

二関節筋電磁アクチュエータの磁気回路設計と静推力特性

福正 博之* 山本 裕介* 古関 隆章*

Magnetic circuit design and static thrust calculation of a linear synchronous actuator for artificial bi-articular muscles

Hiroyuki Fukusho*, Yusuke Yamamoto*, Takafumi Koseki*

An actuator emulating bi-articular muscles mechanism has many merits for humanoid robots. For example, calculation for motion controls becomes substantially easy and fast. It will be also possible to make actuators for robot arms or legs smaller. The authors propose a new electromagnetic actuator to implement the mechanism of the bi-articular muscles. The mover of the proposed actuator is composed by the Halbach array. The authors design magnetic circuit of a prototype machine for evaluating static thrust and investigating fundamental structure and control strategies.

キーワード：二関節筋，ハルバッハ配列，永久磁石，リニア同期モータ，ロボット

Keywords：Bi-articular Muscles, Halbach array, linear synchronous motor, robot

1. はじめに

我々の周りにヒューマノイドロボット(HRT)の存在が身近になっている。現在は産業用ロボット等がロボットの主な役割であるが、ただの機械に留まらず、ペットロボットのように人間とロボットが共存する時代が近づきつつあるように感じる。

しかし、ロボットは一見自由に動くように見える各関節毎にモータを装備させるに留まっている。最新の人型ロボットもこの域を出るものではない。そ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異なっているからである。

ヒト等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できる筋、いわゆる二関節筋が存在する。解剖学的には古くから周知の筋で(C.Galen, 131-201AD)、哺乳類から両棲類に至るまで極めて普遍的に存在し、昆虫にさえ存在する。このような二関節同時駆動モータの概念は従来の機械工学界、ロボット工学界には未だ導入された例がない。

二関節筋は図1の e_3, f_3 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見事に協調した活動をする筋である。この二関節筋は特殊な筋ではなく、普通の一関節筋と収縮機能特性は同じである。この二関節筋は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⁽¹⁾。

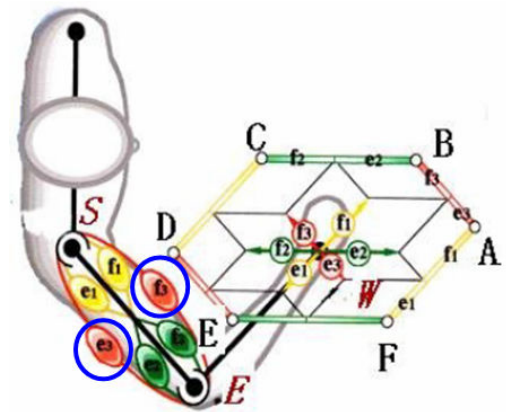


Fig.1. Unique characteristics of output force distribution.
(excerpt from (1))

3対6筋の拮抗筋群($e_i, f_i, i=1, 2, 3$)から構成される協調制御モデルが系先端の作業座標系に描く出力分布は図1に示すように6角形となる。この6角形の辺A-B, D-Eは上腕に平行でありその長さは拮抗二関節筋 e_3, f_3 の出力の和に等しい。辺B-C, E-Fは肩関節Sと手根関節部Wを結ぶ線に平行で、その長さは肘関節拮抗一関節筋 e_2, f_2 の出力の和に等しい。また辺C-D, F-Aは前腕に平行で、その長さは肩関節拮抗一関節筋 e_1, f_1 の出力の和に等しい。この特徴を利用すると実行筋力の計測が可能となる⁽²⁾。

ところがこの時、図1に示すように6角形の出力分布図から($e_i, f_i, i=1, 2, 3$)の組み合わせを求めようとすると無限の解がある事が判る。この事はヒトや動物では仮に1つの筋が *deteriorate* しても他の筋の出力調整で全体の出力特性を保つ事が可能である事を示している。ヒトや動物等の高い

* 東京大学大学院工学系研究科 古関研究室
Koseki lab., Dept EE, The University of Tokyo

順応性を示すものであろう協調制御型ロボットであれば、1つのモータが故障して出力低下しても他のモータの出力調整で全体の出力分布特性は維持出来る事を示す。極限環境作業ロボットなどに適した特性である。これは従来型関節座標系ロボットには期待出来ない特性である⁽¹⁾。

産業界の色々なものが生物の仕組みをまねて進化している。鳥の羽のような飛行機の翼や、風のながれを意識した自動車、新幹線の形状等が一例である。これと同様に、二関節同時駆動モータの概念を導入しロボット界を進化させるための研究が進んでいる。

先行研究⁽³⁾により、二関節同時駆動機構をもつアームでは、従来機構と比べてアクチュエータの数は多くなるが、小さなアクチュエータを使える事が分かっている。しかし、現時点での二関節筋再現動作は、関節間のリニアアクチュエータとワイヤ、コイルバネの組み合わせや空気圧制御ゴム人工筋、さらには油圧式アクチュエータによる動力等によって実現されている。

これらの動力源では装置全体を小型にしつつ必要な推力を発生させる事は難しい。そこで本稿では、二関節筋駆動用の新たな電磁アクチュエータの磁気設計を行い、基本特性を評価する。

2. 提案する電磁アクチュエータ

〈2・1〉 電磁アクチュエータに要求される条件

先行研究⁽³⁾から、図2のような平均成人男性とほぼ同じサイズの上肢、具体的には表1のパラメータで示されるロボットアームを考えた時に、二関節筋駆動用アクチュエータに要求される推力とストロークについてまとめる。

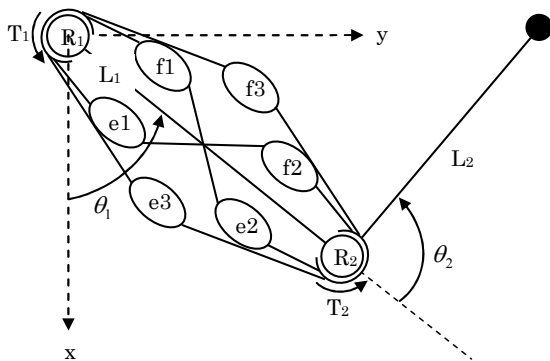


Fig.2. The arm system of life.

Table 1. Parameters of the robot arm.

	リンク 1	リンク 2
長さ[mm]	$l_{L1}=300$	$l_{L2}=300$
幅[mm]	$w_{L1}=100$	$w_{L2}=100$
重量(腕)[kg]	$m_{L1}=2$	$m_{L2}=1$ [kg]
半径[mm]	$r_{R1}=30$	$r_{R2}=30$
重量(関節) [kg]	$m_{R1}=0.5$	$m_{R2}=0.5$
可動角[rad]	$\pi/2$	$5\pi/6$

表1の条件下で図4中のリンク1, リンク2共に、 $\theta_1=\theta_2=0$ [rad]から表中のそれぞれの可動角分までを2秒間で動かす際に、二関節筋 e3, f3 用の電磁アクチュエータに要求される推力とストロークは、それぞれおよそ 20.0[N], 130.0[mm]である事が分かっている。本研究では、この要求仕様を満たしながら、装置全体が小型な直接伸縮型電磁アクチュエータの開発を目指す。

〈2・2〉 提案システムの構成

提案するシステムの可動子の構成を図3に示す。図のようなハルバツハ配列永久磁石で構成された可動子を非磁性素材の筒で包み、その外側に導線を巻き2相の交流電流を供給する事によって推力を発生させる。

ハルバツハ配列とは、図4(a)のように永久磁石を磁化の向きを変えて並べた配列であり、図4(b)の通常の磁石配列と比べて、空心でも片側だけに強い磁界を発生させる事が出来る。これにより電機子をコアレス化でき、トルク脈動が抑制される⁽⁴⁾。

提案システムは、図3のように上下二組のハルバツハ配列永久磁石を組み合わせ、上下それぞれから発生する磁束から推力を得る両側式である。大きさは要求される推力と装置全体の大きさを考慮して図のように定めた。特にz方向の大きさは、可動子の外側にコイルを巻く事を考えて、仮にヒトの上腕にこのサイズの磁石が装着されても大きくなり過ぎないように定めた。ストロークは可動子の外側の筒の長さに依存するため、調整可能である。永久磁石の特性については後述するが、Nd-Fe-B型を使用したので比重を7.5[g/cm³]とした。ゆえに、可動子全体の質量はハルバツハ配列を作るための接着用の厚さが上下それぞれ3.0[mm]のスチール板(比重8.0[g/cm³]で計算)を加えても891.0[g]となる。

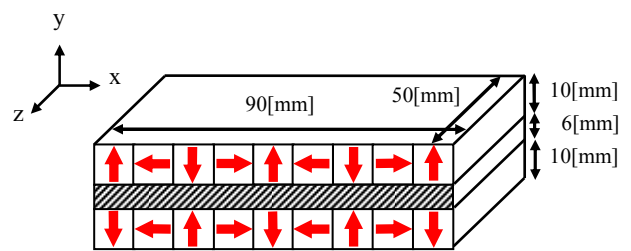


Fig.3. Mover composed of Halbach array.

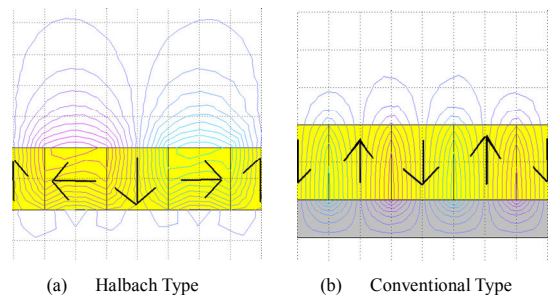


Fig.4. Comparison of magnetic flux lines of Halbach arrangement and conventional arrangement. (excerpt from (4))

3. 提案システムの電磁界解析による推力

(3・1) 解析条件

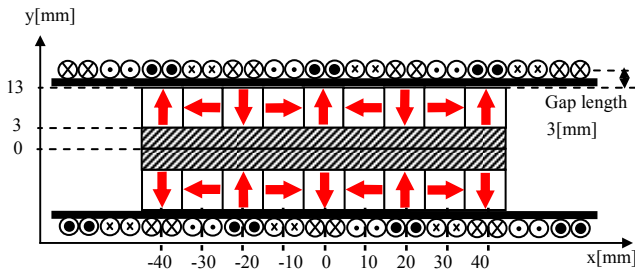


Fig. 5. Two-dimensional analysis model.

提案システムの二次元解析モデルを図 5 に示す。電磁界解析ソフト(Ansoft 社 Maxwell SV)を使用し、有限要素法(FEM)により可動子の移動に伴う推力の変化を解析し、評価する。

永久磁石は Nd-Fe-B 型でポールピッチ 20.0[mm]であり、残留磁束密度 $B_r=1.24$ [T], 保持力 $H_c=9.0 \times 10^5$ [A/m]として与える。また、図中黒の非磁性素材はアクリル筒を想定し、厚さを 2.0[mm]とした。解析上では比透磁率 $\mu=1.0$ の完全な非磁性状態である。図中の斜線部は、ハルバツハ配列構成時に接着及び安定化のために設置するスチール板で、特性は解析ソフト内のヒステリシスのあるスチール素材を用いた。

導線の断面積は π [mm²]であり、ポールピッチが 20.0[mm]と短い事から、製作上簡単な 2 相の交流電流により推力を発生させる。永久磁石表面から導線の中心までのギャップは 3.0[mm]とする。

図中の導線に流れる電流は、

$$\odot: 5\sqrt{2} \cos(\omega t), \quad \otimes: -5\sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$\odot: 5\sqrt{2} \cos(\omega t - \pi/2), \quad \otimes: -5\sqrt{2} \cos(\omega t - \pi/2)$$

とする。また、可動子の移動に伴って ωt の大きさを 0° , 45.0° , ..., 360.0° として与える。つまり、図 5 の状態では $\omega t=0^\circ$ で最も大きな推力を発生する。可動子が右へ 5[mm]移動すると $\omega t=45.0^\circ$ で最も大きな推力を発生する。図 5 のように可動子の中心が 0[mm]から、20.0[mm]までの 5 点 ($x=0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0$ [mm])にある時の推力の大きさを、 ωt を変化させた直流電流値を与える事で静推力とみなして解析し、その結果をつなげて推力の変化を評価する。実際は導線を 4 重巻にして設計する事を考えているため、4 重巻の状態で解析する。そして、0[mm]から 20.0[mm]までの推力の変化から半周期分の変化が評価できるため、以降は可動子の位置に応じた推力の変化はほとんど変わらないと判断して評価する。

(3・2) 解析結果

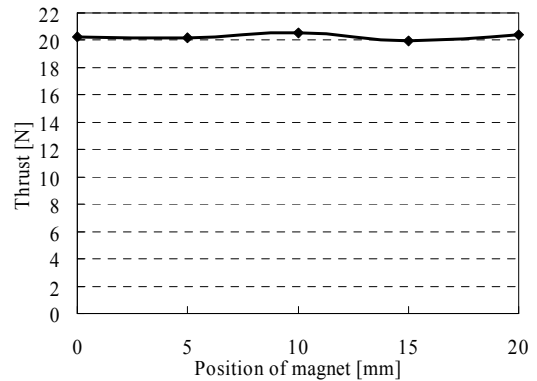


Fig. 6. Change of the thrust with the movement of the mover.

図 6 に半周期分の解析結果を示す。結果、可動子の移動に伴い平均約 20.0[N]の推力を保持出来る事が分かった。また、可動子の移動によるトルク脈動は 0.1[%]以内と非常に小さく、y 方向にかかる力もほぼ 0[N]である事が分かった。

これより、本稿で設計したアクチュエータは、二関節筋駆動用としての基本性能を有すると考えられる。

4. 提案システムの静推力特性

(4・1) 測定モデル

実際に可動子を動かすためには、解析モデルの状態に支持機構を加える必要がある。提案システムは、HRT 用の二関節筋のための電磁アクチュエータであるので、ロボットアームが力こぶを作っている最中には電磁アクチュエータ自身が傾く。そのため、傾いた状態でも機能するために、支持機構には柔軟性を持たせる必要がある。また、傾いた状態で磁石表面とコイル間のギャップを一定に保ち、推力の減少を防ぐ必要がある。

そこで、本稿では図 7 のような支持機構を持たせる事を提案する。図中真ん中にあるのは永久磁石であり、スチール板で固定されている。外側に 4 つの車輪を斜めに配置する事により、アクチュエータ自身の傾きに伴う y-z 方向にかかる力を支持する。そして、図中の黒く塗られた部分には少し硬めのゴム製のチューブを図のように成形し、レールのように配置する。車輪との接触部分は滑りやすいシートを接着する予定である。車輪は可動子の両端(x 方向)に 4 輪ずつ固定する。場合によっては可動子の真ん中にも固定し、支持する。チューブは外側のアクリル筒に接着、固定する予定である。

こうする事でアクチュエータが傾いた時には、ゴム製のチューブが縮む事で永久磁石とコイル間のギャップを解析時と同じ状態に保つ事ができ、x 方向に発生する推力を安定して発生させる事が出来ると考えられる。

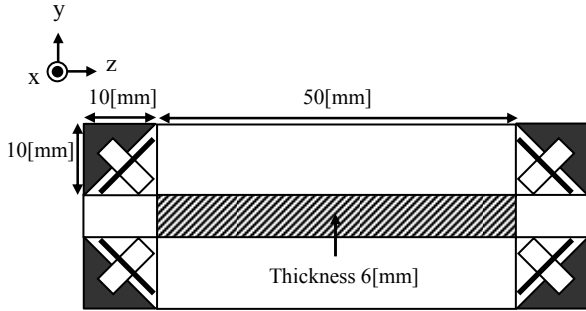


Fig.7. Cross-section of the proposed actuator with mechanical support.

5. まとめ

ヒューマノイドロボット(HRT)の運動性能の向上のために生態系の仕組みを取り入れる研究が進んでいる。その中で、ヒト等の生体系に存在する二関節筋を HRT の四肢に装備させる事により、運動制御の計算が容易になり、従来機構で使われるアクチュエータと比べて小さなアクチュエータを使える事が分かっている。

本稿では、これまで、電磁形のアクチュエータでは十分な推力/重量比が得られないと言われてきた事を考慮し、軽量化を図ってこの問題を解決するために、希土類永久磁石を組み合わせた可動子を持つ、空心の同期形アクチュエータを用いる事を提案した。空心で十分な推力を得ながら、電機子巻線を簡単な集中巻としても推力脈動を小さく抑えるため、可動子は1対の Halbach 配列磁石の背面を対向させる構成とした。本方式では、相差角を 90 度近くに保つ駆動制御をする事で、電機子・界磁間に原理的に垂直力が生じないため、支持機構を簡便なものに出来るという利点がある。一方、アクチュエータ外部に比較的大きな漏れ磁束を生じる欠点がある。ここでは、一例として平均成人男性の上肢とほぼ同じサイズのロボットアームに使用する二関節筋駆動用電磁アクチュエータの磁気回路設計を行い、有限要素法を用いた電磁界解析により、静推力を評価した。上記の狙いの通り、推力脈動の小さな構成が実現できる事が確認された。また、推力絶対値としても要求性能を満たす設計が可能である事が示された。

6. 今後の課題

本稿で提案した支持機構を含めた電磁アクチュエータを製作し、静推力特性を測定する。

また、実機による動特性を測定し、位置センサの実装方法や駆動制御など、実用的駆動システムに向けた検討を深度化する。さらに、上記に挙げた漏れ磁束の問題の克服など、さらに良い性能を目指した磁気回路構成についても検討を行いたい。

- (1) 熊本水頼:「協調制御モデル-Animal Inspired Technologies-」, 精密工学会第1回 Workshop (2005)
精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 HP
URL: <http://www.air-dawn.net/modules/xfsection/article.php?articleid=6Name>
- (2) 大島徹、藤川智彦、熊本水頼:「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. 一出力分布の簡便な測定法一」, 精密工学会誌, 67 巻, 6 号, pp944-948, (2001)
- (3) 吉田憲吾:「二関節同時機構を持たせたロボットアームに関する基礎研究」, 東京大学卒業論文, pp.21-24 (2005)
- (4) 立石大輔. 水平移動も可能な非接触駆動鉛直輸送システムの提案. 電気学会交通・電気鉄道・リニアドライブ合同研究会, TER-03-36/LD-03-61, pp. 49-54, July 2003, Okinawa (2003)