

# 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

福正 博之\*, 古関 隆章 (東京大学)

Stiffness and damping factor controls of a linear synchronous actuator for a robot arm using a load force observer  
Hiroyuki Fukusho\*, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## Abstract

In this paper, the authors have proposed a flexible motion using a linear synchronous actuator for a robot arm. The authors have considered a disturbance observer and a mechanical impedance controller for the actuator. An impedance control arranges a hypothetical impedance which is composed of a stiffness and a damping factor between an actuator and environment. And it also achieves the contact motion of environment by the suitable position compensation against the reaction force from the outside. The authors aim to design the control which can imitate the flexible motion like human by adjusting of the stiffness and the damping factor.

キーワード：インピーダンス制御, 剛性・減衰係数, 二関節筋, リニア同期アクチュエータ, ロボットアーム  
(Impedance control, Stiffness and damping factor, Bi-articular muscle, Linear synchronous actuator, Robot arm)

## 1. はじめに

近年、ヒューマノイドロボットが進化し、生物と共存する時代が到来している。しかしながら、ヒューマノイドロボットの構造はロボット工学に基づいた独自のものであり、その形態は生物と異なっている。最近、生物の仕組みを模倣した駆動機構及び動かし方によってヒューマノイドロボットの運動性能を向上させようという研究が進められている。

本論文では二関節を持ち平面内で動作するロボットアームを考える。ロボットアームは一見自由に動くように見えるが、各関節にモータを装備させるに留まっている。これは小さな細胞から構成され、柔軟で繊細な動きを可能とする我々ヒト等の生体とは構造が大きく異なっている。

ヒト等の四肢には隣り合った二つの関節に跨って着き、両端の関節を同時に駆動出来る筋、いわゆる二関節筋が存在する。熊本らの研究<sup>(1)</sup>によると、ほとんどの生物は四肢に二関節筋というものを持っている。

これまでのヒューマノイドロボットは二関節筋を想定した機構を装備していなかったため、肘関節と肩関節にあたる部分に回転型モータ等を配置し、逆キネマティクスを計算することで腕の動きを再現してきた。しかしながら、我々は実際にこの様な計算を脳で行っているわけではない。周知のことであるが、我々は二関節筋と肘・肩関節に着いている筋肉を用いてそれらの筋肉の出力量を線形的に変化させるといった簡単な制御にて腕を動かしている。ゆえに、二関節筋を搭載したヒューマノイドロボットアームは、従来のロボットのように複雑な運動アルゴリズムが不要となり、ヒトと同じような俊敏で柔軟な運動が可能になると言われており、二関節筋機構をロボットアームに搭載させることは非常に有効となる。

現在、二関節筋用のアクチュエータとして油圧アクチュ

エータ、空気圧アクチュエータにゴムとワイヤを組み合わせた構造や、回転型モータと機械系を組み合わせた構造等が使われている<sup>(2)</sup>。もしこれらの複雑で大きな機械システムを一つのリニアアクチュエータで置き換えることが出来れば、装置全体を簡略化・軽量化出来ると筆者らは考える。

そこで筆者らはロボットアームの二関節筋用アクチュエータとして軽量で大推力を発生可能な永久磁石型リニア同期アクチュエータを設計している<sup>(3)</sup>。本論文ではロボットアーム用として充分なりニア同期アクチュエータを想定し、それを用いて二関節筋の動作を模擬するためのアクチュエータの制御に関して述べる。具体的には、摩擦等の外乱に対するオブザーバと、生物の柔らかさを表現するために剛性・減衰項を考慮した制御を考える。そして、それらの係数の調整を理論的に考察する。

## 2. ロボットアーム用アクチュエータとしての永久磁石型リニア同期アクチュエータ

永久磁石型リニア同期モータは位置決め装置や精密機械等の様々な用途に用いられている。ヒト型サイズのロボットアームを想定した時に、アクチュエータはコンパクトかつアームを動かすのに必要な推力を発生させなければならない。しかし、現存するヒューマノイドロボットアームは、サイズがヒトと同じ程度であってもアクチュエータの推力が足りないためにヒトのような動きを再現出来ないものが大半である。これはコンパクトで大きな推力を発生出来るアクチュエータが存在しないことが主な原因であり、軽量・大推力なアクチュエータの開発は急がれる課題である。

これらの問題を解決するために筆者らは軽量で大推力を発生可能な永久磁石型リニア同期アクチュエータを設計している。そこでロボットアーム用のアクチュエータとして永久磁石型リニア同期アクチュエータに着目する点を以下

に挙げる。

- (1) リニアモータの特長であるダイレクトドライブにより滑車等の余計な部品が不要となり、直線動作をする二関節筋の模擬をコンパクトに構成出来る。
- (2) 永久磁石から発生する磁束は大きく支配的なため、コンパクトで大推力を発生出来る。
- (3) 位置決め制御に使われているように、リニアエンコーダによる高い制御性が期待出来る。

これらの理由に基づき、本論文ではロボットアームの二関節筋用アクチュエータとして十分にコンパクトに必要な推力を発生可能なリニア同期アクチュエータが存在すると想定した時に、我々生物のような俊敏で柔軟な動きをヒト型サイズのロボットアームにおいて再現させるためのアクチュエータの制御方法に関して述べる。

### 3. リニア同期アクチュエータの制御

リニア同期アクチュエータにおける電流制御系から位置制御系までの制御ブロックの一例を図1に示す。本論文におけるリニア同期アクチュエータは、可動子に永久磁石を持つ形のを想定している。そして、リニア同期アクチュエータは永久磁石型同期電動機をリニアにしたものである。交流電圧・電流を扱わなければならない。

図1中の太枠で囲まれた部分がリニア同期アクチュエータによる電氣的・機械的ダイナミクスである。交流モータは電圧・電流の交流量を三相-二相変換及びdq変換を行うことで直流量として扱える。これらは既に交流モータにおいて主流となっている手法であるので本論文では参考文献(4), (5)等から以下に簡単に説明する。

#### 3.1 永久磁石型同期電動機の電圧方程式<sup>(4) (5)</sup>

**3.1.1 三相-二相変換** 三相-二相変換とは以下の変換行列を  $C$  により三相電圧・電流  $v_{u,v,w}, i_{u,v,w}$  を、直角二相電圧・電流  $v_{a,b}, i_{a,b}$  に変換することである。

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

**3.1.2 dq変換** dq変換とは次の変換行列を  $D$  により直角二相交流電圧・電流  $v_{a,b}, i_{a,b}$  から  $v_{d,q}, i_{d,q}$  を得ることで電圧・電流の交流量を d, q 軸における直流量とみなす変換のことである。回転子の回転角度位置を  $\theta$  とし、回転子の瞬時角速度を  $\omega$  とすれば、 $\theta = \int \omega dt$  であり、変換行列  $D$  は次の式で表される。

$$D = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

**3.1.3 電圧方程式** 参考文献(4), (5)から式(1), (2)を用いて詳細な計算を行う。モータの電機子抵抗を  $R$ 、d, q 軸インダクタンスを  $L_d, L_q$  及び、永久磁石による電機子鎖交磁束の最大値を  $\Phi_f$  とすると、d, q 軸上の電圧方程式は以下のように導出される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_a \end{bmatrix} \omega \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\Phi_a = \sqrt{\frac{3}{2}}\Phi_f$  である。また、 $\Phi_a\omega$ の項はq軸誘起電圧を表す。永久磁石型同期電動機では、式(3)において

- (1)  $R$ の電圧降下は充分小さい
- (2)  $sL_d, sL_q$ 等の過渡項は充分小さい
- (3) 永久磁石の界磁磁束  $\Phi_f$  は  $L_q$ に比べて充分大きい等を考慮すると、

$$v \simeq v_q = \Phi_a\omega \dots\dots\dots (4)$$

となる。

**3.2 リニア同期アクチュエータにおける扱い** 前節において回転型の永久磁石型同期電動機におけるベクトル制御を説明したが、筆者らが対象とするリニア同期アクチュエータにおける扱いについて述べる。

リニア同期アクチュエータは回転型と違いリニアエンコーダとセンサにより可動子の位置を測定する。ゆえに、前節で使われている回転子の角度位置  $\theta$  はリニアスケールによって計測される可動子の位置  $x$  と永久磁石の極ピッチから、巻線と可動子に配置された永久磁石の磁束の位相角として置き換えられる。また、同期モータは誘導モータと違い端効果を考慮した設計が基本的に不要なため、図1のように回転型における角速度・回転角度を単純に可動子の速度・位置として置き換えて考えることが出来る。リニア同期アクチュエータの静推力  $F_m$  と q 軸電流の関係は、電動機の静推力定数を  $K_f$  とすると次式で表される。

$$F_m = K_f i_q \dots\dots\dots (5)$$

モータの損失が無視された場合、q 軸誘起電圧を  $E_m$  とすると、次式が成り立つ。

$$F_m \dot{x} = E_m i_q \dots\dots\dots (6)$$

筆者らは実際のリニア同期アクチュエータを用いて設計した制御計の適用を目標としているため、アクチュエータの静推力は測定出来る。そこから静推力定数を算出することで、式(3)の永久磁石の磁束を細かく解析する必要なしに簡単にシミュレーションに適用出来る。

また、前節からリニア同期アクチュエータの機械的なダイナミクスの伝達関数は可動子の質量を  $M$  及び外乱力を  $F_d$  とすると、回転型と違い以下ようになる。

$$\frac{x(s)}{F_m - F_d} = \frac{1}{Ms^2} \dots\dots\dots (7)$$

**4. 生物の柔軟な動きを模擬するための制御手法**  
通常モータの駆動制御においては、3章の基本的な制御に加えて摩擦力等を外乱と見なし、外乱オブザーバによる補償で制御出来る。しかし、生物の動きを模擬したロボット

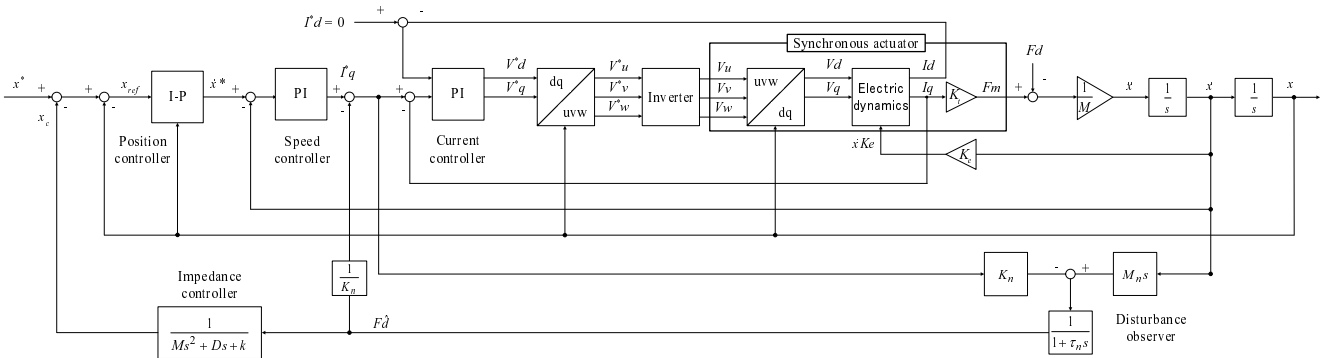


図1 システム全体のブロック線図  
Fig. 1. Block diagram of the system

トアーム用のアクチュエータは単調な動きを繰り返すだけではない。例えば、我々生物はある動きをする場合においても力の大きさや方向を一定にする状況は少なく、変化していることが多いため、アクチュエータの力の大きさは微妙に変化することが多い。加えて、様々な外乱も存在する。そのような状況を模擬するためには、剛性・減衰係数等を考慮した補償項の設計が必要となる。

そこで剛性・減衰係数を考慮した制御法に関する先行研究から、筆者らが最終的に目指すロボットアームの二関節筋用アクチュエータに求められる駆動制御法に関して検討する。

**4.1 インピーダンス制御<sup>(5)(6)</sup>** インピーダンス制御とは、アクチュエータと環境の間にバネとダンパで構成される仮想的なインピーダンスを設定し、外界からの反力に応じた適当な位置補正により、環境との安全な接触動作を実現させるものである。これにより、バネとダンパで構成されるインピーダンスを仮想的に模擬出来るため、機械系が不要となり装置のコンパクト化につながる。

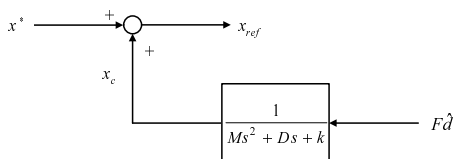


図2 インピーダンス制御のループ  
Fig. 2. Loop of the impedance control

図1中の  $F_d$  はアクチュエータにかかる摩擦力等に加えて、ロボットアームへの外乱等からアクチュエータにかかる反力を表している。実際の制御ではこの反力はオブザーバを用いて推定出来る。

仮想インピーダンスを実現するには、推定された反力に対してインピーダンスモデルに従った位置応答を実現すればよい。すなわち、反力  $F_d$  が加わった時の位置変位  $x_c$  をインピーダンスモデルに従って、

$$x_c(s) = \frac{F_d}{Ms^2 + Ds + k} \dots \dots \dots (8)$$

$M$ : 可動子の質量,  $D$ : 粘性係数,  $k$ : バネ定数とする。反力  $F_d$  がないときの位置のオフセット値  $x_{off}$  に補正  $x_c$  を加えたものを指令値として位置制御系に入力すれば、仮想インピーダンス制御が実現される。

**4.2 コンプライアンス制御<sup>(5)(6)</sup>** コンプライアンス制御とは位置変位から力学モデルにかかる力やモーメントを環境モデルにより計算し、その力やモーメントを制御するものである。

インピーダンス制御を用いてコンプライアンス動作を実現するには、インピーダンス制御系における位置のオフセット  $x_{off}$  を位置指令  $x^* = x^*(t)$  に変えるだけでよい。すなわち、図2に示すように、位置指令  $x^*$  にインピーダンスモデルにより作られる  $x_c$  を加えた  $x_{ref} = x^* + x_c$  を位置制御系への指令値とすればよい。環境に接触せず反力  $F_d = 0$  のときは  $x_c = 0$  であるから  $x_{ref} = x^*$  となり、アクチュエータは位置指令に忠実に追従する。環境に接触して反力  $F_d$  が返ってくると、それに応じた変位指令  $x_c$  が生成され、位置制御系への指令値が  $x_{ref} = x^* + x_c$  の形で修正され、コンプライアンス動作が実現出来る。

このインピーダンスモデルを位置指令に加え、剛性・減衰係数を考慮して生物のような柔らかさを持ったアクチュエータ制御の実現を試みる。

**5. 外乱オブザーバとインピーダンス制御による制御系設計**

外乱オブザーバと前節で述べたインピーダンス制御によりロボットアームの二関節筋用アクチュエータの制御法を検討する。外乱オブザーバとインピーダンスモデルを図1のように挿入し、位置制御までのシステムを考える。  $K_n, M_n$  は  $K_t, M$  のノミナル値、  $\tau_n$  は純粋微分を避けるためのLPF (制御の速さやサンプリング周期によるが、1ms程度) である。これにより、摩擦力等の外乱を考慮する。

また、式(8)よりインピーダンスモデルを  $\frac{1}{Ms^2 + Ds + k}$  というダンピングのある二次系とした。バネ定数  $k$  が任意に設定可能であり、バネ定数  $k$  を入れただけでは振動的な系

になってしまう。そこで、ダンピングのある系にするために粘性係数  $D$  を入れる。粘性係数  $D$  は二次系の極配置から決められる。ダンピングのある二次系の標準形の特性方程式は次式となる。

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $\zeta$ :減衰係数,  $\omega_n$ : 固有各周波数である。

$0 < \zeta < 1$  の場合、二つの極は  $s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$  となり、複素平面上で  $\omega_n$  を半径とする円周上に位置し(円の大きさが応答速度に関係する)、実軸となす角度  $\theta$  が減衰係数  $\zeta$  と  $\zeta = \cos\theta$  の関係にあることが分かる。また、減衰係数  $\zeta$  は重要なパラメータで、 $\zeta$  が 0 に近くなるほど応答は振動的になる。オーバーシュートを抑えるには、 $\theta$  を 0 に近づけることが重要となる。式 (9) より、

$$\frac{D}{M} = 2\zeta\omega_n \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{k}{M} = \omega_n^2 \dots\dots\dots (11)$$

となる。これより、 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$  が得られ、バネ定数  $k$  が大きくなるほど、応答速度が速くなることが分かる。また、式 (10) より粘性係数は  $D = 2\zeta\omega_n M$  となる。

ロボットアームの動きを考えた時に、アームの目標位置への移動が多少遅くなってしまってもオーバーシュートがないようにアクチュエータの制御を設計すべきである。例えば、アームを壁に出来るだけ近くまで動かして止める条件を考えた場合に、オーバーシュートが存在するとアームは壁を突き破ってしまうことになる。

ヒトのような動きをロボットアームで模擬するためには、バネ定数  $k$  を 1000N/m 程度 (1N で押すとバネが 0.1cm 凹む) にするといいと考える。同様に減衰係数  $\zeta$  を 1 に近づけ応答を振動的にさせないことも重要となる。これらの考察を元に、インピーダンスモデルの制御系を設計し、実際のアクチュエータにて位置制御の実現に向けて検討している。

加えて、オーバーシュートを防ぐためには、参考文献 (7) にあるように位置制御器を I-P 制御系を採用し、Kessler 標準形によって設計することも重要である。図 1 は一例であるが、I-P 制御系によってリニア同期アクチュエータの位置制御システムを構成し、剛性・減衰係数の変化によるアクチュエータの位置の変化等をシミュレーションにより検討し、実際のリニア同期アクチュエータへの実装を目指す。

## 6. まとめ

本論文では、ロボットアームの二関節筋用アクチュエータとして十分にコンパクトに必要な推力を発生出来るリニア同期アクチュエータが存在すると想定し、我々生物のような俊敏で柔軟な動きをヒト型サイズのロボットアームにおいて再現させるためのアクチュエータの制御方法に関して、外乱オブザーバとインピーダンスモデルによる剛性・減衰係数の制御の点から検討した。生物の動きをロボットアームにて模擬するためにはアクチュエータは単調な動き

を繰り返すだけではなく、力の大きさを微妙に変化させる必要がある。また、様々な外乱を受けやすい。そのような状況において柔軟な動きを再現するためには剛性・減衰係数等を考慮した補償項の設計が重要となる。

本論文では、バネやダンパの機械システムをソフトウェアにて仮想的に模擬するインピーダンス制御について説明し、ロボットアームの二関節筋用アクチュエータに必要な剛性・減衰係数の検討を行った。

ヒトのような動きをロボットアームで模擬するためには、アクチュエータは出来るだけオーバーシュートを発生させないことが重要である。そのために、バネ定数  $k$  を 1000N/m 程度、減衰係数  $\zeta$  を 1 に近づけ応答を振動的にさせないことが必要であることを考察した。加えて、参考文献 (7) にあるように位置制御器に I-P 制御系を採用し、Kessler 標準形によって設計することでヒトのような柔軟な動きを再現出来る可能性を示唆した。

## 7. 今後の課題

今後は、本論文で検討したインピーダンスモデルの制御系を設計し剛性・減衰係数を調整することによって、柔軟さを備えたアクチュエータの位置制御をシミュレーションにより実現することを目指す。

加えて、実際のリニア同期アクチュエータにシミュレーションによって設計した位置制御系を組み込み、リニア同期アクチュエータと剛性・減衰係数を調整した制御によるヒトのような柔らかさの実現を目指す。

## 参考文献

- (1) 熊本水頼 : “協調制御モデル -Animal Inspired Technologies-,” 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第 1 回 Workshop (2005.10)  
精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 HP : <http://www.air-dawn.net/>
- (2) 門田健志, 鈴木健也, 深井善朗, 小田高広 : “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,” 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第 1 回 Workshop (2005.10)
- (3) Hiroyuki Fukusho, Takafumi Koseki, KIM Hounng-Joong, Hitoshi Shibata : “Design method and fundamental calculation of a light PM-type linear synchronous actuator for producing large thrust,” *ICEMS2006* (2006.11)
- (4) 引原隆士, 木村紀之, 千葉明, 大橋俊介 : “パワーエレクトロニクス,” 朝倉書店 (2000)
- (5) 趙 莉, 古関隆章 : “オブザーバからの外乱力推定信号を用いた永久磁石型リニア・アクチュエータの駆動制御,” 東京大学卒業論文 (2005.3)
- (6) Yoichi Hori : “Robust Motion Control based on a Two-Degrees-Of-Freedom Servosystem, *Advanced Robotics*,” *VSP and Robotic Society of Japan*, Vol.7, No.6, pp.525-546, (1993)
- (7) 古関隆章, 劉江桁 : “モータドライブ・磁気浮上実験の「とりあえずの制御系設計」:実験室からの報告,” 電気学会 リニアドライブ研究会 (2001)