

電磁式リニアアクチュエータの開発

山本圭治郎¹・今井正行¹・三宅孝²

¹ 機械工学科

² 機械工学科 修士工学専攻修了

Development of Electromagnetic Linear Actuator

Keijiro YAMAMOTO¹⁾, Masayuki IMAI¹⁾, Takasi MIYAKE²⁾

Abstract

In order to realize a flexible robot acting as human extremities which absorbs shock so as to prevent it self and objects from destruction, a electromagnetic linear actuator was developed.

The combination of electromagnets and permanent magnets was adopted in the construction of the actuator so that it has the function to keep the position without driving current of the electromagnet. Both sides of the moving rot was composed of the array of the permanent magnets. The stator consisted of two opposing arrays of electromagnets facing the both sides of the array of the permanent magnets of the moving rod.

Optimum shape of the electromagnet core was obtained by the numerical analysis of the magnetic field. Control programs of the supply voltage to the electromagnets for smooth driving and for shock absorbing were developed and tested. Static and dynamic characteristics proved the feasibility of the linear actuator with smooth moving and flexibility.

Key Words : Electromagnet, Linear Actuator, Shock Absorber

1. まえがき

最近のメカトロニクスの長足の進歩により、各分野でのロボット技術も著しく発展してきた。小型軽量化、信頼度の向上が進み、また振動、温度等環境条件に見合ったロボットも使用する事が十分可能になってきた。

特に80年代のロボティクスの進展はめざましく、自律型ロボット技術の開発、動歩行技術の成功、高密度触覚センサーの開発等予想を越える速さで進展してきた。将来の自律型ロボットの応用分野として、福祉機器が有望視されているが、これには人間と同様の柔かなロボットの開発が必須である。

しかしながら、生体のような動きをする、すなわち人間に似た柔軟さと、正確な動きの両方を兼ね備えた小型アクチュエータを持つロボットは実現されていない。この柔軟な動きを持ったアクチュエータを備えたロボットは、衝突された人間や壊れやすいものを保護するだけでなく、衝撃を吸収するなど、ロボット本体に対する過大な外力からロボット本体の保護ができる。

我々はロボットに適した小型、かつ柔軟なアクチュエータの開発を目的として、歯車やリンク機構等の補助変

換機構を介する事なく、駆動部の摩擦が小さく任意の方向に推進力を与えられ、かつ柔らかさを求めるに最も適したリニアドライブ方式構造の電磁リニアアクチュエータに着目した¹⁾。電磁リニアアクチュエータのリニアドライブ範囲は、医療機器用微小アクチュエータのナノメートルオーダーから、輸送機関への応用におけるキロメートルオーダーまでと広範囲に亘る移動が可能である²⁾。

アクチュエータとしての要件として欠かさないものは、制御性、高精度、高効率である。これらを考慮して、我々はアクチュエータとして良く使用されているリニアドライブ方式の中でも推力の半分を永久磁石に依存する、リニア同期モータに着目し開発を進めた。電磁式リニアアクチュエータは既に位置決め装置や、搬送用等として実用化されている。これらの多くは、可動子や、一次側、二次側等片側のみを自重を考慮して設計している³⁾。

本研究ではロボットに使用することを目的とし、アクチュエータ全体の重量を考慮し、小型、軽量化を行ない、加えて省電力化も考慮して永久磁石の両面使用、電磁石の鉄心形状の最適化を行なうことにより、リニアアクチュエータの開発を行った。

2. 電磁式リニアアクチュエータ

開発したアクチュエータは、ロボット等に装着して使用することを想定しているため、構造が簡単で小型・軽量で、柔軟性に富み、発生推力が安定しており、磁気飽和、消費電力が少なく、また位置決めについても高度な要求を満たすことを目指した。

動力源や駆動方式等について種々検討した結果、

1. 永久磁石の両面を使用する事により、推力の半分を永久磁石で賄う事による省電力化、駆動機構の簡易化。
2. パルスモータ等のように高精度加工の歯形鉄心等を使用せず、永久磁石と電磁石単体の直接組み合わせによる小型、軽量化を図った。

これにより、構成部品の永久磁石のサイズや、電磁石の容量によって、電流の強弱、すなわち磁束密度の違いで、駆動制御、位置制御が容易に行え、且つ、補助機構を介することなく直接、直線運動が得られる柔軟性に富むアクチュエータが得られた。

2.1 アクチュエータ

図1に試作したアクチュエータの構造を、表1に磁石の仕様をそれぞれ示す。

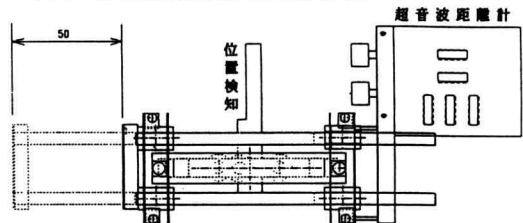
出力軸（可動子で以後出力軸と称す）は永久磁石（20×10×5mm）を平行に6個角柱アルミ部材の表面に取り付けたものである。その両側に平行に電磁石（固定子で以後電磁石と称す）を配置した固定子を置いている。

φ0.5mmのエナメル線による260ターンの電磁石を片側3個、合計6個を2相分として配置している。3個の電磁石は励磁したときに隣りの極に異極が発生する様に直列に配線が施されている。

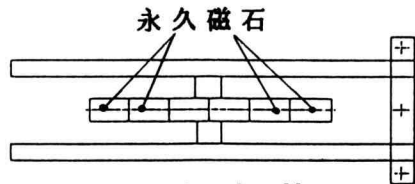
出力軸に取り付けた永久磁石も、両隣りが異極になる様に配置されている。

表 1 仕 様

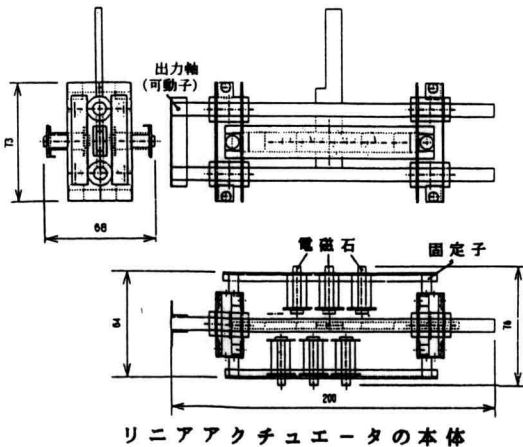
永久磁石 寸法 材質 個数	20×10×5 mm ストロンチウムフェライト 6個
電磁石 寸法 個数 巻き数 ストローク 空隙 支持機構	18×20 mm 6個 260巻 50mm 3mm ボールベアリング



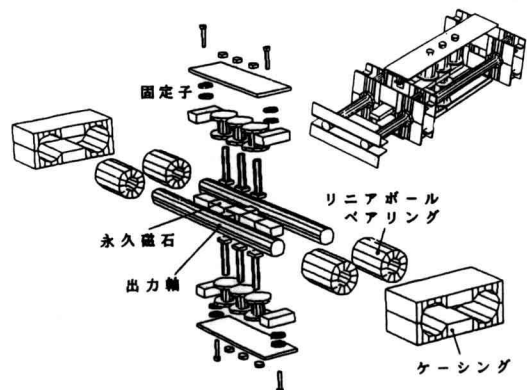
(b) リニアアクチュエータのストローク



(c) 出力軸



(a) 固定子と出力軸（可動子）の構造



(d) リニアアクチュエータ組立図

図 1 リニアアクチュエータ

2. 2 動作原理

図2にアクチュエータの1相励磁方式の動作原理を示す。図2(a)の様に電磁石の上側の相(以後第1相と称す)を励磁すると、出力軸は右方向に移動する。次に図2(b)の様に下側の相(以後第2相と称す)を励磁すると出力軸はさらに移動し、図2(c)の位置に移動する。以後同様の操作を行うことによって出力軸は右に連続して移動する。また電磁石の発生磁極を逆にすることによって出力軸は左に移動させる事が出来る。

一般に、上記の1相励磁方式をはじめ、2相励磁方式、1-2相励磁方式など、各相への励磁シーケンスの選択により制御性能が大きく影響される。

試作機の場合、1相励磁のオン、オフ的励磁方式では、微妙な位置制御が困難であった。そこで電磁石に流す電流を、正の一定値と負の一定値とに交互に切り換えて、交番推力を与え往復運動をさせる交流電源用バイポーラ駆動方式とした。この駆動方式は、出力軸に取り付けた永久磁石による、磁界の移動速度に合せた移動磁界を電磁石側で作る事によって速度制御を可能にし、さらに対向する第2相の磁界の強弱により微小位置制御が行える。

交流電源制御の場合、永久磁石の磁極の移動に合わせて、電磁石側の磁極を切り換える必要がある。そこで磁極の変化の識別を、アクチュエータ本体(固定子)のある一点と、出力軸のある一点との距離を超音波距離計により常に計測して、磁界の移動状況を数値情報に変換する距離認識システムにより行った。

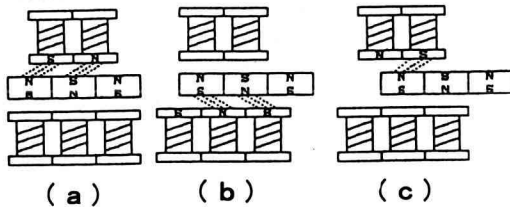


図 2 1相励磁方式の動作原理

2. 3 駆動システム・制御プログラム

図3に試作アクチュエータの駆動システムの概略を示す。システムは、ハードウェアの要素として、制御対象である可動部分の負荷、操作部であるアクチュエータ、動作制御を司るシステム制御コンピュータ、信号を入力する伝達回路インターフェイス、電力を増幅する駆動回路およびセンサーによる距離検出部、ソフトウェア的要素として、駆動制御プログラム、位置決め制御用アルゴリズム、計測用データ処理プログラムでそれぞれ構成されている。

出力軸は、それを移動させようと働く力と、その場に保持しようとする力の差を少しずつ変化させることによって駆動される。出力軸を進めたい場合は、第1相、第2相の電磁石が図4に示される電圧曲線の現在の位置から、数ミリ前の電圧を出力することによって駆動させる事が出来る。より一層大きな推力を発生させる場合には、保持しようとしている電磁石の励磁を切り、出力軸を移動させようと働く電磁石の電圧を高める事によって高い推力を発生させる事が出来る。

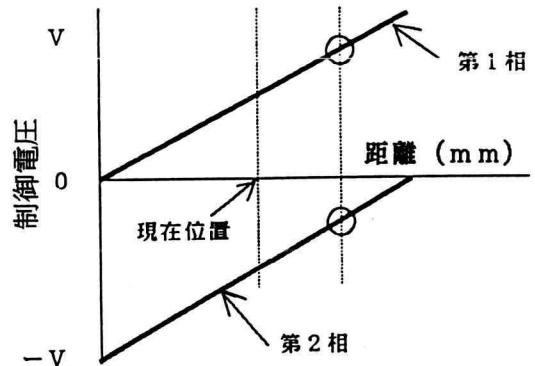


図 4 制御電圧と出力軸位置の関係

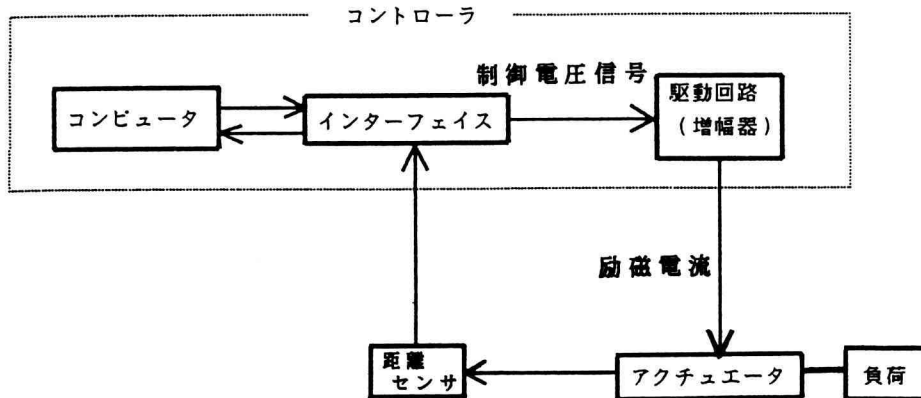


図 3 アクチュエータの駆動システム

図5に出力軸を正方向に推力を増大させようとする時の制御電圧信号波形の変化を示す。制御電圧波形は、大きく分けて4パターンの波形に分けられ、この4パターンの繰り返しによって駆動している。アクチュエータの出力軸の基準点は、第1相の電圧波形の0点と一致する点としている。このパターンの0mmから10mmまでを第1区間とし、以後10mm間隔ごとに第2区間、第3区間、第4区間とした。

第1区間では、第2相の電磁石の電圧を負から0Vに上げ、第1相の電圧を0Vから上げる。第2区間(10mmから20mmまで)では、第1相の電圧を0Vまで下げる。第2相の電圧は0Vから上げる。第3区間(20mmから30mmまで)では、第1相の電圧を0Vから負に下げ、第2相は0Vまで下げる。これによって、電磁石の発生している磁極を反対にし、再び吸引を行わせる。第4区間(30mmから40mmまで)では、第1相の電圧は負から0Vまで上げ、第2相は0Vから負にまで下げる。

しかし実際には、この出力波形によると、区間の境で励磁する電磁石が反対側に移るために、推力ゼロの箇所が出来てしまう。これをさけるために、図6に示す様に、第1相目が完全に推力を失う前に、第2相目の励磁が始まるようにし、推力変化の変動を極力減らし、スムーズな駆動を可能とした。また電圧印加時から出力軸が移動を始めるまでに、磁束応答遅れや起動抵抗による時間的遅れがあるので、駆動時の推力変動を極力無くす必要がある。

衝撃吸収制御プログラムは静特性、動特性に用いた制御プログラムを基本に、出力軸の移動する距離に応じて定数を変化させることによって、出力軸のスライド抵抗値が変化する様に、制御電圧信号を発生した。出力軸の変位を検出する事によりコンピュータが衝突を開始したと判断し制御を始め以後、閉ループを一周する度に、制御電圧に加算したり、減算したりする操作を行って、スライド抵抗を増減した。

その制御電圧波形を図6に示す。

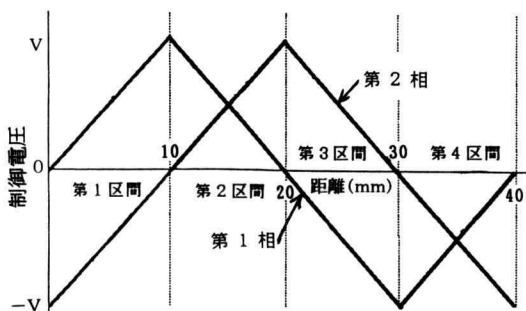


図5 推力増大時の制御電圧パターン

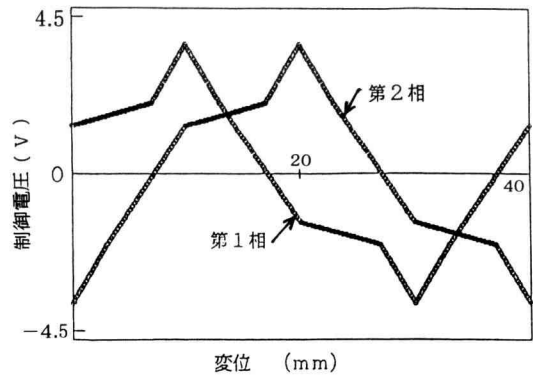


図6 駆動制御プログラムによる制御電圧波形

3. 実験

実験は永久磁石の磁束分布、電磁石の推力特性、アクチュエータの静推力特性、動特性、及び衝撃吸収特性の5種類を行った。

図7に実験装置の全体図、図8及び図9にアクチュエータの静推力特性及び動特性集取用の配線図をそれぞれ示す。推力は低荷重型小型ビームロードセルを用いて測定した。また変位は差動トランスにより測定した。

図10に衝撃吸収特性測定法を示す。アクチュエータを4度傾斜させて設置し、質量415gの衝突物体を速度0.6m/sでアクチュエータに衝突させた。次の3種の実験条件で変位、制御電圧、衝突力の測定を行った。

- 1) 出力軸を端点(0mm)におき、出力軸をロードセルで支えた場合。
- 2) 出力軸を50mmの位置に設置して、制御電圧をかけずに、フリーの状態に衝突物体を衝突させる場合。
- 3) 衝撃吸収制御プログラムによる制御電圧を印加し、衝突を受けとめる場合。

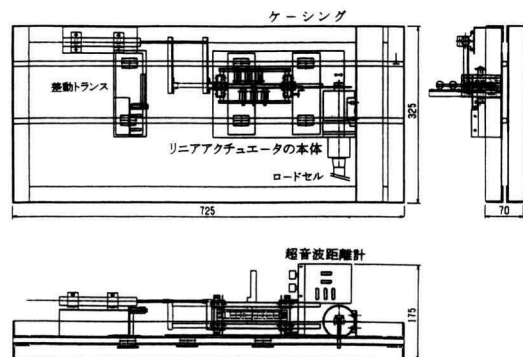


図7 実験装置

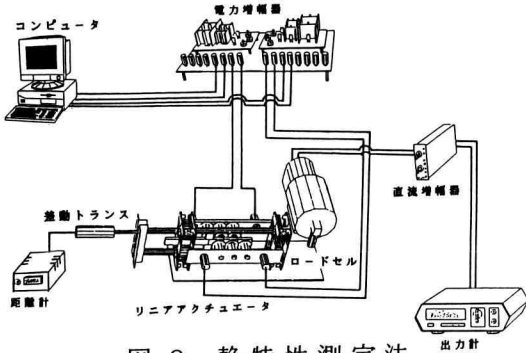


図 8 静特性測定法

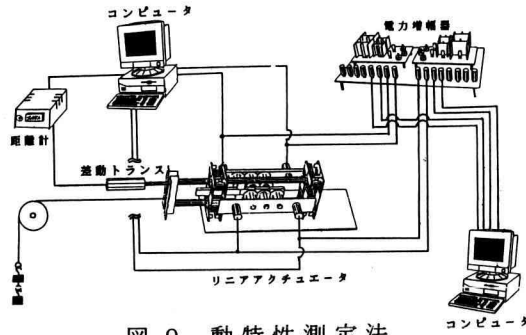


図 9 動特性測定法

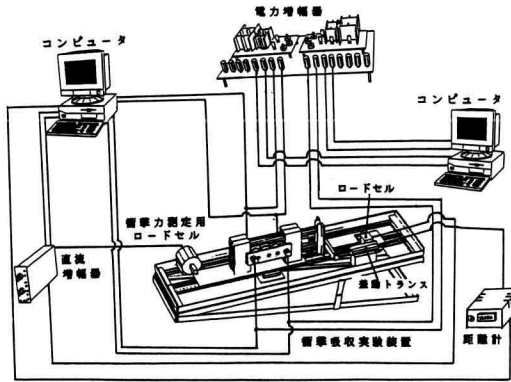


図 10 衝撃吸収特性測定法

4. 実験結果

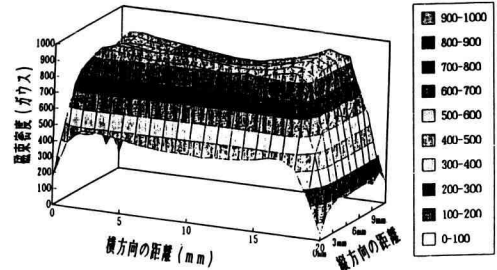
4.1 永久磁石の磁束密度分布

本アクチュエータは永久磁石と電磁石を利用しているので、発生推力の推移、大きさは永久磁石と電磁石の性能に大きく左右される。推力発生的重要な要素である永久磁石は推力発生約半分を担う。永久磁石に求められることは磁束密度が大きいこと、微妙な力制御を行うために、磁束密度分布に片寄りが無い事である。

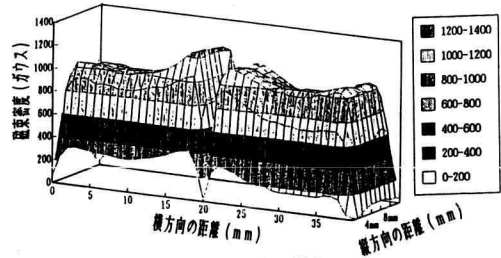
永久磁石の磁束密度を知るために、磁石の並べ方を変えて磁石表面をガウスメータにより測定を行い、データを3次元のグラフィック表示した。

図11(a)は1個の永久磁石について、表面の磁束測定を行った結果を示す。最高磁束が先端部で1000G近辺を示し、永久磁石の特性を顕著に表している。

図11(b)は永久磁石2個で異極が並ぶ様に設置して、表面の磁束測定を行った結果を示す。隣合う接合部分の磁束が密となり1200G近くを示し、両端部では磁束が疎になり約200G程度低い値を示している。



(a) 永久磁石1個の場合



(b) 永久磁石2個の場合

図 11 永久磁石の磁束分布

4.2 電磁石の推力特性

電磁石は高透磁率、小型軽量、高磁束密度で且つ、最大磁束密度において鉄損が小さい事が望ましい。そこで透磁率の高い鉄心を得るべく、鉄心の先端形状を4種類試作した。図12に鉄心形状の概略を示す。アクチュエータを駆動させる場合は、推力の釣合を徐々に変化させるため、電磁石の正面に永久磁石と、永久磁石の接合部がきた場合に、最も推力が発生し、電磁石の正面に永久磁石の中心がきた時に、推力がゼロになる様に、直線的な推力変化を示す特性が望ましい。また電磁石の吸引力は、ギャップ長の2乗に反比例するので、推力特性はエアギャップに大きく影響を受ける⁴⁾。

永久磁石に直接ロードセルを取り付け、電磁石を永久磁石の中心(0mm)から隣接する永久磁石の中心(20mm)まで移動させた時の、発生推力について測定を行った。

電磁石の鉄心形状、エアギャップ(1~5mm)の組合せを変え励磁電流を最大1Aまで変化させた時の静推力特性を図13~20に示す。

図13~15にA型鉄心を用い、1Aまで電流を流した時の推力変化を示した。ギャップが小さくなると推力は増加するが、それによって理想的釣り鐘状の推力分布から、ピークの推力が中心からずれ始め、極値を2つ持つような分布となり、推力のピーク値が中心からずれた状態となる。

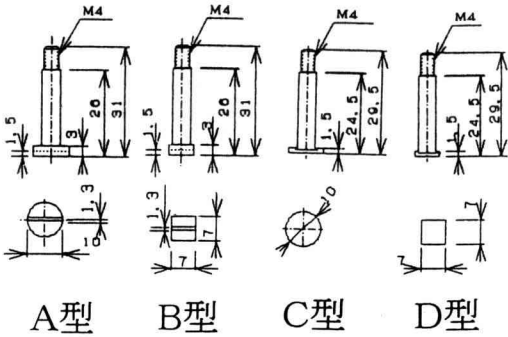


図 12 鉄心形状

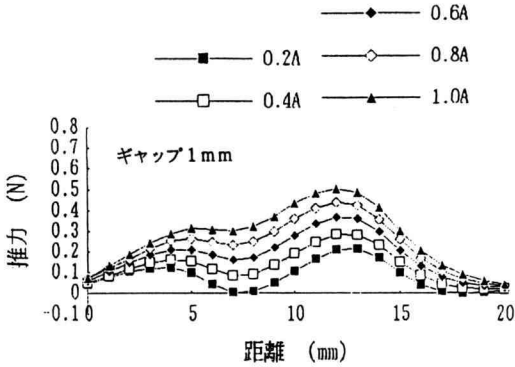


図 13 鉄心A型 静推力特性

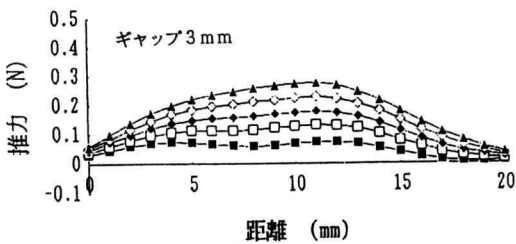


図 14 鉄心A型 静推力特性

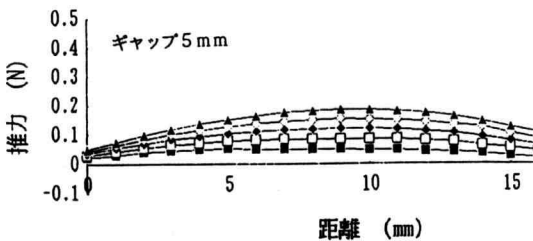


図 15 鉄心A型 静推力特性

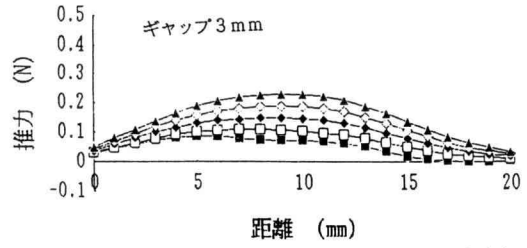


図 16 鉄心B型 静推力特性

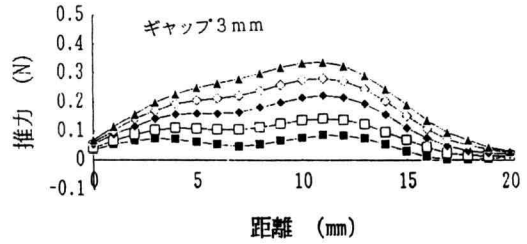


図 17 鉄心C型 静推力特性

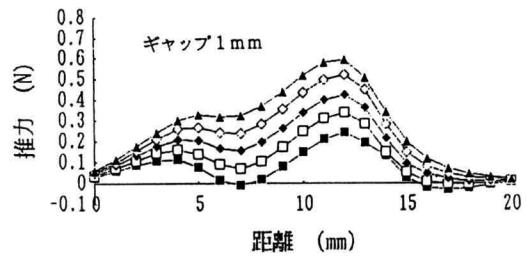


図 18 鉄心D型 静推力特性

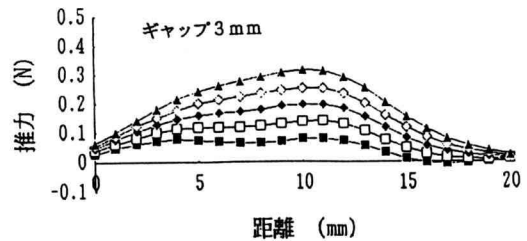


図 19 鉄心D型 静推力特性

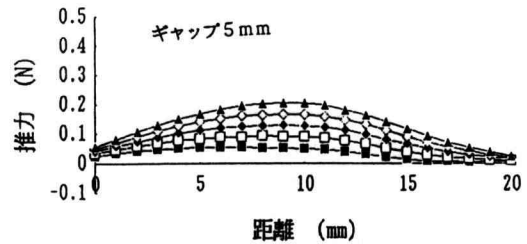


図 20 鉄心D型 静推力特性

図21は、A型鉄心の、エアギャップが3mmと1mmの時の磁場を有限要素法により数値解析した結果を示した。

エアギャップが3mmの場合(a図)は、電磁石による磁力線が通っていた鉄心先端部が、エアギャップが1mmの場合(b図)では通らず磁力の強い永久磁石に磁化されている様子が示されている。この電磁石による磁化から、永久磁石による磁化への移り変わりが、ピーク時の推力をずらし、極値を2つにした要因であると考えられる。

図16は鉄心形状B型、図17は鉄心形状C型の推力特性を示した。

図18~20にD型鉄心を用いた場合の、推力変化の様子を示した。D型鉄心は、先端が小さく厚みもないが、他の鉄心と比較した結果発生推力はA型と同等であり、推力分布も制御に比較的適した釣り鐘状の推力変化を示している。よって鉄心の形状としてD型を採用し、D型鉄心、ギャップを3mmに設定した。

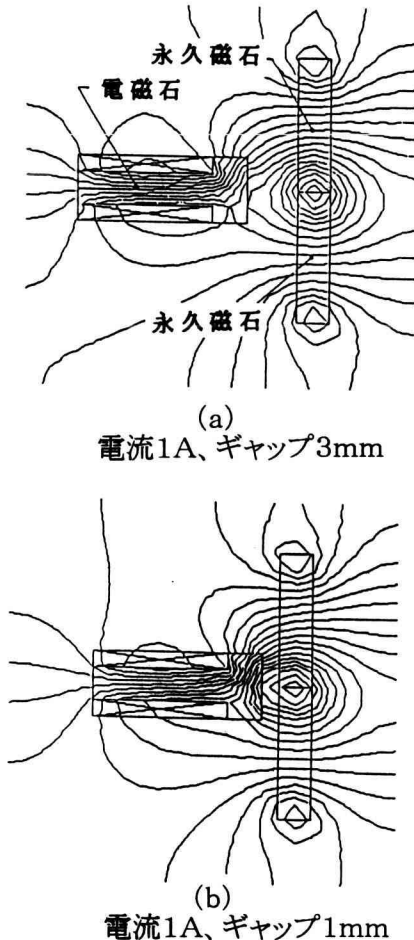


図 21 有限要素法による磁場の解析結果

4.3 アクチュエータの静推力特性

最大電流を1Aとし、出力軸を基準点0mmから1mmずつ移動させ、出力軸を伸ばす方向と、縮ます方向の静推力特性について測定を行った結果を図22に示す。

いずれも最大推力1.12Nが発生した。

片側の電磁石の列が推力を無くす位置にくる前に、他方の側の電磁石の励磁を始める様に、制御電圧波形を図6の様にした結果、推力がゼロとなる事はなかったが、推力の変動巾が最大0.5Nあった。

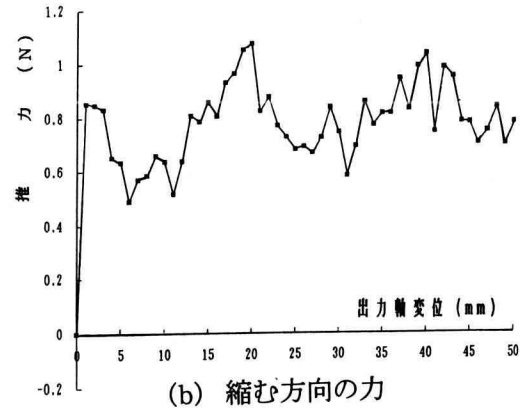
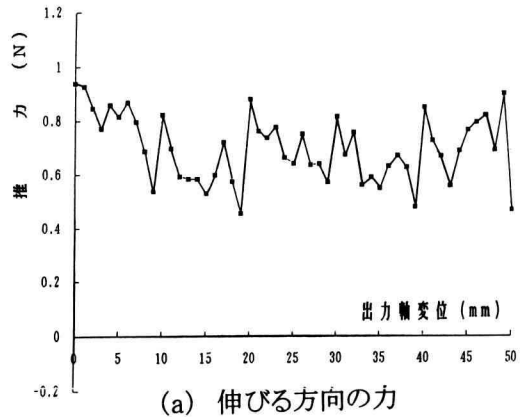


図 22 アクチュエータの静推力特性

4.4 アクチュエータの動特性

基準点0mmから50mmまで移動させ、負荷ゼロの場合と0.16Nの負荷をかけた時の出力軸の動きの測定結果を図23に示す。

動作時間に若干の違いが見えるが、無駆時間が約0.1秒、整定時間がそれぞれ約1秒、と約1.8秒であった。出力軸の動きもスムーズな動きが得られた。

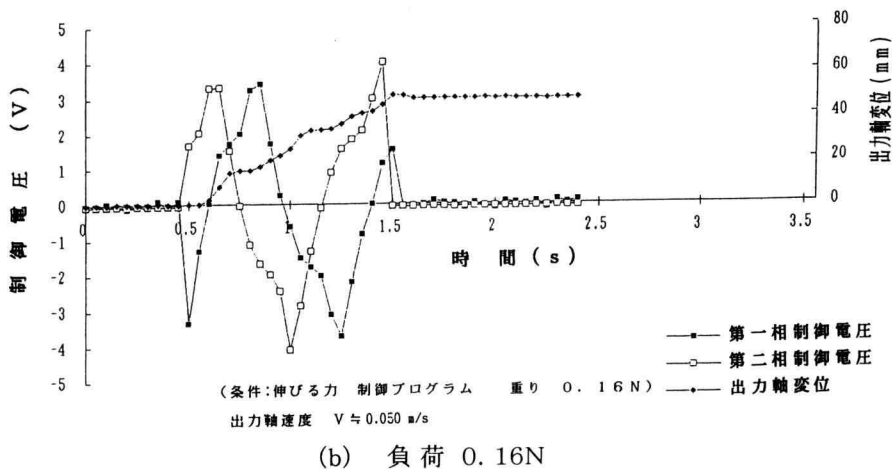
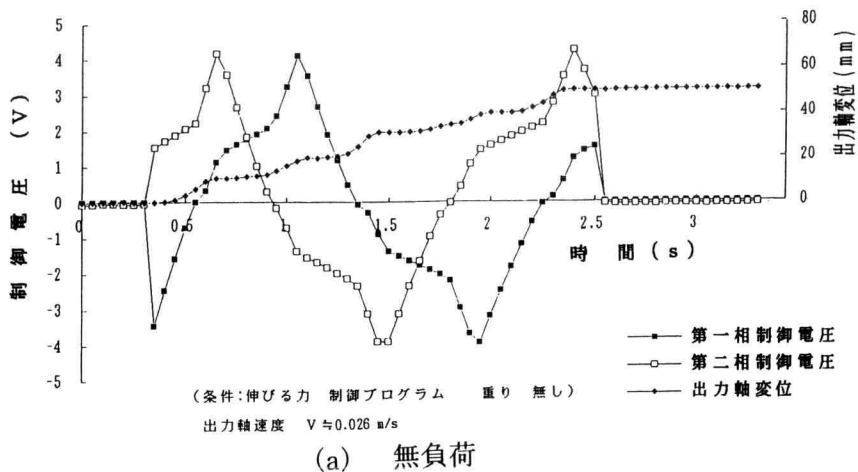


図 23 アクチュエータの動特性

4. 5 衝撃吸収特性

衝撃吸収特性実験の結果を図24、25に示す。

図24は制御プログラムなしで出力軸を基準位置0mmまで縮め、質量415gの衝突物体を速度0.6 m/sで衝突させた時、出力軸とアクチュエータ本体にかかる衝撃力を測定した結果である。衝突した瞬間に約10Nの力がアクチュエータ本体に加わり、その後微小振動が継続している。

図25はアクチュエータ本体の持つ機械的摩擦抵抗による衝撃吸収力を見るため、出力軸を50mmの位置まで伸ばしておいて、制御プログラムなしで衝突させた結果である。アクチュエータ本体に加わる力は、摩擦により減少するが出力軸が端点(0mm)に到達した時点で3.4N程度の衝撃力が残った。

図26、図27に出力軸を50mmの位置に置いて、制御プログラムによる制御を行った場合の結果を示した。

図26は衝撃吸収特性を堅めに設定した場合の結果である。出力軸は0.2秒後、2.0mmの位置で停止し、衝撃力は1.47Nであった。

図27は柔らかめに衝撃吸収特性を設定した場合の結果である。出力軸は0.25秒後、12mmの位置で停止し衝撃は十分吸収され、0.74Nであった。

本制御プログラムによる衝撃吸収率は、約90%に達した。

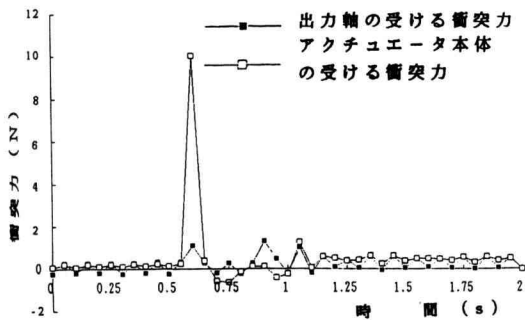


図 24 出力軸を0mmに固定した場合の衝撃特性

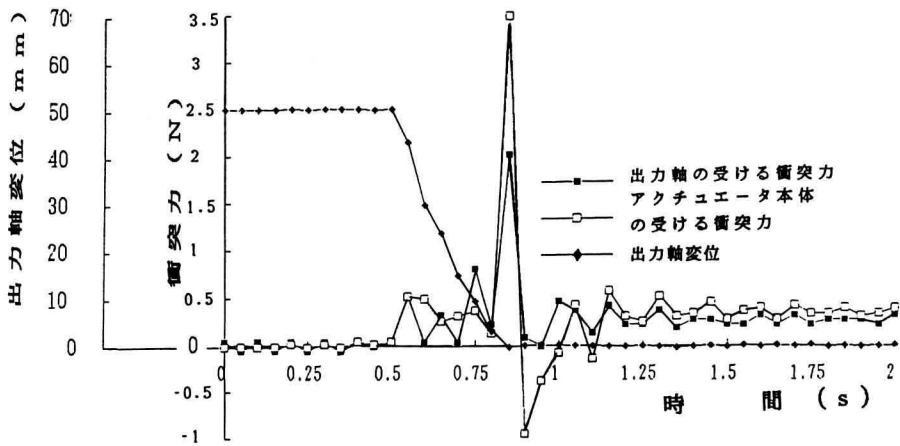
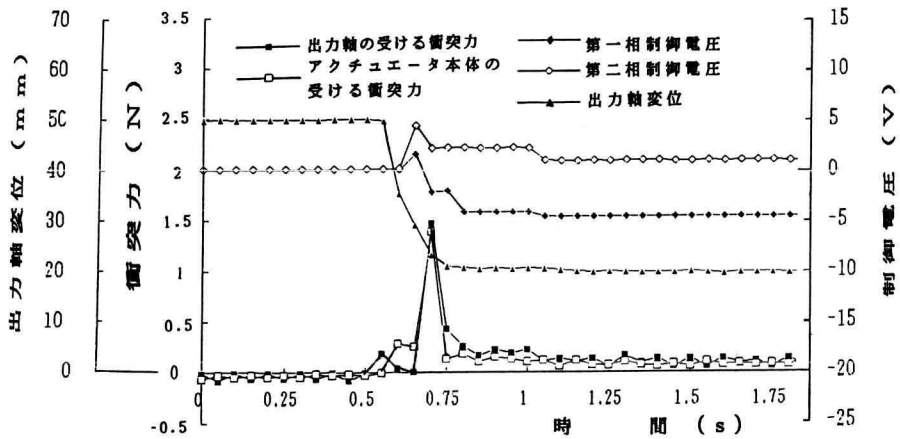
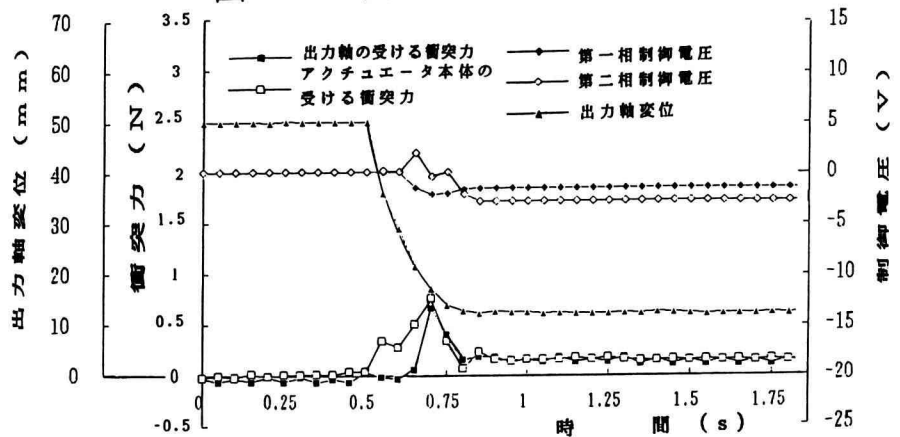


図 25 出力軸の初期位置を50mmとした場合の衝撃特性



(条件：出力軸初期変位 50mm 制御プログラム 硬め)

図 26 衝撃吸収特性



(条件：出力軸初期変位 50mm 制御プログラム 柔らかめ)

図 27 衝撃吸収特性

5. あとがき

スムーズな動きと衝撃吸収特性を持ち、人間に似た柔軟さを持つ電磁式アクチュエータの開発を目的とし、永久磁石と電磁石を組み合わせたリニアアクチュエータを設計、試作し、駆動制御用プログラムと衝撃吸収用制御プログラムを作成し実験した。

1. アクチュエータ本体は、空隙保持にリニアボールベアリングを採用し、永久磁石の両面を利用する事により小型、軽量化を図った。
2. 電磁石に取り付ける鉄心の形状により、磁束密度に差異があり、推力に大きな影響を与える。永久磁石との磁束のバランスも重要で、強い駆動力を得るためには、電磁石と永久磁石による磁束がほぼ同じである必要がある。
3. アクチュエータの駆動は、電磁石の励磁電流を最大1Aとした。これは発熱量からの上限值と考えられたが、基本特性でも明らかな様に、電磁石の発生磁束は比例関係が成り立っている範囲内であり、磁気飽和前と考えられることから、さらに高推力が期待出来る。
4. アクチュエータの駆動は制御電圧波形を出力する駆動プログラムにより、スムーズな駆動を可能とした。

5. 衝撃の吸収は、衝撃吸収用制御プログラムにより最大90%の衝撃吸収特性を可能にした。

6. 試作リニアアクチュエータは衝撃を和らげる機能と、自ら推力を発生させる機能の両方を兼ね備える点で、柔らかな動作特性を持つアクチュエータとしての可能性が確かめられた。

今後、実用に向けての課題としては、本体の構成部品の小型化、軽量化、高精密化による高効率化と、自在な推力変化を可能にする駆動制御プログラムの開発、及び任意の衝撃吸収特性を可能にする衝撃吸収制御プログラムの開発がある。

引用文献

- 1) 正田英介 : 産業におけるリニアモータアクチュエータの利用動向と展望
電学誌 109巻 9・89
- 2) 脇若弘之 : リニアドライブ技術を支えるセンサ技術
電学論D誌 115巻 6・95
- 3) 正田英介 : リニアドライブ技術とその応用
オーム社・91
- 4) 久住洋之他: 多段階電磁石アクチュエータの位置制御
電学論D誌 108巻 5・88