

Halbach 永久磁石を利用した二関節筋駆動用アクチュエータの概念設計と基本特性の評価

福正 博之*, 山本 裕介, 古関 隆章 (東京大学)

Conceptual design and fundamental calculation of an electromagnetic actuator for Bi-articular Muscles using Halbach permanent magnet

Hiroyuki Fukusho, Yusuke Yamamoto, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. はじめに

現在、ヒューマノイドロボットの研究・開発そして実用化が進んでいる。その中で、ヒトなど生き物の仕組みをヒューマノイドロボットに取り入れる研究が進んでいる。

そして、ロボットで生物の筋肉機能を再現するために拮抗二関節筋という筋肉が注目されている。

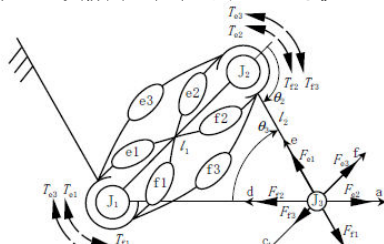


図1 下肢の有効機能筋肉モデル

Fig. 1 Functional model of effective muscular in a leg⁽¹⁾

二関節筋とは図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筋である。解剖学的には古くから知られている筋であり、哺乳類から両棲類に至るまで普遍的に存在し、昆虫にも存在する。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⁽²⁾。

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、現時点では筋肉動作は関節部分に設置されたモータ、関節間のリニアアクチュエータとワイヤによる動力や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の小型化は難しい。そこで本投稿では、二関節筋駆動用アクチュエータの概念設計と基本特性の評価を行う。

2. 解析モデル及び解析条件

先行研究⁽³⁾によると、ヒトの上肢とほぼ同じサイズで、上腕(肩から肘まで)と前腕(手近ら手首まで)の重さがそれぞれ2.0[kg], 1.0[kg]のロボットアームを考え、ロボットが力こぶを作る動作をする際の二関節筋に必要な推力とストロークは約16.0[N], 125.4[mm]となっている。よってこれらの要求を満たすために以下のモデルを提案した。

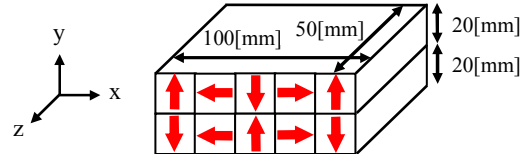


図2 ハルバツハ型磁石配列で構成された可動子

Fig. 2 Mover composed by Halbach array

図2のように一つの大きさが $2.0 \times 10^4 [\text{mm}^3]$ で磁極方向が4種類の永久磁石10個でハルバツハ配列を構成する。ハルバツハ配列は、永久磁石の磁化の向きを少しずつ変えて並べた配列であり、空心でも片側だけに強い正弦波状の磁界を発生できる。この可動子の外側を非磁性の素材で包み、その外側にコイルを巻いて交流電流を流す事によって可動子である磁石を動かす。可動子の質量はNdFeBの比重が約 $7.5 [\text{g}/\text{cm}^3]$ であるので約1.5[kg]となる。空心リニアモータにするのは装置全体を軽くするためである。2次元解析モデルを以下の図3に示す。

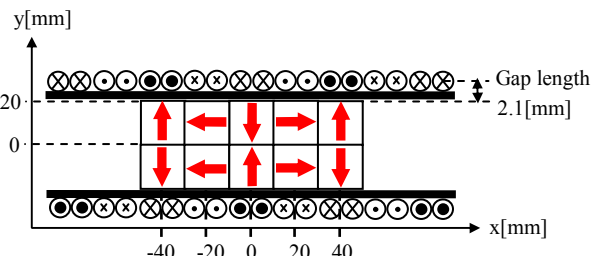


図3 二次元解析モデル

Fig. 3 Two dimensional analysis model

使われる永久磁石はNdFeB型で、厚さ20.0[mm]、ポールピッチ40.0[mm]、残留磁束密度 $B_r=1.24$ [T]、保持力 $H_c=9.0 \times 10^5$ [A/m]である。また、図中黒の非磁性の素材の厚さは1.0[mm]である。導線の断面積は π [mm²]であり、実際の設計の際にコイルの巻き方が簡単になるように2相交流とした。図中の導線に流れる電流は、

$$\begin{aligned} \otimes &: 5\sqrt{2} \cos(\omega t), \odot &: -5\sqrt{2} \cos(\omega t) \\ \otimes &: 5\sqrt{2} \cos(\omega t - \pi/2), \odot &: -5\sqrt{2} \cos(\omega t - \pi/2) \end{aligned}$$

として解析した。また ωt を $0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, \dots, 360.0^\circ$ として静磁界解析で発生磁界の変化及び推力を評価した。

3. 解析結果

最初に永久磁石による発生磁界の変化を評価した。10個の磁石は上下対称であるので、上側の磁石による発生磁界の変化のみ評価した。図3のように右から3番目の磁石の中心($x=0$)と両端の磁石の中心($x=-40, 40$)の点において、磁石表面($y=20$)から y 方向に離れたときの発生磁界の変化を以下の図4に示す。

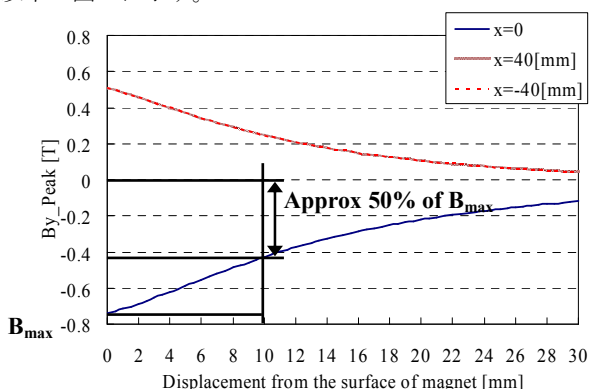


図4 磁石表面からの距離による発生磁界の変化

Fig.4 Change of the magnet flux with the distance from the surface of magnets

図4の x 方向の0が磁石表面($y=20$)を示す。図3の $x=-40, 40$ の表面から y 方向の発生磁界はほぼ一致している。また、 $x=0$ の表面から y 方向の発生磁界は、磁極方向を見て分かれるとおりマイナスの値となっている。これは左端の磁石から時計回り、右端の磁石から反時計回りの磁束が真ん中の磁石に入り込んでいるからである。そして、左右両方から磁束が入り込んでいるために左右よりも発生磁界が大きくなっている。

図4より、磁石表面から y 方向に10[mm]離れてしまうと、

発生磁界の大きさは約半分になってしまう事が見てとれる。ゆえに実際の設計では導線は4重巻程度にする事が有効である事が分かった。

次に図3の右から3番目の磁石の中心が $x=-40$ から $x=40$ まで移動したときの推力の変化を以下の図5に示す。

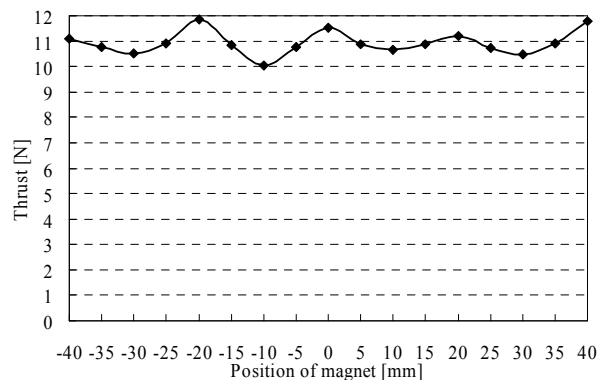


図5 可動子の移動による推力の変化

Fig.5 Change of the thrust with the movement of the mover

図5より、多少のトルク脈動はあるものの推力の平均は約11.0[N]となり、誤差は $\pm 9.1\%$ 以内である事が分かった。また、図3の状態($x=0$)において導線を4重に巻いた場合の推力の解析結果は36.2[N]となり、二関節筋駆動のための要求条件を十分に満たすものを設計可能である事が分かった。

4. まとめと今後の課題

多くの生物が持つ二関節筋をヒューマノイドロボットに装備させるために、ハルバツハ永久磁石を利用した二関節筋駆動用アクチュエータの概念設計を行い、解析によりストロークと推力の点で要求仕様を満たす事を評価した。

今後は、このモデルの製作実験とより効率良く推力を発生出来るラジアルリング型磁石を用いたモデルを検討し、本投稿で提案したモデルと比較・評価する予定である。

文献

- (1)大島徹, 鳥海清司, その他:“協調制御モデルに基づく実効筋力評価(FEMS) Programとその応用”, 精密工学会第1回Workshop(2005)
- (2)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[文献(1), (2)]
- URL: <http://www.air-dawn.net/modules/xfsection/article.php?articleid=6>
- (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)