋肉細胞が1つのアクチュエータに相当する。そこで、以下では疑似筋肉システムの実現を目指した多自由度システムの構成法について検討する⁽⁶⁾。多数のアクチュエータによる多自由度システムの構成例として図1に示されるようなモデルが考えられる。先に述べたように、従来からロボットの駆動にはモータのような回転型のアクチュエータが用いられていたが、多自由度システムの構成にあたっては電磁石のような直動型のアクチュエータも有用であると考えられる。なぜなら、回転型のアクチュエータは小型化するにつれ発生トルクが急激に小さくなり、しかも連動システムへの適用には構造的に不自由であるといった欠点が存在するからである。一方、直動型のアクチュエータは小型化しても発生する力が比較的大きく、アクチュエータ1つ1つの動きが並進運動であるため連動システムへの適用が容易である。ここで、直動型のアクチュエータは回転型のアクチュエータのようにストロークが無限にとれず、1つのアクチュエータではギャップ長分のストロークしか持たないという欠点があるが、多くのアクチュエータを連動したシステムとすることでストロークも大きくすることが可能である。ミリマシン（あるいはマイクロマシン）においても、直動型のアクチュエータでは静電力を利用することで出力/重量比の大きなシステムが構築できる。これは、物体の質量が寸法の3乗、電極間の静電力が2乗に比例するという特徴を有するためであり、ミリ（マイクロ）マシンが多自由度システムの構成に適している裏付けともなる。

図1(a)に示した平面モデルでは、多自由度システムが弾性体平板上に並ぶ多数のアクチュエータユニットから構成されている。各ユニットの四方には直動型のアクチュエータ

図2 電磁石による多自由度システム (1)

エータが配置されており、これらのアクチュエータが発生する力によってシステム全体の動作が決まる。また、図1(b)に示した空間モデルは、弾性体の円柱に配置される上下に2つのアクチュエータを持つ多数のアクチュエータユニットからなる。空間モデルにおいても平面モデル同様、各アクチュエータに作用する力によってシステム全体の動作が決定される。この空間モデルは図1(a)に示した平面モデルを円筒状に巻いたモデルと等価とも言える。これらのモデルは、筋肉システムの伸縮運動に倣って構成された多自由度システムである。以下では、これらのモデルを電磁石を用いて実現し、その運動学解析を試みる。さらに、ミリマシンから半導体加工技術を利用したマイクロマシンによる多自由度システムの構成例についても簡単に示す。

2.2 電磁石を用いた多自由度ミリマシンシステムの構成

前節で示した多自由度システムを電磁石を用いて構成した例を図2に示す。ここで、システムの構成は四方に4つの電磁石を持つ16個のユニットからなる。この平面モデルを用いて図3に示される(b), (c), (d)の順に電磁石を励磁すると、ユニット(1)-(2)間→(2)-(3)間→(3)-(4)間の伸縮が繰り返され、平面モデルは1サイクルの励磁により距離 d だけ移動することになる。ここで、システムの全長 l_a および移動距離 d は次式により表される。

$$l_a = 4l + 3g \quad (1)$$

$$d = 2l(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

さらに、図1(b)に示した空間モデルを電磁石を用いて構成すると図4のようになる。本システムは、12個のユニットからなり、平面モデル同様各ユニットには四方に電磁石が取り付けられている。また、両端以外のユニットは2つのユニットが背中合わせに結合されている。図4(b)

図3 平面モデル動作指令の例

図4 電磁石による多自由度システム (2)

より、第 n 段目の先端のずれは次式のように表され、電磁石の励磁により任意方向への動きが可能となる。

$$z_n = \sum_{k=1}^n l \sin k\theta \quad (n=1\sim6) \quad (3)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{g}{2r} \right) \quad (4)$$

図2および図4に示した多自由度システムについて、実際の実験を通して各モデルの運動解析を行う。まず、平面モデルを用いて行った実験結果を示す。実験システムの概略図は図5に示す通りであり、計算機内で決められた動作指令に応じたON/OFF信号が、I/Oボードを経て電磁石励磁のスイッチングパターンとして各アクチュエータへ送られている。従って、システム全体の動作は送られるスイッチングパターンによって決まる。例えば、表1に示されるスイッチングパターンによって得られた実験結果を表2に示す。これより、平面モデルでは3自由度分(2つの並進運動と1つの回転運動)の動作を実現することができ

図5 平面モデルの実験システム

表1 平面モデル動作指令の一例

パターン 1	(1) 2, 3, 21, 23, 27, 29, 46, 47		
	(2) 5, 6, 17, 19, 31, 33, 43, 44		
	(3) 8, 9, 13, 15, 35, 37, 40, 41		
パターン 2	(1) 26, 30, 34, 38, 39, 42, 45, 48		
	(2) 12, 16, 20, 24, 25, 28, 32, 36		
	(3) 1, 4, 7, 10, 11, 14, 18, 22		
パターン 3	(1) 2, 3, 17, 19	(7) 31, 33, 40, 41	(9) 31, 33, 46, 47
	(2) 5, 6, 17, 19	(8) 31, 33, 43, 44	(10) 20, 28, 26, 48
	(3) 8, 9, 17, 19	(5) 12, 16, 32, 36	(11) 20, 24, 25, 28
	(4) 10, 11, 16, 32	(6) 16, 32, 38, 39	(12) 1, 20, 22, 28

表2 平面モデルを用いた実験結果

	パターン1	パターン2	パターン3
スイッチングサイクル	2.5 Hz	2.5 Hz	0.8 Hz
速度	80 mm/min	80 mm/min	0.042 rad/min
動作	並進	並進	回転
タイプ	x	y	右旋回

る。

次に、空間モデルを用いて行った実験結果を示す。図6が空間モデルの実験システムであり、各アクチュエータには平面モデル同様、所望する動作に応じたON/OFF信号が送られる。表3にスイッチングパターン例を示す。また、このスイッチングパターンに従って得られた実験結果を表4にまとめる。

表2あるいは表4に示される実験結果より、平面あるいは空間モデルにおいて、各アクチュエータへ送られるスイッチングパターンに応じて並進あるいは回転動作が実現できることが分かる。ここでは、アクチュエータとして小型の電磁石を用いたため、その発生力が小さく、速い動作や大きな動作を実現することは出来なかったが、静電アクチュエータに代表される発生力の大きなアクチュエータを多数連結することによって速い動作や大きな動作の実現も期待できる。そこで、次章では半導体加工技術を利用したマイクロマシンによる多自由度システムの構成例について示す。

図6 空間モデルの実験システム

表3 空間モデル動作指令の一例

パターン1	(1) 7, 8
	(2) 7~10
	(3) 7~12
	(4) 31, 32
	(5) 31~34
	(6) 31~36
パターン2	(1) 19, 20
	(2) 19~22
	(3) 19~24
	(4) 43, 44
	(5) 43~46
	(6) 43~48

表4 空間モデルを用いた実験結果

	移動方向	移動距離
パターン1	+x -x	8.8 mm -10.0 mm
パターン2	+y -y	11.2 mm -9.4 mm

2.3 ミリマシンからマイクロマシンへ (?)

前述した、多自由度システムにおけるアクチュエータの特徴をまとめると以下のことが言える。

- ・微細化に適している。
- ・直並列に連結することができる。
- ・制御性がよい。

以上の条件をおおよそ満足するアクチュエータとして、近年注目されているマイクロアクチュエータがあげられる。本節では、図1に示した多自由度システムのアクチュエータユニットとしてマイクロアクチュエータの製作過程の一例を紹介する。ここで、アクチュエータとしては図7に示されるように一対の楕円形電極がポリイミドの薄膜によって支持されたものを考える⁷⁾。さらに、ポリイミド薄膜上にアルミニウム配線を施すことによってアクチュエー

図7 楕円静電マイクロアクチュエータの構造

図8 楕円静電マイクロアクチュエータの製作過程

タの駆動を可能にする。

図7に示すマイクロアクチュエータの製作プロセスを図8に示す。マイクロアクチュエータの製作において、その製作過程が重要であることは言うまでもないが、材料の選定もアクチュエータ製作の重要な鍵となる。例えば、上記の楕円静電マイクロアクチュエータにおいてはアクチュエータを支持する弾性材料はヤング率が大きく、電気絶縁性が高いものが望まれる。比較的ヤング率の大きな弾性体を用いると、アクチュエータの固有周波数が増し高速な動作の実現を可能にする。また、静電アクチュエータは、それぞれの電極に蓄積された電荷同士の吸引力を利用して駆動するアクチュエータであるため、それぞれの電極間を良好に絶縁しなければならない。そこで、電気絶縁性の良い材料を選択することによりアクチュエータを低損失、高効率に駆動することが可能となる。

今回示した楕円静電マイクロアクチュエータでは、ポリイミドを用いた製作プロセスを紹介した。ポリイミドは耐熱性、耐摩耗性、絶縁性に優れている特徴を有する一方、強酸、強アルカリによって加水分解されてしまうため、製

膜後にウェットエッチングプロセスを用いられない等の制約を受ける。また、一般にマイクロマシンにおいては慣性力に比し摩擦力の影響が非常に大きくなり、非線形性が増してしまうことも指摘されている²⁾。従って、 μm オーダの小形アクチュエータの必要性および構成法に関しては、今後議論すべき多くの問題を有する。しかしながら、多自由度システム構成用の高効率小形アクチュエータの実現にミリ（あるいはマイクロ）マシンが有用であり必要不可欠となることは強調したい。

3. 多自由度システムの制御

先に述べたように、本稿で紹介する多自由度システムの目的はミリマシンによってマクロな動作を実現しようとするものである。従って、多自由度システムを実現した場合、次に問題となるのはその制御手法である。多数のアクチュエータを導入することでロボット自身の自由度を増すことはできるが、従来のロボットの制御系のように個々のアクチュエータを独立に制御しようとする制御系が急速に複雑化してしまう。そこで、多自由度システムの制御においては従来の制御手法とは異なる新たな手法を適用する必要がある。筋肉組織をみても個々の細胞は独立にコントロールされているわけではなく、動作信号が伝搬する機構となっている。第2章で示した電磁石を用いた多自由度システムにおいては、個々のアクチュエータは動作パターンに応じたON/OFF信号によりスイッチングされていたが、実際にはこのような動作パターンを伝搬させる機構を実現する必要がある。筋肉システムに倣うと、多自由度システムのアクチュエータ1つ1つは精密に制御されるわけではなく、前段のアクチュエータから転送されてきた動作信号を次段のアクチュエータへ転送する役目を担うことになる。このように、アクチュエータを動作信号伝搬のメディアとして用いることによって、制御系全体の簡略化を図ることができる。これは、多自由度システムの制御において重要なコンセプトとなる。紙数の関係上、以下では制御法の概念だけを簡単に紹介する⁶⁾。特に、動作信号として力伝搬機構を実現するための基本アルゴリズムを述べる。ここで、力伝搬機構を実現するため非線形系のもつ特性を利用する。多自由度システムを制御するにあたって個々のアクチュエータを線形制御に基づき精密に制御することは、先に述べたようにシステムの複雑化を招く。その上、動作信号を伝搬する機構にすると系の持つ分散関係の影響で指令信号（ここでは、孤立パルス）をその形状を維持したまま伝搬させることが不可能となる。一方、非線形フィードバックに基づいた非線形系では、系のポテンシャル関数を式(5)のように設定（非線形制御によりこのような設定は可能である）することで力信号が孤立波（ソリトン）として伝搬する非線形システムを実現することができる。

図9 力伝送の基本アルゴリズム

図10 シミュレーション結果

$$\phi(r_n) = \frac{a}{b} e^{-br_n} + ar_n \quad (ab > 0) \quad (5)$$

式(5)に基づいた非線形制御系により力の伝搬機構が実現されると、一例として図9に示すような力伝送アルゴリズムによって力の制御が可能となる。同図では、2つの質点が n 本の非線形多自由度アクチュエータにより連結され、伝送すべき力指令が2進の n ビットに分解表現されている。さらに、各ビットの力信号が別々の非線形多自由度アクチュエータにより伝送される。非線形系におけるソリトンの伝搬速度は力信号の振幅に依存する。そこで、各ビットごとに時間遅れを挿入することで終端への力信号の伝送時間が同一となるように調整される。これにより、終端に加わる力は各非線形多自由度アクチュエータにより伝送される力の総和となる。図9に示す力伝送アルゴリズムは、力の遅れ制御という観点から遅れ力重畳法 (Delay Superposition Method: DSM) と呼ぶ。図10にDSMにより伝送された力応答のシミュレーション結果を示す。同結果より、正弦波力指令に応じた力応答が得られていることが分かる。ここで、力伝送の遅れは基本波（伝搬速度がいちばん遅い孤立波）に依存する。図9のアルゴリズムは、多自由度システムにおける動力学を扱っており、システム全体を制御する場合には運動学を考慮したアウトループ（位置、速度、加速度、力のフィードバック）が必要となる。

上記に示した非線形制御系は多自由度システムの一制御法にすぎないが、分散駆動の観点からは今後期待される制御手法と考えられる。分散駆動方式では、集中駆動方式の

欠点ともいえる故障問題をもある程度改善することができる。集中駆動方式による現在のロボットでは、特に基準座標に近い駆動アクチュエータが故障するとロボットとしての機能が喪失してしまう。しかしながら、図9に示される力伝送アルゴリズムに基づく分散駆動方式では、故障箇所により出力できる力の大きさは制限されるものの、非線形多自由度アクチュエータのいずれかが故障したとしても、システム全体が機能しなくなることはない。これは、我々が直感的に理解できる筋肉システムの機能と合致する点でもある。

4. お わ り に

以上、ミリマシンを用いた新たなロボットの機構技術を紹介した。従来のロボット開発のように、マクロな動作はマクロロボットで、ミクロな動作はマイクロロボットで、というような目的に応じたロボット機構では多機能なロボットの実現は望めない。このような観点から、本稿ではミリマシンによる多自由度システムの構成法を示し、多自由度システムによるマクロ動作の実現法を示した。

ミリ（あるいはマイクロ）マシンによるアクチュエータの製作に関しては、今後多自由度システムへの拡張が重要な課題として考えられる。また、その制御手法の開発も今後の展開に期待するところが大きい。

参 考 文 献

- 1) K. Ohnishi et al.: Applications of Advanced Control Techniques in Electrical Drives, IEEE. Int., Workshop on Microcomputer Control of Electrical Drives, (1989) 1.
- 2) 日本ロボット学会誌: [特集] マイクロマシンとマイクロメカニズム, 8, 4 (1990).
- 3) W. Trimmer: Micromechanical Systems, The Third Toyota Conf., Integrated Micro Motion Systems, (1989) 1-1.
- 4) Long-Shen Fan et al.: IC-processed Electrostatic Micromotors, Sensor and Actuators, 20, (1989) 41.
- 5) K. E. Petersen: Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices, IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 10, (1978) 1241.
- 6) 村上俊之, 石橋宏純, 大西公平: 疑似筋肉システムの一構成法, 電気学会論文誌 D, 111-D, 12, (1991) 000.
- 7) F. Fujikawa et al.: Fabrication of Comb-Shaped Micro-actuator for Multi-Degrees-of-Freedom System, IEEE. Int., IECON '92, Vol. 2, (1992) 990.