

電磁アクチュエータによる二関節筋機能代替の可能性と 機械インピーダンス制御

東京大学 古関隆章・福正博之 日立製作所 金弘中

1. はじめに

生体の機構、アーム駆動を解明し忠実に模擬することを基本的思想として発展してきた2関節力学系理論 [1] は、リハビリテーションの分野などで注目されているのみならず、医工連携の工学的成果として、ロボットアームの運動制御を、関節トルクの複雑な動的計算に依存することなく、見通しの良い制御アルゴリズムで行える考え方として研究が進められてきた。ばねを用いた簡単な構成で人の自然な跳躍動作が再現できる [2] という興味深い成果に加え、油圧を用いたアームの駆動の実験例や小田らによる一連のロボットアームの試作機 [3] は、福祉制御工学等の研究者から注目を集めている。その駆動機構として電磁アクチュエータを用いられれば、電気制御の高速性、再現性の優れた長所が生かせる。一方、電磁アクチュエータの重量、作動部での発熱はこの応用を妨げる要因となる。本稿では永久磁石を用いたモータ技術の可能性について考察する。

2. 電磁アクチュエータの長所と短所

2.1 空間に蓄えられる電磁エネルギーと発生力

電気機械の出力は基本的に空間に蓄えられることのできる場のエネルギーで決まる。単純な計算で、 $E=3 \times 10^5$ V/mの電界が与えられているときの電界のエネルギーは

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = 3.98 \times 10^{-1} \text{ J/m}^3 \quad , \quad B=1.3 \text{ Tの磁束密度が与えら$$

れているときの磁界のエネルギーは $W_m = \frac{\mu_0}{2} B^2 = 6.72 \times 10^5 \text{ J/m}^3$

となる。これが通常の大きさの電気によるアクチュエータのほとんどが電磁アクチュエータである理由であるが、このエネルギー蓄積量の限界が、油圧系などと比べて電磁アクチュエータの推力対体積比、推力対重量比が低いといわれる本質的原因にもなっている。

2.2 最近の永久磁石モータ

上記の議論から、電磁アクチュエータの体積あたりの出力と効率を上げるには、大きな電流を流すことなく強いギャップ磁束を得ることが重要であることが分かる。このため最近のサーボ用の小型モータやアクチュエータは、時期的な蓄積エネルギーの大きな希土類永久磁石を界磁に用いた同期形がほとんどである。

2.3 電磁アクチュエータの問題点

電磁アクチュエータは、力を必要とする部分で作用するので自由な装置構成が可能となる一方、発生力に上限があること、力の発生部での発熱が問題となることが指摘されている。

大きな力を得るには高速で回してパワーを稼ぎ減速するか、超電導などで磁界を大きくして、空間に蓄えられるエネルギーの絶対量を大きくする必要がある。しかし、生体模擬では超電導の使用は不効用が大きい。また二関節筋代替アクチュエータには直接並進運動の推力を得られることが望ましく、減速機を外部に持たずにすむ構造が望まれる。

2.4 ダイレクトドライブと大推力化

ダイレクトドライブにおいて大きな推力を得るには、エネルギー蓄積量が同じである以上、漏れ磁束を防ぐ一方で、ポールピッチを小さくし、同じ進行速度に対して周波数を上げ、パワーを稼ぐことが重要である。速度が同じでパワーが大きくなれば、パワー/速さが推力なので、大推力アクチュエータを作ることができる。

この様な発想から1980年代に図1の横磁束形モータがドイツで提唱されたが、その構造は複雑で、固定子/可動子間の垂直力も大きいので、簡潔な構成のリニアアクチュエータをこの原理で構成することは難しかった。日立研究所が提唱する図2,3のトンネルアクチュエータ(以下TA)は、同じ磁気回路構成の原理をもち低速大推力駆動を可能としながら、垂直力の発生を抑制し製作が容易であるという重要な長所 [4] を持っており、工作機械などの分野で注目されている。

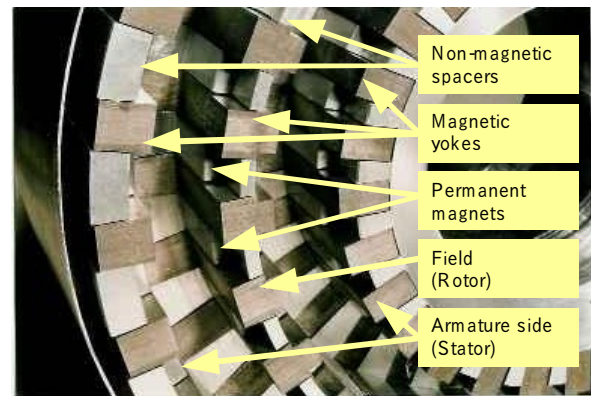


図1 ドイツ Braunschweig 工科大学で最初に試作された横磁束形モータ Transverseflussmotor の断面: (真中の部分が永久磁石と非磁性金属枠からなる界磁可動子、それをはさむように配置されているのが、非磁性金属枠と横方向に磁路を構成するための鉄心を組みあわせた電機子、このモータは左の電機子と右の電機子のそれぞれに円環状の2つの独立な巻線を持ち、直交2相として励磁される。そのため、製作・組み立てが一見して明らかにならない複雑である他、駆動電源も特別なものを必要としたが、従来のモータに比べて数倍以上の高いトルク/重量比を得られたため、1990年代以降ヨーロッパを中心に盛んに研究開発の対象となった。最近の研究例については、たとえばアーヘン工科大学のHP: http://www.iem.rwth-aachen.de/index.pl/new_materials_and_machinesなどを参照。)

リニア电磁アクチュエータで代替し、その全てに後述の粘弾性制御を適用することにする。

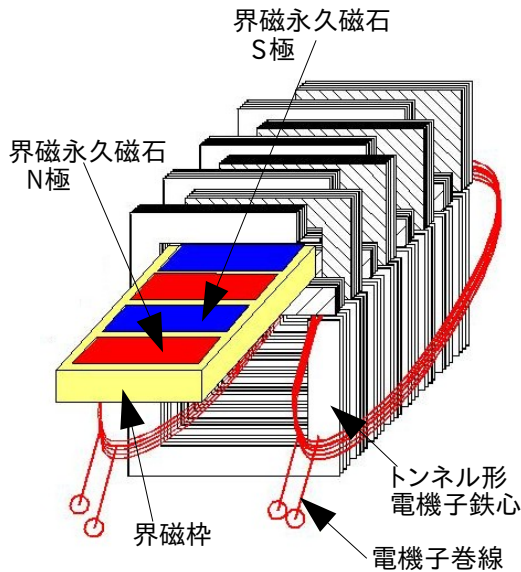


図2 日立研究所で提案されたトンネルアクチュエータの単相分の構成（図1と同様横方向に磁路を確保することで、小ポールピッチを実現している。120度ずつ空間的位相をずらすように、これと同じ構成の電機子ユニットを3つ配置することで、一般的な対称三相電源での駆動を可能としている。このように電機子鉄心で構成された小さなトンネル状のスペースの中で、非磁性の枠で固定された薄い永久磁石の界磁が力を受け動くのでトンネルアクチュエータとなづけられたが、磁気的な原理は図1の横磁束形モータと似ており、ギャップ単位面積あたりの推力値も同程度であると考えられる。ただし、リニアモータとしての構成が簡単で、製作が容易である上、界磁部の支持が簡単な構成ですむ点に画期的な長所があり、工作機械への応用が期待されている。）

2.5 電磁アクチュエータの制御

これに対して生体模擬アクチュエータでは、粘弾性を持つやわらかい制御が望まれる。

通常の産業システムで用いられる力制御、速度制御、位置制御は、一つの物理量に着目した制御目標で高い精度を得る、硬い制御である。

3. 生体模擬のための電磁アクチュエータ

3.1 基本的考え方

生体模擬の視点で電磁アクチュエータの用い方を整理し、ここでは

- i. 筋肉は収縮するのみだが、電磁アクチュエータは双方向力を出す、
- ii. 電磁アクチュエータは制御で力学特性を任意に設定できる
- iii. 拮抗動作は必要のあるところのみ選択的に行わせる方がよい
- iv. 筋が粘弾性を示すのは力を入れているときのみ：基本的に電磁アクチュエータにおいても同じ考え方活動状態にあるアクチュエータに粘弾性を演じさせる
- v. 以上より、6対3自由度という二関節筋座標系における制御の考え方を、1関節筋は関節部の1つの回転モータで代替、2関節筋相当の力の発生は1対の

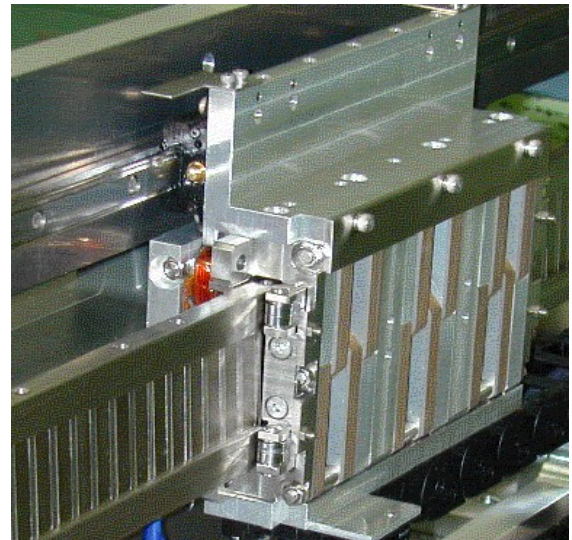
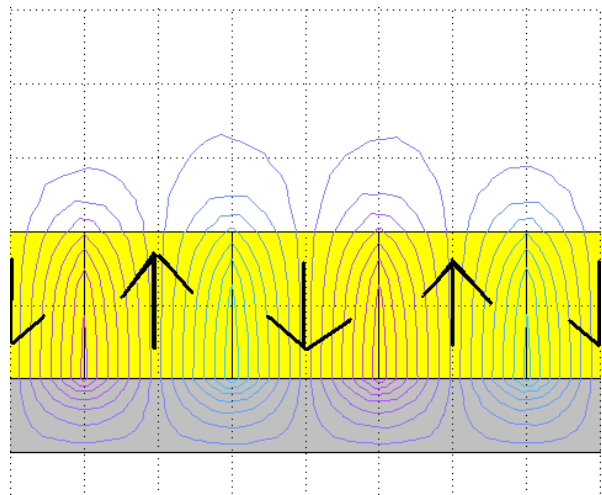
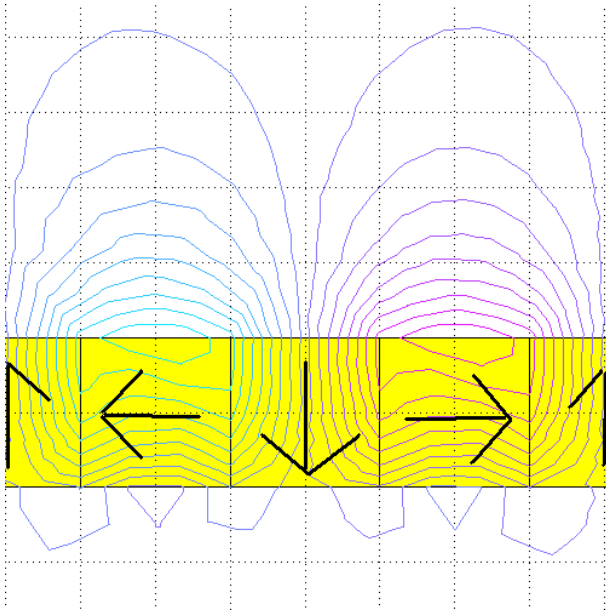


図3 工作機械への応用を意図して設計された初期のトンネルアクチュエータ試作機（この実験機は電機子側が動く構成になっているが、界磁側を可動子にする構成も可能である。その場合には、可動部が軽量となるため、高い加減速度が期待できる。この写真では、機械的支持部がコンパクトに構成されていること、本質的に小さな推力脈動をさらに低減するために、永久磁石がスキュー構造として固定子枠に埋め込まれていることに注目してほしい。）



(a) 通常の片側式リニア同期モータ界磁磁石の配置と磁力線電機子と対向しない側の磁気抵抗を下げ、片側有効の磁束密度を大きく撮りためるために、永久磁石の下面に裏張りの鉄心ヨークがある点に注意、この鉄心は可動子全体の機械的強度を持たせる役割も担っている。当初、軽量化の検討においては、この重い鉄心を以下に削減するかに重点をおいた検討を行った。



(b) Halbach 配列を用いた界磁と磁力線

(a) と比較し、裏張りの鉄心ヨークがない点に注意。磁石配列の妙により、磁気回路短絡のためのヨークがないにもかかわらず、磁力線が電機子と対向する片側のみ押し出されて、大きなギャップ磁束密度を得ることができるが、界磁磁石内部の応力が大きく、製作や構造の維持に困難がある。

図4 永久磁石を用いた界磁磁気回路の構成

3.2 小型軽量化をめざした空心形リニア同期モータの試作

本研究の第1段階として、電磁アクチュエータが重いという短所を克服することを目的に、空心形大推力モータの設計。試作を行った。鉄心がなくても大推力を得るためには、界磁の起磁力を大きくし、磁気抵抗が大きくても大きな磁束密度を確保する必要がある。

そこで、起磁力の大きな NdFe 磁石（希土類永久磁石）を組み合わせ、図4のような Halbach 配列を構成し、鉄心のない構造で推力を得る方法を考案し設計した。

電機子巻線はリング巻線とし、電機子の界磁との対向面積を有効活用するために図5に示す。両側式リニアモータとして構成をした。この方式では、空心の特長として、電機子一界磁間の機械的支持が楽になるという長所がある。

図6のように試作した。機械は図7に示す磁束密度、図8に

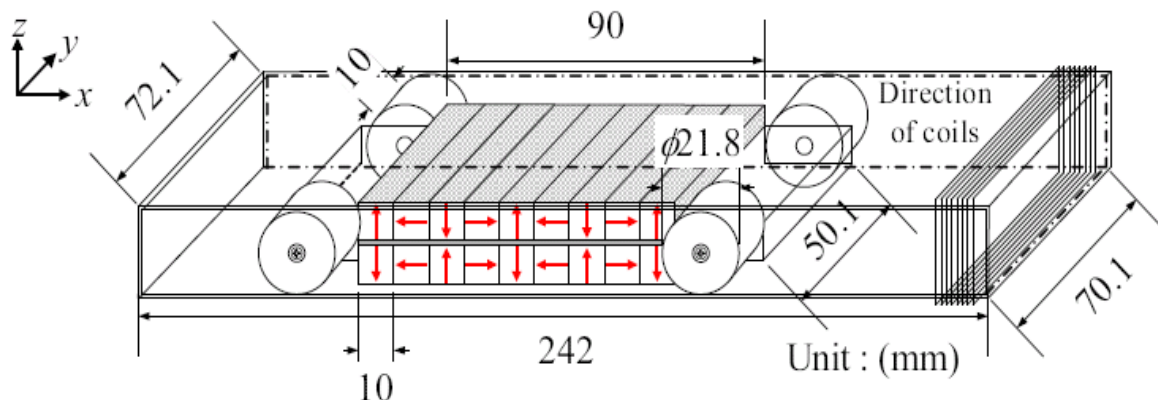


図5 両側式Halbach配列界磁空心リニア同期モータの構成
外側が図右部分に示されるリング巻からなる電機子、可動子は界磁として、両面式のHalbach永久磁石配列によって構成されている。可動子は電機子の中をリニアベアリングによって支持され左右に移動する。

示す静推力特性とも、解析、設計値と良好な一致をし、電磁的には狙い通りの高性能を持つことが実証できた。

しかし、本方式では、

- (1) 鉄心レスになったものの、その分使用量の増えた永久磁石材料、銅巻線とも鉄心比べて軽いとは言えず、提案構造が十分な軽量化にはつながらなかったこと、
- (2) 図9の可動子写真にある通り、位置センシングに用いるリニアエンコーダや支持のために必要な体積、重量が大きいこと、
- (3) Halbach 永久磁石は内部応力が大きく、製作や構造の維持には特殊な接着剤と組み立て技術を要し、安価な量産に適していないこと、

という本質的問題点も明らかになった。

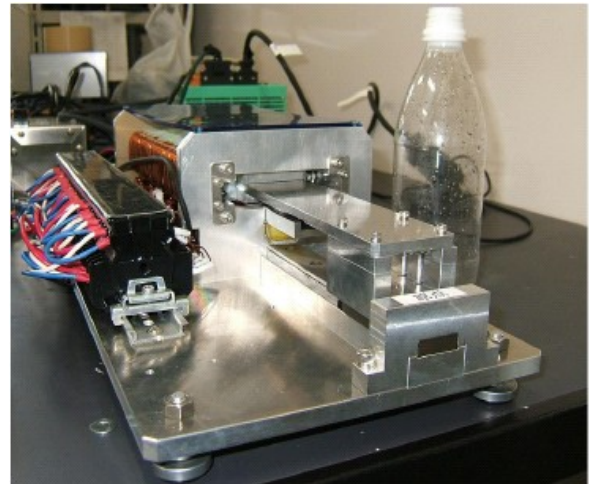


図6 両側式 Halbach 配列界磁空心リニア同期モータ試験機

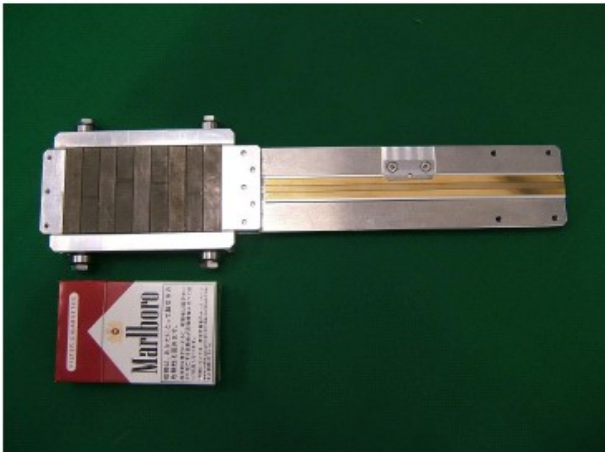


図7 図6の試験機の可動子

(左の煙草箱とほぼ同様な大きさの部分が Halbach 永久磁石配列による、可動子有効部分、その右側の長い部分が、可動子全体の機械支持を行うためのレールと、位置センシングのために取り付けられたリニアエンコーダ)

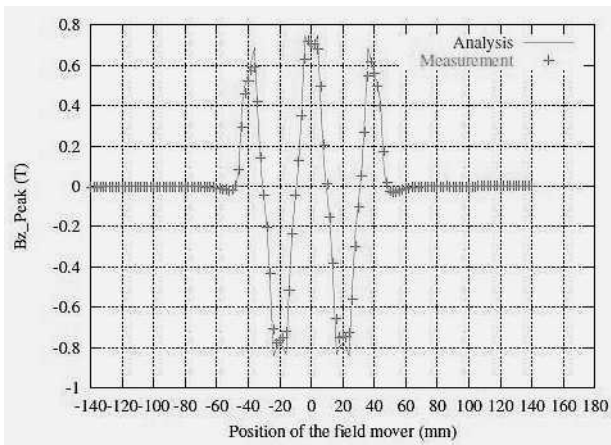


図8 可動子磁石表面から1mmのところの磁束密度
(曲線は設計時に用いた二次元有限要素法による計算結果、+でプロットされた点は実測結果)

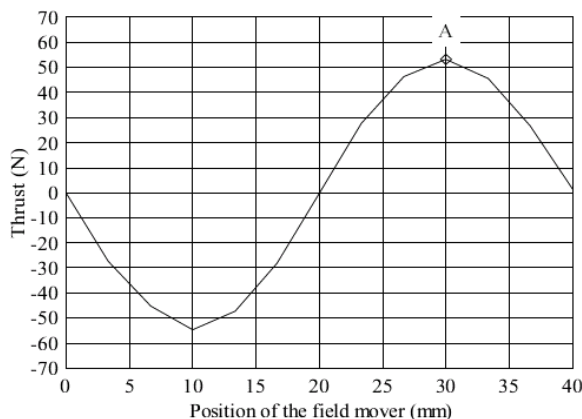


図9 電機子を直流励磁をした状態で可動子をゆっくり動かした時の静推力 (曲線は設計時に用いた二次元有限要素法による計算結果、50mm 付近の点Aは実測結果：両者が良く合っていることが検証できた。)

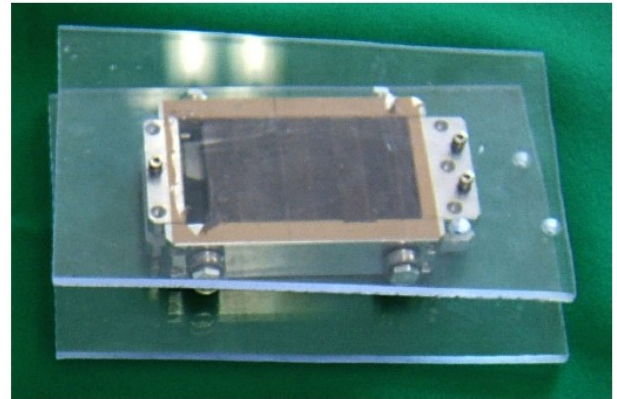


図10 永久磁石自身の内部応力により駆動試験中に接着部分が剥がれ破損してしまった界磁磁石。(写真のいちばん左側の磁石が飛び出てしまっている。)

(3)に関係し、図10に駆動試験中に内部応力のため破損した可動子の様子を示す。また、どうせ両側式にするのであれば、組立の困難な Halbach 配列ではなく、図4(a)の鉄心を省略した界磁構造とし、製作を容易にする案もあるが、この場合には、図7とは異なり、磁束密度分布が方形波状になるので、推力脈動が大きくなる。

これらの経験と考察から、空心形リニアモータの採用は断念し、図2のTAを基本とした鉄心形リニア同期モータの改良により、二関節筋代替を行う考え方に開発の方向修正を行った。

3.3 TAを応用した2関節筋代替リ

ニア同期モータの小型軽量化

この課題について、ギャップを詰める、モータ固定子鉄心形状を工夫する、図4のように王子可動子構造を加えて、体積や質量を大きく増すことなく、可動部の機械的強度を大きくとる。さらに、新たに付け加えられたこの構造強化部に位置検知や可動子の機械支持、電源からの電流供給のためのブラシなどを配置して、高機能化を行うことを通じて、図7に見たように駆動システムの構成上必要だが、推力に直接寄与しない付加的要素部分の占めるスペースを最小化する、という観点からの現在設計検討を進めている。

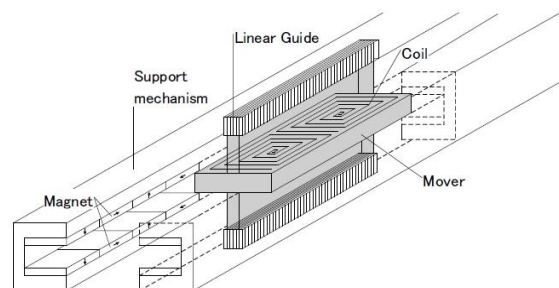


図11 アクチュエータ小形軽量化のアイデア
(王子構造により可動子を強化すると同時に、支持と位置センシング機能をこの構造強化部に持たせ、全体構造の最小化を図ることができる。同じ考え方は、4章の粘弾性制御駆動実験で用いられるトンネルアクチュエータ試験機でも採用されている。)

4. リニア同期モータの粘弾性

(2007年8月25日開催)

制御

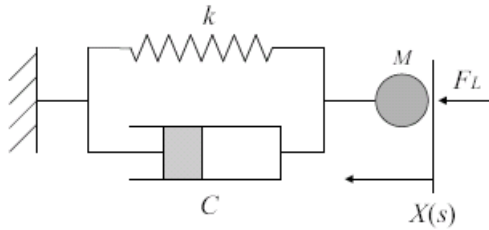


図12 力制御形粘弾性制御で模擬する力学系
力制御系のフィードバック制御ループのゲイン設計の一部を変更することで、図12に示す力学系の粘性、弾性を模擬する振る舞いを電磁アクチュエータにさせることができる。
ここでは簡単のため、図12で電機子側が固定されており、可動子の質量 M で可動子に負荷力 F_L が外部から加わるという一慣性系の力学モデルを導出する。

モータが発生する力を F_m とすると、ばねの自然長（すなわち、外部から印加される力がゼロの場合の位置）を x_0 、 x_0 からのずれを $\Delta x(t)$ とすると、

$$M \ddot{x} = -k \Delta x - c \dot{\Delta x} + F_L$$

ここで、 $F_m = -k \Delta x - c \dot{\Delta x}$ となるように推力を制御すればよい。

モータの力制御系の等価時定数 T_m が十分小さいとして、

$F_m^*(s)$ を本来モータに出させたい力として、図13のブロック

線図に表現するように、力制御系への指令値 F_m^{ref} を

$$F_m^{ref}(s) = -k \Delta X(s) - s c \Delta X(s) + F_m^*(s)$$

とすることで、リニアモータに所望の粘弾性を持たせる制御が

みで整理するならば、自然周波数 ω_n 、減衰定数 ζ との関係

$$\frac{c}{M} = 2\zeta\omega_n$$

$$\frac{k}{M} = \omega_n^2$$

と置く事ができるので、この考え方のもとでは、特殊なセンサや電源を配することなく、一般的な位置制御器のゲインを、上式にしたがって緩めに設定することで、所望の ω_n, ζ に対する極配置を設計することで、粘弾性制御が容易に実現できる。

図14のトンネルアクチュエータ試験機を用いて、このような機械インピーダンスの制御を行うと、図15の (a) のようにアルゴリズム中の剛性や減衰の定数を自由に設計し、ばねダンパを持つと同様な動きをリニアモータ単体で実現できる。実際に実験を行ってみると、(b) のように (a) の設計時の計算で意図した動きよりもダンピングが利いた挙動となる。これは、支持部の摩擦や、電力供給/信号伝達のケーブル類が、機械的な負荷になっているからである。この影響の低減については、オブザーバで負荷力の推定を行い、モータの動きを設計に近づけるような補償を行う可能性がある。

本来の2関節筋代替機能を実現するには、電機子側も可動子側も外部との機械的接続を持ちながら運動する二慣性系モデルとしての数学的記述が必要になる。その拡張は [5] に述べているように比較的容易である。

具体的に粘弾性をどの値に設定すべきか、この様な意図せぬ力の影響を積極的に補償する制御の可否については、2関節筋力学系という応用目的の中で議論を深める必要がある。

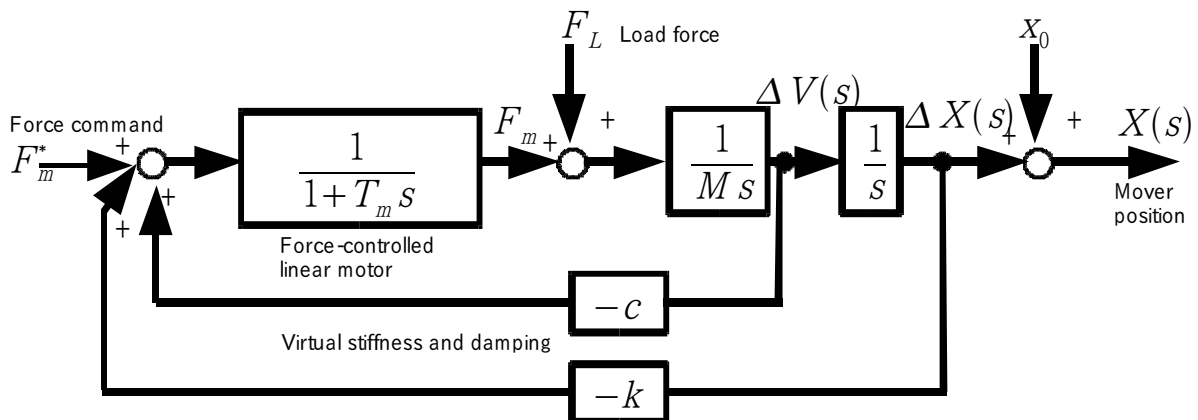


図13 一慣性系モデルに基づくリニアモータの力制御形粘弾性制御の基本的な構成

可能となる。図13のブロック線図を良く見ると、この構造は、位置カスケード制御系における速度、位置情報に、それぞれ c, k の比例フィードバックゲインをかけてフィードバック制御を設計したものと同一である。一般的な二次系の応答の枠組

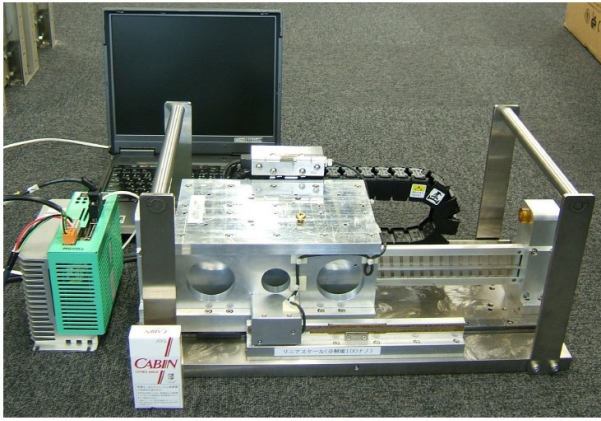
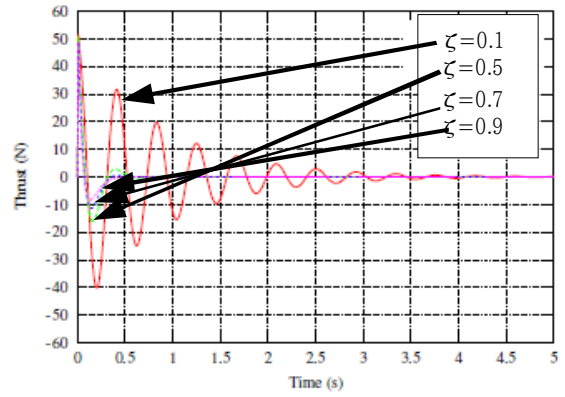


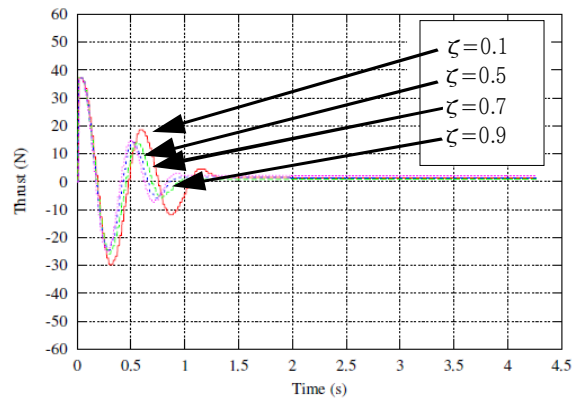
図 14 粘弾性制御（機械的インピーダンス制御）の駆動実験を行ったトンネルアクチュエータ試験機（最左の箱がサーボアンプ、トンネルアクチュエータ試験機、これは電機子が可動子になっており、界磁は固定子という構成を持つ。固定子界磁部分は中央の十字形の垂直尾翼のような板で、機械的に剛性／構造が強化されている。試験機奥の「つ」の字形の黒い部分が、電機子への電流を供給するケーブル。これが可動子に引きずられて動くために、機械的の負荷として作用し、実験の動きは設計よりもダンピングが大きく働く結果になっている。）

5. おわりに： 今後の取り組みと将来展望

2 関節機能代替用電磁アクチュエータの小型軽量化のための設計、製作とその推力特性の実験的検証が当面の課題である。つぎに、これを 2 関節アームの運動制御に実装する。その際、静的な力制御（アイソメトリックな筋動作）のつなぎあわせとしての筋機能、アーム制御の模擬が当面の作業目標となるが、電磁アクチュエータの場合、負荷力オブザーバを用いて発生力および負荷力を把握できるので、このことは比較的容易と考えられる。一方、電磁アクチュエータの質量、慣性は無視できず、リニアモータを実装したアームはいずれにしても「骨が重い」ロボットになってしまう。したがって、その次段階では、2アーム系の運動方程式を解き、動的効果を制御でどう吸収するかを工学的に考える必要がある。人間の腕も同様に無視できない慣性を持っているはずなので、動物の学習機能、自然なモーション制御の方法を参考にしながら、この検討を進めることが大切と考える。



(a) シミュレーションの一例



(b) 実験結果の一例

図 15 力制御形粘弾性制御を行った場合のつりあい位置ステップ変化に対する発生力の応答例（自然周波数 $\omega_n = 15 \text{ rad/s}$ 一定とし、減衰定数 ζ をパラメータとした結果。実験では支持部の摩擦やケーブルが機械的の負荷となり (a) の想定とは異なる動きとなっている。）

参考文献

- [1] 大島徹他：一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性．一筋の収縮力とロボットアームの粘弾性一．精密工学会誌，66 巻，1 号，pp141-146，2000．
- [2] 大島徹他：足関節と膝関節の 2 関節筋による協調機能を用いた跳躍メカニズム，日本機械学会論文集(C編)，Vol. 71，pp. 3510-3516，2005
- [3] 門田健志他：二関節筋装備基本モデル「HIPRO」-VEAを用いたロボットアームによる二関節筋特性評価一，(社)精密工学会へ，生体機構制御・応用技術専門委員会第1回例会資料，2-2，2004 年
- [4] 金 弘中他：「高加速度直線駆動装」（トンネルアクチュエータ）」，日本応用磁気学会誌，Vol. 29，No. 3，pp. 199-204 (2005)
- [5] 福正博之他：ロボットアーム駆動用リニア同期アクチュエータの負荷力オブザーバを用いた剛性・減衰係数の制御，SPC-06-171/LD-06-73，2006.12