

# 生体の粘弾性を模擬したロボット用リニア同期アクチュエータの制御

福正 博之\*, 古関 隆章 (東京大学), 金 弘中 (日立製作所)

Control of a linear synchronous actuator for a robot with arbitrary viscoelastic emulation of life

Hiroyuki Fukusho\*, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

KIM HOUNG-JOONG (Hitachi, Ltd. Hitachi Research Laboratory)

## Abstract

In this paper, the authors have proposed a flexible motion control system using a linear synchronous actuator for a robot. The authors have considered a thrust control type impedance control system for the actuator. The system 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 have designed and evaluated the control system which can emulate the flexible motion like human by adjusting of the stiffness and the damping factor. Accordingly, the system could suggest the potential of flexible control for electric actuator.

キーワード：機械インピーダンス制御, 力制御, 二関節筋, リニア同期アクチュエータ, ロボットアーム  
(Mechanical impedance control, Thrust control, Bi-articular muscle, Linear synchronous actuator, Robot arm)

## 1. はじめに

今日、様々なヒューマノイドロボットを実際に目にする機会が増え、その運動性能の向上も著しい。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ため、生物の仕組みを模擬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。

従来のロボットと動物の四肢先端におけるアクチュエータの配列の違いに注目すると、従来のロボットは角関節に一つずつアクチュエータを配置して独立に制御するのが一般的であるが、動物はそれぞれの関節を駆動する関節（一関節筋）に加えて二つの関節に跨って作用する関節（二関節筋）というものが存在する<sup>(1)</sup>。そして、この二関節同時駆動機構をロボットに搭載することは、ロボットにとって多くのメリットがあることが判ってきた。

本論文では、ヒューマノイドロボットのために必要とされる二関節筋の役割を果たすアクチュエータとしてリニア同期型のアクチュエータを用いた場合の、ソフトウェアによって粘弾性を模擬することを可能とした制御手法の実証に関して述べる。

## 2. 二関節筋の重要性と粘弾性を持つアクチュエータの制御

ヒトの上肢の筋肉は図1にあるように6つの筋肉で大別出来る。二関節筋は図1のe3, f3にあたり、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させるだけでなく、両端の関節の一関節筋群と共に協調した活動をする筋である。この二関節筋は一関節筋同様互いに拮抗動作をするという特徴を持ち、ヒトや動物特有の四肢先端における出力・剛性・軌道制御に貢献している。

ヒトの動きは図1の6つの筋肉にあたるアクチュエータの出力をそれぞれ図2のように制御することで模擬することが出来ると言われている<sup>(1)</sup>。この手法は、各アクチュエータの出力を調整するだけであるため、ロボット制御にとって従来の逆キネマティクスを計算して各アクチュエータの出力を調整する手法よりも簡単になる。

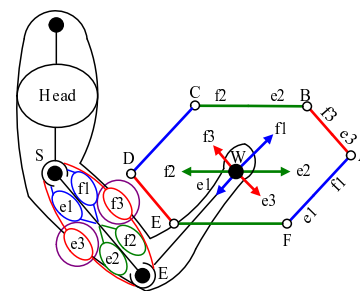


図1 二関節筋を持つヒトの上肢における出力特性<sup>(1)</sup>  
Fig.1. Unique characteristics of output force distribution at arm point<sup>(1)</sup>

そこで、この二関節筋機構を実現するためのコンパクトかつ大推力を発生できるアクチュエータが必要となるが、本研究ではリニア同期アクチュエータを用いることを提案する。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。

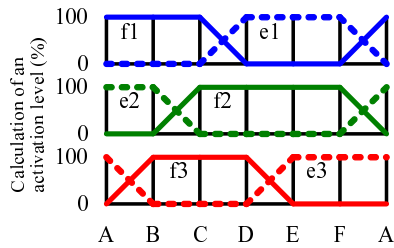


図2 筋電図計測から確立された3対のアクチュエータの出力制御手法<sup>(1)</sup>

Fig. 2. A activation level of each three sets of actuators design based on measurements of real electromyogram<sup>(1)</sup>

- (1) リニアアクチュエ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、本論文では二関節筋の役割をするリニア同期アクチュエータにて生物の柔軟性を模擬するための粘弾性要素を調整可能な力制御システム提案し、実際のリニア同期アクチュエータを用いて評価した。

### 3. 粘弾性を実装した力制御システム

**3.1 サーボアンプを用いた力制御形インピーダンス制御** 現在の多くのリニアモータの制御は位置制御系が使われているが、本論文では正確な位置を必要とするこれらの用途とヒトのような動きを実現させるためのアクチュエータの制御方法は少し異なっているのではないかとすることに着目した。生物の動きに着目すると、脳から筋肉への指令は何Nの力を出せというように力指令である。この考えは図2において各アクチュエータの発生する力の割合を制御することで、ロボットアームが任意の方向へ力を発生可能であるという理論と同じことを意味しており、位置制御系によって制御するよりも状況を捉えやすい。そこで、本論文では粘弾性を模擬する項を持ち、入力を推力とする提案システムを力制御型インピーダンス制御システムと定義する。

そして、本論文では提案する力制御型インピーダンス制御システムを実際のリニア同期アクチュエータに実装するためにサーボアンプを用いた。リニアモータはベクトル制御によって推力を発生するが、本研究で用いたサーボアンプは自動的にベクトル制御を行う推力制御・位置制御・速度制御などを備えている。そのためこのサーボアンプを用いれば、例えば推力指令を入力するとモータのパラメータを用いてベクトル制御を行い、指令に応じた推力を発生させることが出来る。本論文では、推力指令の入力に対して入力通りの推力をサーボアンプにて自動的に得られること

を前提として、粘弾性要素の実装を行った。

サーボアンプを用いて図3のような力制御システムを提案した。図3中の $F_m^*(s)$ にあるように推力指令となっているのが特徴であり、図中の $k, C$ で示されたバネ・ダンパ成分のパラメータを調整することで、アクチュエータの粘弾性を自由に設定できる。入力指令の捉え方が位置指令から力指令に変わることによって制御器の構成が簡単になるが、図3の下側にあるようにアクチュエータの現在位置および速度情報を用いて粘弾性制御を行うため、 $X_0(s)$ のように位置指令を用いることも出来る。入力を位置指令 $X_0(s)$ と考えた場合、位置制御系によるシステムと同じような制御系になる。つまり、図3の弾性・粘性係数 $k, C$ を小さな比例ゲインと捉えれば、その部分が位置制御系および速度制御系の制御器となる。結果的には緩いPID制御系と同じようなシステムになっているとも捉えられるが、本研究においてはアクチュエータの推力を制御するのがこのシステムの目的であり、そこに粘弾性要素を挿入するという意図の下で設計した。

推力の入力指令に対する入力応答の伝達関数は次式で示される。

$$X(s) = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} F_{m0}(s) + \frac{1 + \frac{C}{k}s}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} X_0(s) \quad (1)$$

$$- \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} F_L(s)$$

また、図3に示す制御系は本論文で用いた実験機のように一慣性系のシステムを想定している。式(1)から本研究で提案する制御システムは推力、位置そして外乱の入力に応じて仮想バネ・ダンパ要素を自在に調整できる一慣性系であることが分かる。実際にロボット用のアクチュエータを考えると、ロボットの動きに追従してアクチュエータも動くためにロボット用のアクチュエータは二慣性系で考えなければならない。しかし、二慣性系の伝達関数を計算したところ、基本的には一慣性系と変わらない特徴であることが分かったため、本論文で提案する力制御形インピーダンス制御システムは二慣性系のシステムにも拡張出来る<sup>(2)</sup>。

この制御システムの実証のために、次の表1の特性を持つ、日立製作所 日立研究所の金弘博士の開発したトンネルアクチュエータを用いて実験した。また、図4に試験機として使用したトンネルアクチュエータとサーボアンプによる制御システムの写真を載せる。

トンネルアクチュエータは、鉄心を持つ永久磁石型リニア同期アクチュエータの一種であり、上部磁極歯と下部磁極歯の間隙に永久磁石の磁極を交互に配置した可動子が配置されている。固定子に流す電流を変えることで可動子との間に吸引・反発力が生じるが、その特徴的な構造によって磁気吸引力は相殺され、磁束のほとんどは推進力として作用しギャップの支持機構を簡素化出来る。加えて、磁極間漏れ磁束が少なく大きな推力が得られるなどの特徴を持ち、現在注目されているリニア同期アクチュエータである<sup>(3)</sup>。

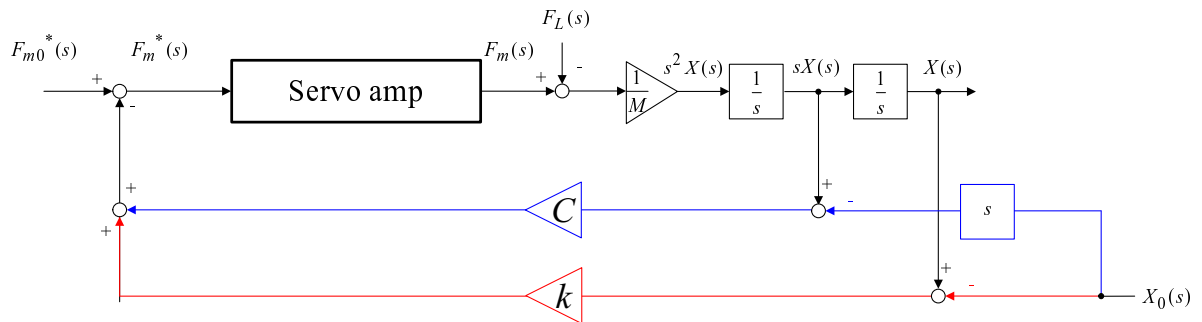


図3 サーボアンプを用いた力制御形インピーダンス制御のブロック線図

Fig. 3. Block diagram of force-based mechanical impedance control system using servo amplifier

表1 試験機の特徴

Table 1. Characteristics of the test machine

$R$ ( $\Omega$ )	0.675
$L_d$ (mH)	15.5
$L_q$ (mH)	18.65
$M$ (kg)	6.0
$K_e$ (dq) (N/A)	18
$K_t$ (dq) (V/(m/sec))	18

\* エネルギー保存則より  $K_e = K_t$  である。

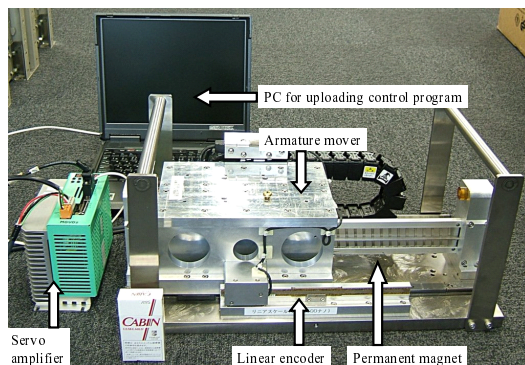


図4 試験機の外観

Fig. 4. Overview of the test machine system

3.2 試験機の特徴 - 解析と測定の比較・評価 - 試験機が粘弾性を持った動作を実現しているかを次の条件によって確かめた。粘弾性の影響が分かりやすいように、実際にロボット用アクチュエータとして用いるよりも柔らかい係数を用いた。試験条件を以下に述べる。

試験機の可動子を原点にある状態から 100mm 先の目標値へ移動させる指令を与える。試験機には推力指令を与える。つまり、原点から 100mm の場所を基準とし、原点まで可動子を押し込んだ状態から基準点まで引き戻すような、バネを引っ張った状態から離す状況を想定する。ゆえに可動子は多少振動しながら基準点付近で停止する。

このような動作において、固有角周波数が  $\omega_n = 10\text{rad/sec}$  の場合において、減衰係数を  $\zeta = 0.1, 0.5, 0.7, 0.9$  と変化させたときの可動子の位置変化と推力変化を比較した。参

考までに、 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$  のときバネ定数  $k = 600\text{N/m}$  である。

提案した力制御形インピーダンス制御系による解析結果と測定結果を図5から図8に示す。

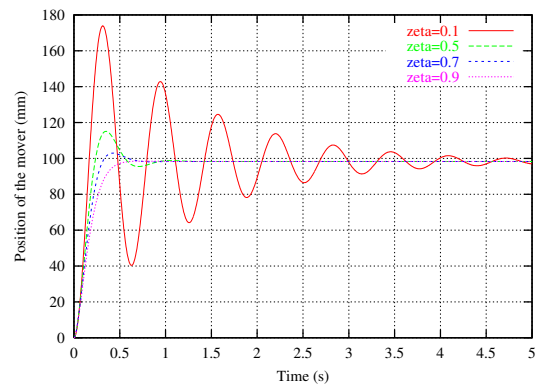


図5  $\zeta$  の違いによる可動子位置の解析結果

Fig. 5. Simulation result of mover position with the change of the  $\zeta$

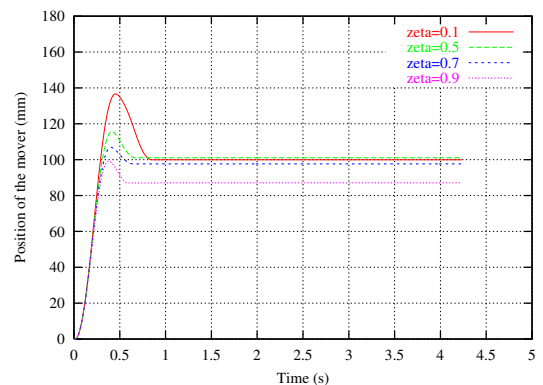


図6  $\zeta$  の違いによる可動子位置の測定結果

Fig. 6. Measurement result of mover position with the change of the  $\zeta$

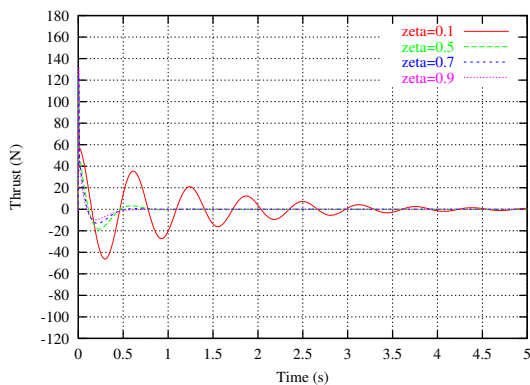


図 7  $\zeta$  の違いによる推力の解析結果

Fig. 7. Simulation result of thrust alteration with the change of the  $\zeta$

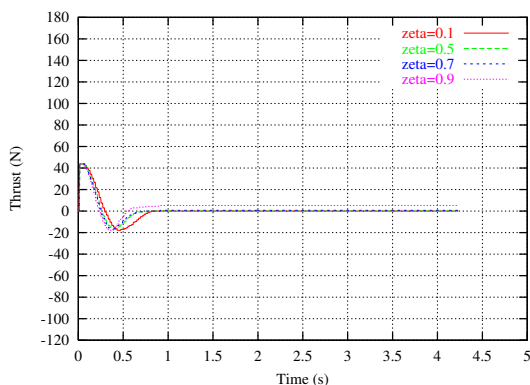


図 8  $\zeta$  の違いによる推力の測定結果

Fig. 8. Measurement result of thrust alteration with the change of the  $\zeta$

これらの結果より、試験機単体にソフトウェアによる粘弾性を持った動きが実現しているため、提案した力制御形インピーダンス制御の試験機へ概ね実装することが出来たと言える。ゆえに、本論文で提案したシステムを用いて粘弾性要素を制御系に挿入することで、ソフトウェアを使って容易に粘弾性を変化させながらアクチュエータを駆動させることが出来るため、実際のパネやダンパなしにアクチュエータ単体の制御でヒトのような柔らかい動きを自在に模擬出来ることが確かめられた。

問題点として、試験機の支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な摩擦や粘性が原因で解析と測定の間には誤差が生じた。今後は、試験機のもつ摩擦や粘性の特性を補償する制御器を考慮する必要がある。

また、本論文ではサーボアンプに制御処理を行わせたために、コマンドのシリアル転送の遅さから推力制御に無駄時間が発生し、結果的にシミュレーションよりも実験系の制御周期が長くなってしまった。そのため、シミュレーショ

ンと測定の間には少しの誤差が生じたが、この問題は PC 側で制御のための信号処理を行い、アナログインタフェースを用いることで解決出来る。その実現が当面の課題である。

#### 4. まとめ

本論文では、直線的に推力を発生させる筋肉と同じように、ロボット用にリニア電磁アクチュエータを用いることで滑車等の部品が不要になるため装置全体をコンパクトに出来る利点を利用し、リニア同期アクチュエータを用いて生物の持つ粘弾性をアクチュエータ単体で模擬するための制御手法に関して検討し、実装した。

筋肉を模擬するアクチュエータのために推力指令の制御系を提案し、仮想バネ・ダンパによる粘弾性を制御系に組み込んだ力制御形インピーダンス制御システムを提案した。

提案した力制御形インピーダンス制御システムを実際の試験機に実装させ、解析とほぼ同じ特性を得ることが出来た。これにより、アクチュエータ単体の制御によって生物の持つような滑らかさを容易に実装させることが可能となった。

#### 5. 今後の課題

実際の試験機において、試験機の支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な粘性摩擦や粘性が原因で解析と測定の間には誤差が生じた。加えて、本論文で用いた試験機への実装手法はサーボアンプで制御処理を行うために、制御にかかる処理時間が長くなるという課題が生じた。

今後は力制御形インピーダンス制御システムの信号処理を PC 側で行い、処理時間の短縮を目指す。また、試験機のもつ摩擦や粘性の特性を補償する制御器を力制御形インピーダンス制御システムに加えて、より自由度の高い粘弾性を持つ制御システムの構築を行う。

#### 謝 辞

本論文の執筆にあたり、日立製作所 日立研究所の金弘中博士を始めとする関係者の方々には、提案システムの実証のために試験機を貸して頂くだけでなく様々な助言を頂きました。感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 熊本水頼：“ヒューマノイドロボット工学,” 東京電機大学出版社, (2006.9)  
精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会  
URL : <http://www.air-dawn.net/>
- (2) 福正博之：“生体の拮抗二関節筋を模擬する電磁駆動系の開発と制御,” 東京大学大学院修士論文, (2007.3)
- (3) HITACHI:ニュースリリース, (2004.4.9)  
URL : <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/>