

模擬生体電磁アクチュエータの提案と将来展望

東京大学大学院
日立製作所日立研究所

古閑隆章 福正博之
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、再現性の優れた特長が生かせる。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

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

られているときの磁界のエネルギーは

$$W_m = \frac{B^2}{2\mu_0} = 6.72 \times 10^5 \text{ J/m}^3 \text{ となる。これが通常の大きさの電気}$$

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

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、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、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、バネを稼ぎ減速するか、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。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特長[4]を持っており、工作機械などの分野で注目されている。

2.5 電磁アクチュエータの制御

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。

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。

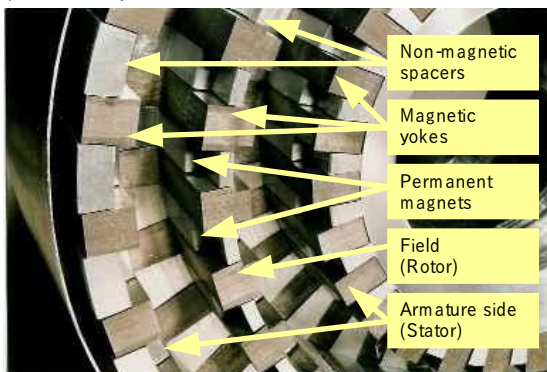


図1ドイツ Braunschweig 工科大学で最初に試作された横磁束形モータ Transverseflussmotor の断面: (真中の部分が永久磁石と非磁性金属枠からなる界磁可動子、それをはさむように配置されているのが、非磁性金属枠と横方向に磁路を構成するための鉄心を組み合わせた電機子、このモータは左の電機子と右の電機子のそれぞれに円環状の2つの独立な巻線を持ち、直交2相として励磁される。そのため、製作・組み立てが一見して明らかなように複雑である他、駆動電源も特別なものを必要としたが、従来のモータに比べて数倍以上の高いトルク/重量比を得られたため、1990年代以降ヨーロッパを中心に盛んに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。)

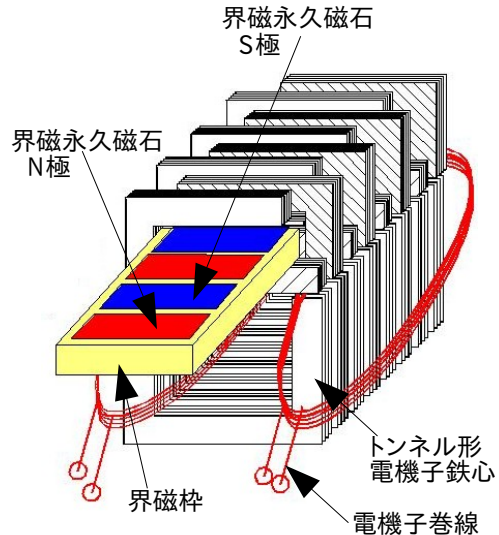


図2日立研究所で提案されたトンネルアクチュエータの単相分の構成 (図1と同様横方向に磁路を確保することで、小ポールピッチを実現している。120度ずつ空間的位相をずらすように、これと同じ構成の電機子ユニットを3つ配置することで、一般的な対称三相電源での駆動を可能としている。このように電機子鉄心で構成された小さなトンネル状のスペースの中で、非磁性の枠で固定された薄い永久磁石の界磁が力を受け動くのでトンネルアクチュエータとなづけられたが、磁気的な原理は図1の横磁束形モータと似ており、ギャップ単位面積あたりの推力値も同程度であると考えられる。ただし、リニアモータとしての構成が簡単で、製作が容易である上、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

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良い。
 - 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対のリニア電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とする。

3.2 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、ギャップをつめる、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による可動部強度の維持と構造強化部の高機能化により必要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。

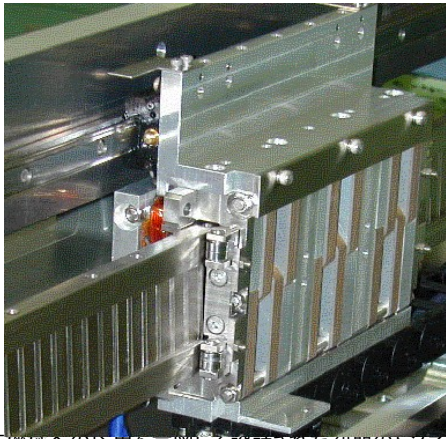


図3 工作機械への応用を意図して設計された初期のトンネルアクチュエータ試作機（この実験機は電機子側が動く構成になっているが、界磁側を可動子にする構成も可能である。その場合には、可動部が軽量となるため、高い加減速度が期待できる。この写真では、機械的支持部がコンパクトに構成されていること、本質的に小さな推力脈動をさらに低減するために、永久磁石がスキュー構造として固定子枠に埋め込まれていることに注目してほしい。）

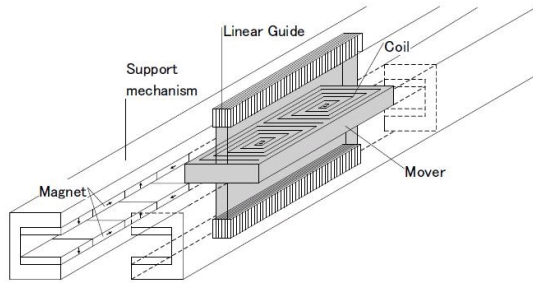


図4 アクチュエータ小形軽量化のアイデア（王子構造による可動子の強化と、支持と位置センシング機能を構造強化部を持たせる。）

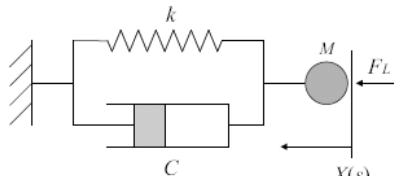
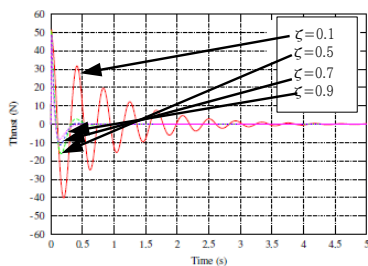
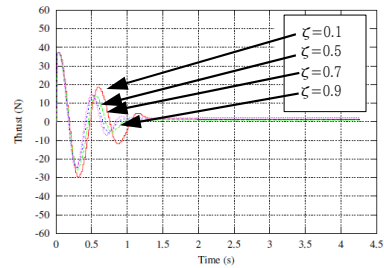


図5 力制御形粘弾性制御で模擬する力学系



(a) シミュレーションの一例



(b) 実験結果の一例

図6 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 $\omega_n = 15$ 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負荷となり想定とは異なる動きとなっている。）

4. リニア同期モータの粘弾性制御

具体的数式展開は省略するが、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5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[5]ができる。その挙動は図6の(a)のようにアルゴリズム中の定数の設定で自由に設計することができるが、実際には、(b)のように設計よりもダンピングが利いた動きとなる。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。

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課題だが、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、このことは容易であろう。一方、電磁アクチュエータの質量、慣性は無視できず、骨が重いロボットとなるので、次段階で、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。その際、人間の腕も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。

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