



Title	2自由度電磁アクチュエータに関する研究
Author(s)	堺谷, 洋
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61732
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

2 自由度電磁アクチュエータに関する研究

堺谷 洋

2017 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻

概要

本論文は、1 台で 2 軸周りの回転運動が可能な 2 自由度アクチュエータを提案する。本アクチュエータは従来の制御手法、制御装置を利用可能であり、フラットな電流トルク特性を有する。

第 1 章では、研究背景について述べる。現在多くの研究開発、産業応用が進められているロボットについて紹介し、それらに用いられている要素技術について述べる。中でもアクチュエータは力学的運動を出力する重要な要素であり、電磁アクチュエータが頻繁に使用されている。しかしながら従来の電磁モータを用いて、多自由度システムを構成する場合、アクチュエータ数増加に起因する問題が生じる。これらの課題を解決するために開発されている、多自由度アクチュエータを紹介し、これらのアクチュエータの実用化のための課題を明らかにする。本論文では具体的に、

複雑な電流値演算、トルク発生可能領域の不均一性、制御装置大型化といった問題に焦点を当てて、従来の制御手法、制御装置を利用可能で、フラットな電流トルク特性を有する 2 自由度アクチュエータを提案する。

第 2 章では、2 自由度ガイド型電磁アクチュエータを提案する。本アクチュエータは、モータと同様の磁気回路を有するアクチュエータを直交配置し、それらの可動子の出力をガイド機構によって合成し、2 自由度出力を得る構造を有する。アクチュエータの構造と動作原理について明らかにし、シミュレーションと実機を用いた実験によって、提案アクチュエータの特性を確認した。シミュレーション結果では、アクチュエータの出力トルクにおいて電流トルクリップルは約 11%に収まっており、比較的フラットな電流トルク特性を有していることを確認した。また実機検証の結果からは、定常状態においては、0.5 度以内で位置決めが可能であり、従来のモータと同様の制御手法と制御装置を用いることができることを確認した。しかしながら、本アクチュエータは特異姿勢を有しており、使用する上で避ける必要がある。

第3章では、2自由度差動結合型アクチュエータを提案する。本アクチュエータは、先行研究で提案されていたモータと、自動車に搭載されているディファレンシャルギアを利用した2自由度機構を、磁氣的に置換しアクチュエータとして再構成したものである。提案アクチュエータの構造と動作原理について述べ、シミュレーションによって静トルク特性を確認した。全領域における静トルク特性解析により、電流トルクリップルが約18%に収まっており、フラットな電流トルク特性を有することを確認した。また、従来の制御手法を用いた制御回路を作成し、3相インバータ利用を前提とした動トルク特性解析を行った。単軸、両軸周りに駆動できることを確認し、従来の制御手法、制御装置が利用可能であることを確認した。最後に製作した実機を用いた実験を行った。静トルク特性検証実験では、公差を考慮することで、シミュレーション結果と実験結果の良好な一致を確認することができた。また、位置決め制御実験では、摩擦の影響により、追従性は低下したものの、シミュレーションと同様に良好な制御性を確認することができた。

第4章では、各章で得られた成果を要約した。

目次

第 1 章 緒論	- 1 -
1.1 ロボットの普及，産業用ロボットとサービスロボット	- 1 -
1.2 電磁モータと多自由度電磁アクチュエータ	- 5 -
1.3 電磁モータと多自由度電磁アクチュエータの比較	- 8 -
1.3.1 アクチュエータ数削減による質量軽減	- 10 -
1.3.2 回転軸一致による制御の高速化	- 12 -
1.3.3 ダイレクトな駆動の実現	- 14 -
1.4 多自由度球面電磁アクチュエータの先行研究	- 15 -
1.5 本研究の目的	- 18 -
1.5.1 先行研究の課題	- 18 -
1.5.2 研究方針	- 22 -
1.6 本論文の構成	- 24 -
第 2 章 2 自由度ガイド型電磁アクチュエータの提案	- 25 -
2.1 基本構造	- 25 -
2.2 動作原理	- 28 -
2.3 シミュレーションによる検証	- 31 -
2.3.1 静トルク特性解析	- 31 -
2.3.2 動作特性解析	- 33 -
2.4 実機による検証	- 35 -
2.4.1 可動子角度検出	- 35 -
2.4.2 フィードバック制御回路	- 35 -
2.4.3 動作特性実験（位置決め制御実験）	- 37 -
2.5 結言	- 39 -
第 3 章 2 自由度差動結合型電磁アクチュエータの提案	- 42 -
3.1 機械式差動結合機構について	- 42 -
3.2 基本構造と設計指針	- 46 -
3.2.1 基本構造	- 46 -

3.2.2 アクチュエータ設計指針	- 47 -
3.3 動作原理	- 50 -
3.3.1 単軸駆動	- 50 -
3.3.2 コイル位相の決定方法	- 51 -
3.4 シミュレーションによる検証	- 55 -
3.4.1 フィードバック制御回路	- 55 -
3.4.2 静トルク特性解析	- 55 -
3.4.3 動作特性解析	- 60 -
3.5 実機による検証	- 63 -
3.5.1 試作機構成	- 63 -
3.5.2 静トルク特性	- 65 -
3.5.3 動作特性実験（位置決め制御実験）	- 67 -
3.6 結言	- 72 -
第 4 章 結論	- 73 -
参考文献	- 75 -
謝辞	- 77 -
研究業績	- 78 -

第1章 緒論

本章では，現在普及する多自由度システムの一例として，産業用ロボットとサービスロボットに着目し，それらがどのような構成要素から成り立っているかを述べる．続いてそのうちの1つであるアクチュエータに着目し，使用されているアクチュエータの種類と，それぞれの得意とする分野について紹介する．次に電磁アクチュエータを用いて多自由度システムを構成する場合に現在どのような問題があるか，そして近年盛んに開発が進められている多自由度アクチュエータを用いた場合にどのようなメリットが存在するか述べる．次に多自由度電磁アクチュエータの先行研究事例と，それらのアクチュエータを実用化する場合についての課題について述べる．最後に本論文で提案する多自由度アクチュエータが，解決する課題について述べ，本論文の構成を述べる．

1.1 ロボットの普及，産業用ロボットとサービスロボット

近年，アクチュエータ，計算機，バッテリーの技術発展に伴い，多くの自由度を持った多自由度システムが，我々の生活の中で多く用いられるようになった．多自由度システムの一例として，ロボットを取り上げる．ロボットとは，人の代わりに作業を自律的に行う装置，機械の総称である．ロボットの歴史を Table 1.1^[1]に示す．1960年代に産業用ロボットが登場してから，工場内での単純作業や繰り返し作業は，ロボットが人間に代わって行うようになった．2016年現在では，これらの「産業用ロボット」以外に，「サービスロボット」という新たな種類のロボットの活用が進んでおり，我々人間の生活の中で，ロボットは急速にその存在感を増している（Fig. 1.1）．これら2種類のロボットは，人との距離によって区別されており^[2]，人と隔離された空間で用いられるロボットを産業用ロボット，人間と動作空間を共有するロボットをサービスロボットと呼称している．

産業用ロボットの使用空間が工場内に限定されていたのに対して，サービスロボットの

使用分野は、清掃[3]、接客[4]、福祉[5]、医療[6]、警備[7]などと多岐にわたる[8]。またこれらの種類のロボット以外にも、災害救助用ロボット、軍事用ロボットなど様々なロボットが開発されている。

Table 1.1 History of robot development

年	
1954	米国において「教示」と「再生」による機械の特許が取得
1962	米ユニメーションが産業用ロボットを販売
1969	川崎航空機工業がユニメーションと組み、国内初の産業用ロボットを開発
1973	スウェーデンのアセアが電動多関節ロボットを開発
1981	米国でスペースシャトルが打ち上げられ、様々なロボットが開発
1999	ソニーがペット型ロボットを発売
2000	ホンダの人型ロボット「ASIMO」が誕生
2005	安川電機が産業用双腕ロボットを世界で初めて製品化
2014	サイバーダインが東証マザーズに上場
2015	ソフトバンクグループが「Pepper」を発売

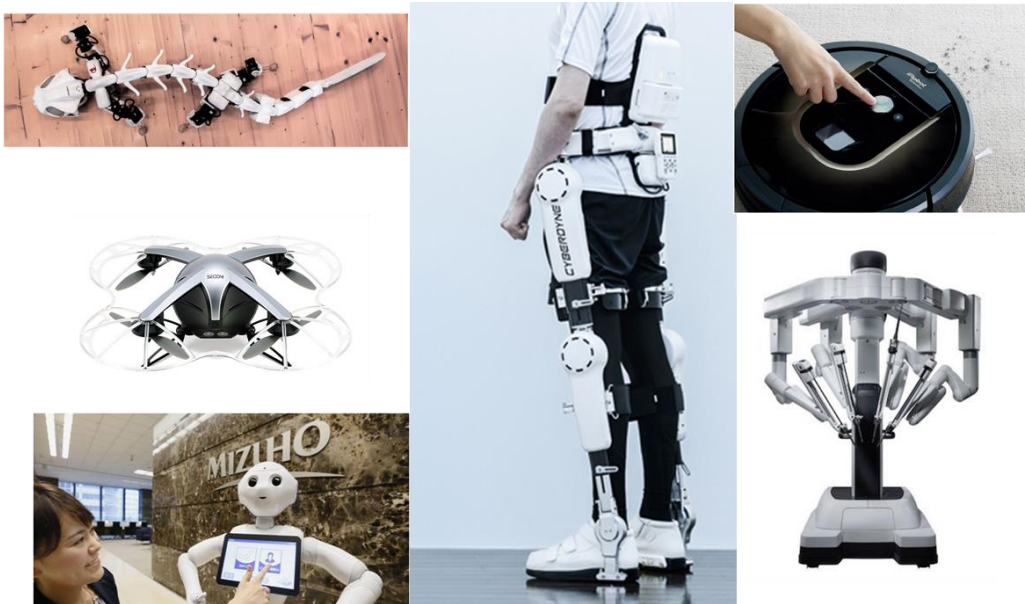


Fig. 1.1 Service robots (2016)

Table 1.2 Components of robot

構成要素	役割
アクチュエータ	電源，空気圧源，油圧源などより動力を得て，ロボットに動きを与えるモータやシリンダのような装置
センサ	ロボット内部外部の物理情報や現象をとらえて，電気信号に変換する装置
コンピュータ	ロボット各所に設置されたセンサや，外部からの情報を統合して処理する装置
エネルギー源	バッテリーのようなエネルギー蓄積要素．非接地型ロボットの動力
通信装置	遠隔操作によってロボットに情報を伝達，ロボット間でコミュニケーションを行うための装置

ロボットはハードウェアとソフトウェアの両方で成り立っているが，ここではハードウェアの進化に着目する．ロボットは一般的に Table 1.2 に示すような要素技術から成り立っている^[9]．高効率で大出力が可能なアクチュエータ，目や耳の役割を担うセンサや好感度カメラ，膨大なデータを短時間で処理できるコンピュータなど，これらの要素技術の発展し，ロボットの適用範囲は広がった．更なる要素技術の発展により，ロボットの活用範囲が広がることは想像に難くない．

これらの要素部品の中でもアクチュエータは，エネルギーを実際の運動へ変換する重要な部品の 1 つである．アクチュエータは，その使用する動力源によって様々な形式が存在する．動力源の扱いやすさ，発生可能推力，発生可能変位などを考慮すると，現在のロボットにおいて主に使用されているのは，次の 3 種類のアクチュエータである．

- 油圧アクチュエータ・・・作動流体として油を用いており，油の圧縮力を機械的エネルギーへと変換するアクチュエータである．圧縮力を得るためのコンプレッサが必要となるため，システム全体でみると大型化する傾向にあるが，高い力密度を有しているため，建設機械などでよく用いられている．油圧アクチュエータを使用したヒューマノイドロボットとしては，BostonDynamics 社の Atlas^[10] (Fig. 1.2) 等がある．これらのロボットは軍事，災害救助用に開発されており，大きな推力が必要とされる用途に，油圧アクチュエータは適用されている．

● 空気圧アクチュエータ・・・差動流体として空気を用いたアクチュエータである．動作原理は油圧アクチュエータと同様であるが，圧縮空気を用いていることから，柔軟な動作を行うことが可能である．油圧アクチュエータと同様にコンプレッサが必要となるため，設置型のロボットに用いられている傾向がある．空気圧アクチュエータを用いたロボットとして，大阪大学の石黒らによって開発されているジェミノイド^[11] (Fig. 1.3)，大阪大学の細田らによって開発されている空脚 K^[12] などがある．



Fig. 1.2 Atlas (Boston Dynamics)



Fig. 1.3 Geminoids (Osaka University)



Fig. 1.4 ASIMO (Honda)

● 電磁アクチュエータ・・・永久磁石，電磁石などの磁界エネルギーを用いたアクチュエータである．代表的な電磁アクチュエータとして，回転モータと直動モータがある．油圧，空気圧アクチュエータとは異なり，コンプレッサを必要とせずコンパクトなシステムを構成できるため，非接地型のロボットで積極的に用いられている．また，回転モータは減速機を用いれば容易にトルク密度を上昇できることから，産業用ロボットやホンダ車の ASIMO^[13] (Fig. 1.4) において回転モータが用いられている．

このようにロボットには3種類のアクチュエータが用いられてきたが，電磁アクチュエータの使用例は圧倒的に多い．Fig. 1.1 中のサービスロボットにおいても，須らく電磁モータが搭載されている．これは電磁モータが減速機（ギア）を用いることで質量当たりのトルク密度を向上できること，バッテリーというクリーンなエネルギー源を使えること，コンプレッサなどの大型システムが不要であるためである．

1.2 電磁モータと多自由度電磁アクチュエータ

本節では，電磁アクチュエータの種類について述べる．電磁アクチュエータの代表としてモータと，現在研究が進められている多自由度電磁アクチュエータについて述べる．

電磁アクチュエータは，可動子が1軸周りの回転運動を行う電磁モータ，可動子が直線運動を行うリニアモータ，可動子の2軸以上の回転または直線運動を行う多自由度電磁アクチュエータに大別される．以下では，電磁モータと，多自由度電磁アクチュエータにつ

いて述べる．

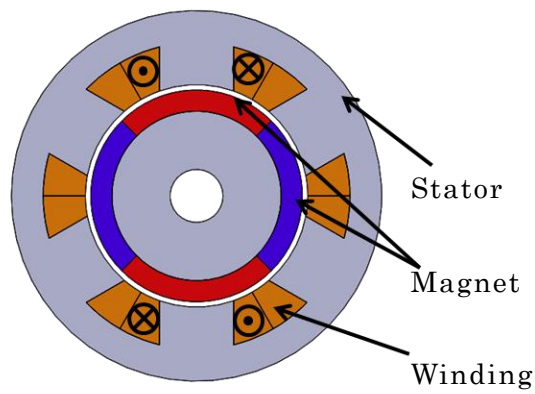
● 電磁モータ^[14]

電磁モータは，電気エネルギーを力学的エネルギーに変換するアクチュエータである．モータは永久磁石の有無，巻き線の設置場所，使用する磁界によって，様々な種類に分類できるが，ここでは代表的な同期モータ，誘導モータ，リラクタンスモータを Fig. 1.5 に示し，それぞれについて述べる．

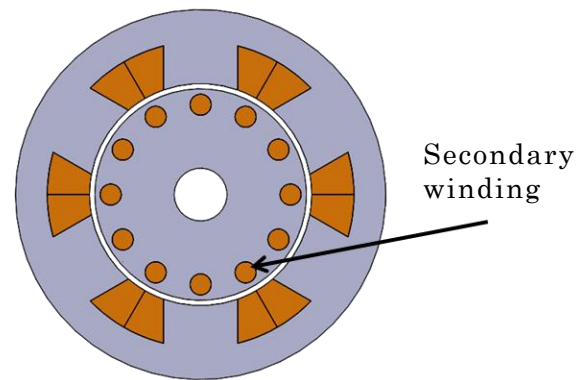
永久磁石型同期モータを Fig. 1.5(a)に示す．可動子側に永久磁石を有し，固定子コイルで可動子の生成する磁界に同期する磁界を生成することによって回転力を得る．可動子鉄心の形状によって，表面磁石型や埋め込み磁石型などが存在する．

誘導モータを Fig. 1.5(b)に示す．固定子側に一次コイル，可動子側に二次コイルを有しており，1次コイルで生成する移動磁界により，二次コイルに逆起電力が生じる．短絡している二次コイル中に渦電流が発生し，可動子は回転力を得る．永久磁石型同期モータが移動磁界と同速度で回転するのに対して，誘導モータの可動子回転数は，移動磁界よりも遅くなる（すべり）．

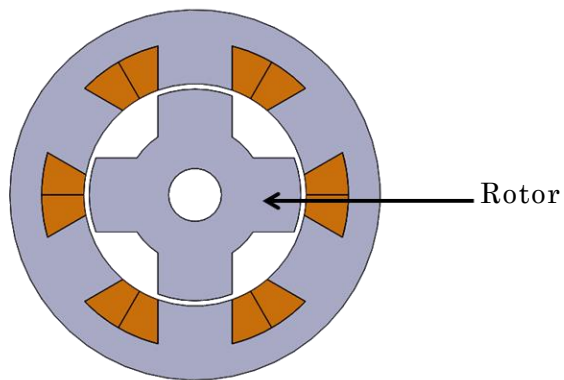
リラクタンスモータを Fig. 1.5(c)に示す．固定子磁性体，固定子コイル，可動子磁性体のみで構成されており，可動子表面の凸極に由来する磁気抵抗の変化を利用して回転力をえる．固定子にのみコイルを有し，可動子の磁気抵抗の変化を利用して回転力を得るモータである．簡単かつ堅牢な構造を実現できるが，大きなトルクリップルを有する．



(a) Permanent magnet motor



(b) Induction motor



(c) Variable reluctance motor

Fig. 1.5 1-DoF Electromagnetic motor

● 多自由度電磁アクチュエータ

多自由度電磁アクチュエータとは，駆動源として電磁エネルギーを用い，可動子が1軸以上の回転または並進運動を出力できるアクチュエータの総称である．1990年代に登場してから^[15]，多自由度電磁アクチュエータの研究は2000年頃から世界中で行われており，その歴史は比較的浅い．またモータと同様に，多自由度同期アクチュエータ，多自由度誘導アクチュエータ，多自由度リラクタンسアクチュエータなどの種類がある．これらはそれぞれ1自由度の同期モータ，誘導モータ，リラクタンスマータの原理を，多自由度に拡張したものと考えればよい．

多自由度電磁アクチュエータは，人間の上腕のような駆動ができる多自由度システムに適用するために開発されている例が多い．現在では，そのようなシステムは電磁モータと減速機，リンク機構で構成されている．次節では，多自由度システムを構成する場合に，多自由度電磁アクチュエータを用いた場合，電磁モータを使用する場合と比較して，どのようなメリットがあるかを述べる．

1.3 電磁モータと多自由度電磁アクチュエータの比較

人間の上腕を，前述の2種類のアクチュエータを用いて，多自由度システム（人間の上腕を模したシステム）を構成した場合，Fig. 1.6に示すような構造となる．多自由度アクチュエータを用いて，多自由度システムを構成した場合，Table 1.3に示すような利点と欠点がある．以下ではこれらの利点に関して詳細に述べる．

Table 1.3 Merits and demerits of a motor and multi-DoF actuator

	1 自由度モータ	多自由度モータ
利点	・ 高トルク密度 ・ 減速機による姿勢保持性の向上	・ アクチュエータ数削減による質量軽減 ・ 回転軸一致による制御の高速化 ・ ダイレクトな駆動の実現
欠点	・ 部品点数増大 ・ 特異点有 ・ バックラッシュ ・ 低バックドライバビリティ	・ 低トルク密度 ・ 複雑な電流値演算 ・ 制御装置大型化 ・ 低トルク密度

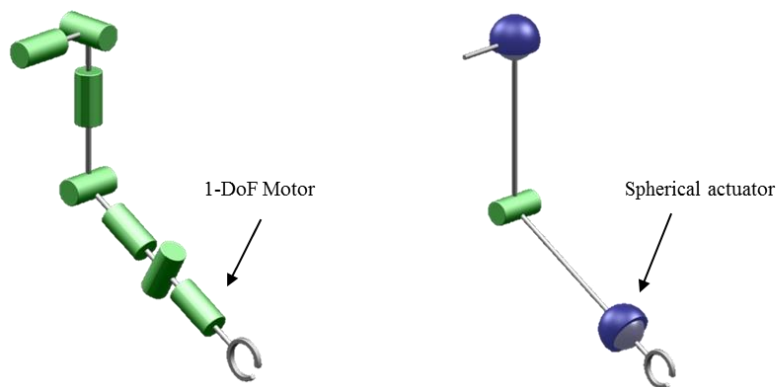


Fig. 1.6 Human upper limb (1-DoF motor and spherical actuator)

1.3.1 アクチュエータ数削減による質量軽減

人間の上腕を模した 7 自由度システムを，モータで構成する場合と多自由度アクチュエータで構成する場合の 2 通りを比較し，質量低減効果を検証する^[16]．電磁モータを用いた場合，7 個のモータを直列に接続する．一方多自由度アクチュエータを用いる場合には，肩関節と手首関節に 3 自由度球面電磁アクチュエータを搭載し，肘関節に 1 自由度モータを搭載するとする．

ここでは比較の条件として，以下の項目を 2 種類のアクチュエータを用いる場合で同一としている．

- ・エンドエフェクタの可搬物重量を $1[\text{kg}]$ ，および操作加速度 $10[\text{m/s}^2]$ とする．また操作角加速度については規定しない．

- ・リンクの腕の長さの合計は， $0.6[\text{m}]$ で統一する．すなわち，2 通りのシステム構成において，リンク重量軽減効果などは，等しく享受することができる．モータを用いた場合は $0.1[\text{m}]$ のリンクを 6 本使用し，多自由度アクチュエータを用いた場合には， $0.3[\text{m}]$ のリンクを 2 本使用する．

(a) モータを用いた場合

モータのトルク密度を $1[\text{Nm/kg}]$ とした場合に，それぞれのモータに必要なトルクから，質量を計算する．まず一番手先のモータは，可搬物は球であり慣性モーメントはどの軸周りでも一定であるため，トルクは必要ない（必要角加速度は定義しないものとする）．最も手先のモータの質量を ΔM とする．

続いて手先より 2 番目に存在するモータの質量を計算する．2 番目に存在するモータにとって，一番トルクが必要な姿勢とは 1 番目のモータとエンドエフェクタが水平に並んでいる場合である．この姿勢において，可搬物を $10[\text{m/s}^2]$ 以上で動かすために必要なトルクは $2 + \Delta M[\text{kg}]$ となる．

同様に 3 番目から 7 番目までのモータにおいて，最も大きなトルクが発生する場合を想定して計算したトルクと，それによって決定されるモータの質量を Table 1.4 に示す．1 番目モータの質量に依存して，各モータで必要となるトルクと質量は変化するが，1 番目のモータ質量が無視できる場合には，要求を満たすためのシステム構成では，モータだけ

で 124[kg]になることがわかる．

(b) 多自由度アクチュエータを用いた場合

続いて多自由度アクチュエータを用いて，多自由度システムを構成した場合について考える．多自由度アクチュエータの最小トルク密度を $x[\text{Nm/kg}]$ とした場合に，最もトルクが必要な姿勢は，エンドエフェクタが水平に並んだ場合である．この時に必要なトルクは 1Nm であるため，手首に近い多自由度アクチュエータの質量は $1/x[\text{kg}]$ となる．続いて肘関節に搭載されているモータでは，手首の多自由度アクチュエータおよび，エンドエフェクタが水平に並んだ場合に最もトルクを必要とする．この時に必要なトルクは $3/x+4[\text{Nm}]$ であり，モータの質量は $3/x+4[\text{kg}]$ となる．最後に肩関節の多自由度アクチュエータにおいて，最もトルクが必要となるのは，肘関節モータ以降が地面と垂直に並んだ場合である．この時に必要な最大トルクは $15/x+19[\text{Nm}]$ であり，質量は $15/x^2+19/x[\text{kg}]$ となる．各関節に必要なトルクと，アクチュエータ質量をまとめたものを Table 1.5 に示す．

Table 1.4 Output torque and mass (with 1-DoF motor)

	Torque (Nm)	Mass (kg)
Shoulder1	$50+30\Delta M$	$50+30\Delta M$
Shoulder2	$50+30\Delta M$	$50+30\Delta M$
Shoulder3	$10+6\Delta M$	$10+6\Delta M$
Elbow	$10+6\Delta M$	$10+6\Delta M$
Wrist1	$2+\Delta M$	$2+\Delta M$
Wrist2	$2+\Delta M$	$2+\Delta M$
Wrist3	ΔM	ΔM
Sum	$124+75\Delta M$	$124+75\Delta M$

Table 1.5 Output torque and mass (with M-DoF motor)

	Torque (Nm)	Mass (kg)
Shoulder	1	$1/x$
Elbow	$3/x+4$	$3/x+4$
Wrist	$15/x+19$	$15/(x^2)+19/x$
Sum	$18/x+24$	$15/(x^2)+23/x+4$

以上により，人間の上腕を模した7自由度システムにおいて，一自由度の電磁アクチュエータを用いた場合の全モータの質量の合計は $124[\text{kg}]$ となり，多自由度アクチュエータを用いた場合には， $15/x^2+23/x+4[\text{kg}]$ となることが計算できた．仮に多自由度アクチュエータのトルク密度が，モータの半分程度の $0.46[\text{Nm/kg}]$ であっても，2種類のシステムの質量は同程度となる．また多自由度アクチュエータのトルク密度がモータと同等の場合，多自由度アクチュエータを用いた場合の質量は 42kg となり，電磁モータを用いた場合と比較して大幅な質量削減を達成できることがわかる．

1.3.2 回転軸一致による制御の高速化

逆運動学問題の解決（多自由度ロボットにおいてエンドエフェクタの位置と姿勢が与えられた場合の各モータ回転角度を導出）はロボットを駆動，制御させる上で必要不可欠である．この逆運動学問題を解くために，1自由度モータを用いたロボットでは回転軸を一致させるなどの工夫がなされている．これは，6自由度マニピュレータの場合，手首関節が球対偶機構を持つ場合に，解析解が求まることが知られているためである^[17]．回転軸が一致している3自由度球面アクチュエータや，回転軸が直交する2自由度アクチュエータなどは，あらかじめ回転軸が一致しており，また構造的に一致させやすいため，逆運動学を高速に解け制御性を向上させることができる．

例として Fig. 1.6 に示した多自由度システムにおいて，手先の位置と姿勢が与えられた場合，肘関節角度を幾何学的に求める．

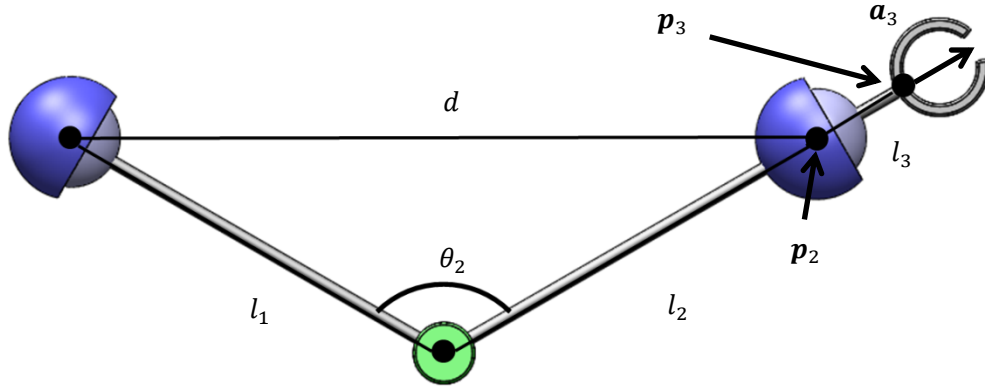


Fig. 1.7 Calculation of elbow angle

上腕システムの模式図を Fig. 1.7 に示す．エンドエフェクタの座標 p_3 と姿勢 a_3 および，手首からエンドエフェクタまでの距離 l_3 を用いて，手首関節座標 p_2 を求める．

$$p_2 = p_3 - l_3 a_3 \quad (1.1)$$

手首関節座標と肩関節の座標からそれらの距離を求める．ただし肩関節は原点にあるとする．

$$d = |p_2| \quad (1.2)$$

肩関節と肘関節の距離，肘関節と手首関節の距離は既知であるため，先ほど求めた手首関節と肩関節の距離を用いて，余弦定理を用いて肘関節角度を求める．

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left((d^2 - l_1^2 - l_2^2) / 2l_1 l_2 \right) \quad (1.3)$$

以上，エンドエフェクタの座標と姿勢が決定されると，単純な幾何学的な拘束条件から，肘関節のモータ角度を導出することができた．ここでは省略するが，あと 1 つ拘束を加えるだけで肩関節，手首関節に位置する球面アクチュエータの姿勢を，同じく幾何学的に導出することが可能である．

1 自由度モータを用いたシステムで，エンドエフェクタの座標と姿勢を決定したとしても，モータ角度を決めることはできず，また幾何学的に解けることもない．このように球対偶を関節に用いることは制御を高速化できるといった意味でも非常に効果が高い．

1.3.3 ダイレクトな駆動の実現

従来の一自由度モータを用いる場合，モータだけではトルク不足であるため，ギアにより速度を落としてトルクを上げることが一般的である．減速機を搭載することにより，非通電時においてもエンドエフェクタの姿勢保持が可能といったメリットが生じる．しかしながら，人と動作空間を共有するロボットは予期しない突然の外力に対しても柔軟に反応し，人間，および自身の内部機構を保護する必要がある．このようなロボットにとって，バックドライバビリティの低下は大きな問題である．エンドエフェクタに力センサを搭載し，システム自体のコンプライアンスを制御する研究も見られるが，部品点数の増加，システム構造の複雑化を招く．また減速機を搭載することで，摺動部増加による摩擦損失の増加，および出力の低下などといった問題が生じる．

1 自由度モータを用いた移動ロボットにおいて，Fig. 1.8 に示すような減速機を用いないシステム例が考案されている [18][19]．本ロボットは 4 足の足を有し，各脚部に 2 個のモータが接続されている．バックドライバビリティを有するため，外力によって容易に逆駆動可能であり，衝撃力が加わった場合に破損の心配をする必要がない．また外力をモータに発生する逆起電力などで検知できるために，足裏に力センサを用いることなく，着地の検知も可能となっている．更にはギアに由来する損失が発生しないため，モータを用いる場合と比較して，最大出力は大きくなる．



Fig. 1.8 Minitaur (Gohst Robotics)

1.4 多自由度球面電磁アクチュエータの先行研究

本節では,世界中で開発されている多自由度球面電磁アクチュエータについて紹介する. これらのサイズ, トルク, 適用先について紹介する.

● シェフフィールド大学

シェフフィールド大学の J.Wang らによって開発された 3 自由度球面電磁同期アクチュエータを Fig. 1.9 に示す[20]. 本アクチュエータは小型ロボットへの適用を目的としており, 外径は 120mm, 最大トルクは 0.4Nm, 可動範囲は傾き方向に 45 度, 回転方向に 360 度回転することが可能である. 可動子は 4 極の永久磁石, 固定子は 8 個の空芯コイルを有し, 4 相の電流制御によって駆動する. 空芯コイルを有しているため, コギングトルクが発生せず, 制御性が向上する反面, コイルが生成する磁束は鉄芯コイルに比べて小さくなるため, 出力トルクは低い.

可動子の位置センシングは, 固定子内部によって設置されたホール素子とイメージセンサの 2 種類の情報を用いて行っている. ホール素子によって検出する可動子の移動とコイルによる磁界変化と, イメージセンサによって検出する可動子の色情報を用いて (可動子は北半球が白く, 南半球が黒く塗られている), 可動子位置を検出している.

● アーヘン工科大学

アーヘン工科大学の K.Kahlen らによって開発された 3 自由度球面電磁同期アクチュエータを Fig. 1.10 に示す[21]. 本アクチュエータは大型工作機械に適用するために開発され, 可動子の外径だけで 400mm と大型であり, 傾き方向に 60 度, 回転方向に 360 度回転することが可能である. また球面アクチュエータはモータと異なり, 無数の回転軸を有し, 無数の方向へトルクを出力する必要があるが, 本アクチュエータは任意の方向に最低でも 40Nm と, 比較的大きなトルクが発生させることが可能である. 可動子の永久磁石は 96 極, 固定子には 112 個の鉄芯コイルを有している.

可動子の位置センシングは 3 つのロータリエンコーダを用いている. アクチュエータの出力にガイドを設置し, 可動子の移動を 3 軸周りの回転に分解することで, 3 軸周りの回転を検出する. この方法ではモータと同様の分解能で高精度の位置検出が可能であるが, アクチュエータ以外に 3 軸の回転に分解する機構を有する必要があるが, システムとして大

型化してしまう。

● ジョージア工科大学

ジョージア工科大学の K. M. Lee らによって開発された 3 自由度球面電磁同期アクチュエータを Fig. 1.11 に示す[22]。本アクチュエータは、プロペラや船舶用スクリューに適用するために開発され、可動子外径は 275mm、最大トルクは 4Nm、傾き方向に 11 度、回転方向に 360 度回転可能である。船舶用のスクリューなどに用いるということで、出力軸を一定速度で回転させつつ、任意の軸周りに回転させることが可能である。

適用先がヒューマノイドロボットではなく、プロペラや船舶用スクリューであるため、可動子の位置決めを検証は行われていない。代わりにセンサ情報を用いずに駆動できるオープンループ制御手法が提案されている。

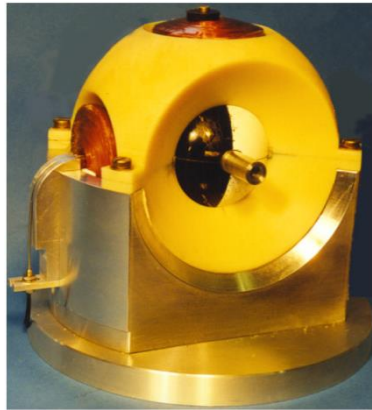


Fig. 1.9 3-DoF spherical synchronous actuator (Sheffield university)



Fig. 1.10 3-DoF spherical synchronous actuator (Aachen institute of technology)



Fig. 1.11 3-DoF spherical synchronous actuator (Georgia institute of technology)

● 東北学院大学

東北学院大学の熊谷らによって開発された 3 自由度球面電磁誘導アクチュエータを Fig. 1.12 に示す^[23]。本アクチュエータは、一脚ロボットの駆動輪に適用するために開発され、可動子球外径は 246mm、最大トルクは 4Nm で、可動子球表面が出力軸となることから可動範囲に制限はなく、あらゆる方向に無限回転することが可能となっている。可動子表面は導体で形成され、固定子には移動磁界を作り出すための 4 つの電機子を有している。

固定子の電機子はそれぞれイメージセンサを有しており、それらの情報から可動子の位置情報を算出する。イメージセンサは累積誤差を発生させるが、誘導モータでは絶対位置情報を必要とせず、固定子と可動子の相対的な速度情報があれば制御できるため、イメージセンサに起因する位置の累積誤差は問題とはならない。

● アイントホーフェン大学

アイントホーフェン大学の B. van Ninhuijs らによって開発された 3 自由度球面電磁同期アクチュエータを Fig. 1.13 に示す^[24]。本アクチュエータは車いすなどに設置する腕支援装置 (Arm support system) 用に設計され、可動子外径が 128mm、コイル外径が 150mm であり、X, Y, Z 軸すべての軸周りに ± 45 度回転することが可能である。本アクチュエータはシミュレーションで検討中であり、試作機の報告はない。

以上みてきたように、現在まで多くの多自由度球面電磁同期アクチュエータが開発されてきた。しかしながら、そのいずれも実用化には至っていない。次節では実用化のための課題を次節で示す。

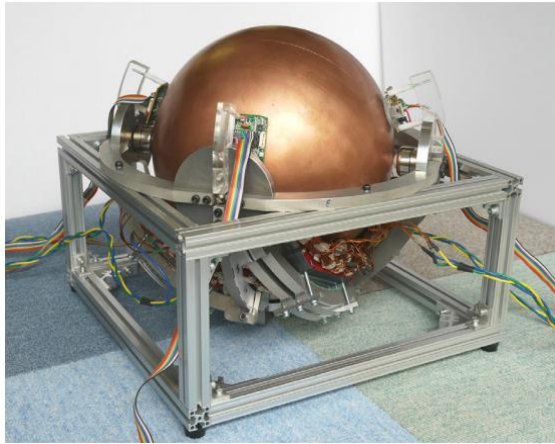


Fig. 1.12 3-DoF spherical induction actuator (Tohoku gakuin university)

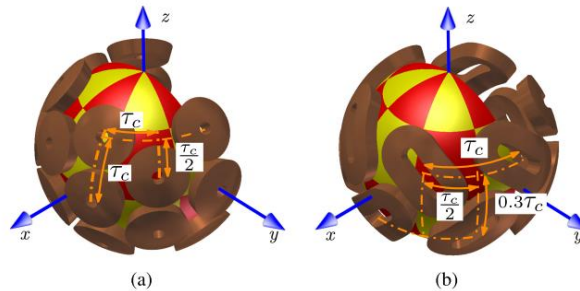


Fig. 1.13 3-DoF spherical synchronous actuator (Eindhoven university)

1.5 本研究の目的

1.5.1 先行研究の課題

前章で述べたように，多自由度電磁アクチュエータを，多自由度システムに適用することによって様々な利点がある．そのため多自由度球面電磁アクチュエータの研究は 2000 年ごろから盛んに行われているが，2016 年現在未だに多自由度アクチュエータを製品に応用した事例は少ない．多自由度アクチュエータの実用化を阻む要因として以下の 3 つがある．

- 複雑な電流値演算

多自由度電磁アクチュエータは，多くのコイルを有し出力できる自由度に対して，制御

できる電流相数が多く、冗長性を有している．現在までに，複数ある磁極をグループ毎に分類して電流相数を見かけ上少なくする方法^[21]，発生すべきトルクの方角と各磁極の位置から重みづけを行い，電流を決定する方法^[25]，事前にアクチュエータのトルクマッピングを作成し，トルクモデルから一般化逆行列^[26]を用いる方法など，様々な手法が提案されている．中でもトルクモデルから一般化逆行列を用いる方法は，マッピングデータさえ作成すれば，任意のトルクを出力する電流値を求められること，得られる解の中にノルム最小解（電流値の二乗和が最小となる）があること，といった理由から多くの研究機関で用いられている．

しかしながらトルク行列を用いて一般化逆行列計算を伴うため，制御すべき電流相が多い場合には大規模な演算が必要，実現姿勢が無数に存在する球面アクチュエータにおいてはマッピングすべきデータ点数が膨大となるといった問題を抱えている．

● 制御装置大型化

電子デバイスの技術が発達し，技術が安価になったことにより，3相インバータの普及が進んだ．そのため，電磁モータは3相インバータで駆動されることが多い^[27]．ここでインバータとはロボットに搭載されているバッテリーの直流電圧を，モータで使えるように交流電圧に変換する電力変換器の1種である．

先行研究であげた多自由度アクチュエータでは，電力変換器として複数の単相インバータが用いられている．模式図を Fig. 1.14 に示す．バッテリーなどの直流電源に対して4つのスイッチング素子が接続されており（IGBT など），これらのスイッチを切り替えていくことによって接続された負荷に交流電圧を生成する．

前述の球面電磁アクチュエータは，コイル相数でいうと4相から96相まで様々なアクチュエータが開発されてきた．電流相数の多いアクチュエータほど，電流を入力した時のトルクが大きくなり，特異点（電流をいくら入力してもトルクが発生しない姿勢）が回避しやすくなるといった利点を有する反面，電流相数の増加に伴い，制御装置の大型化を招くといったデメリットを有する．

● トルク発生可能領域の不均一性

一般の電磁モータ（１自由度アクチュエータ）は，駆動できる自由度が少なく，全駆動範囲を評価することが可能である．対して多自由度電磁アクチュエータは，駆動姿勢，出力できるトルク方向が無数に存在する．したがって，全領域を評価しようとするとき，評価すべき可動子姿勢，トルクの発生方向は膨大である．

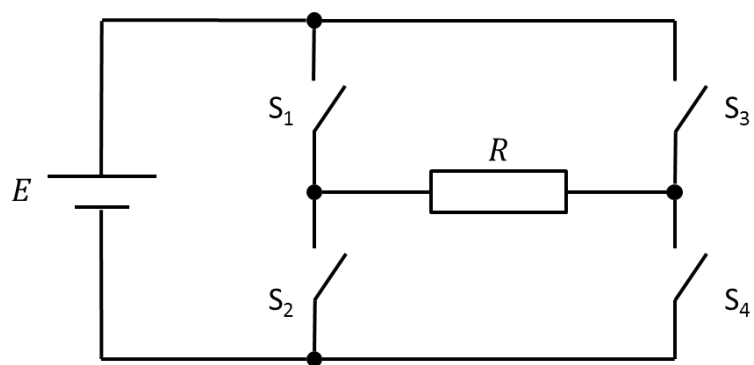


Fig. 1.14 Single phase inverter circuit (Full bridge inverter)

この課題を解決するために，大阪大学の西浦らは，可動範囲全領域の特性を評価できるトルク領域法を提案した^[28]．本手法は，多自由度球面電磁同期アクチュエータのトルク発生式が各電流値の線形結合で表されることと，主成分分析を組み合わせた手法である．本手法を用いることにより，一目で多自由度球面電磁同期アクチュエータのトルクを評価することができる（3自由度の評価を行う場合には，図だけで評価できない）．

この評価手法を用いて，Fig. 1.15 に示す 2 自由度球面電磁同期アクチュエータ^[29]のトルク特性を検証した．結果を Fig. 1.16 に示す．対象アクチュエータの可動範囲である ± 35 度の範囲を評価している．トルク定数行列を主成分分析し，各姿勢における最小トルク値を描画している．赤色の箇所は特性が良好な姿勢，青色の箇所は特性の劣悪な姿勢である．全姿勢において最小発生可能トルクはおよそ 0.5Nm （平均電流トルクの 50%程度）のばらつきが存在する．このように，多自由度アクチュエータは姿勢によって特性が大きく異なり，実用化を考えると好ましくない．アプリケーションにもよるが，全可動範囲で一定の特性を有することが好ましい．

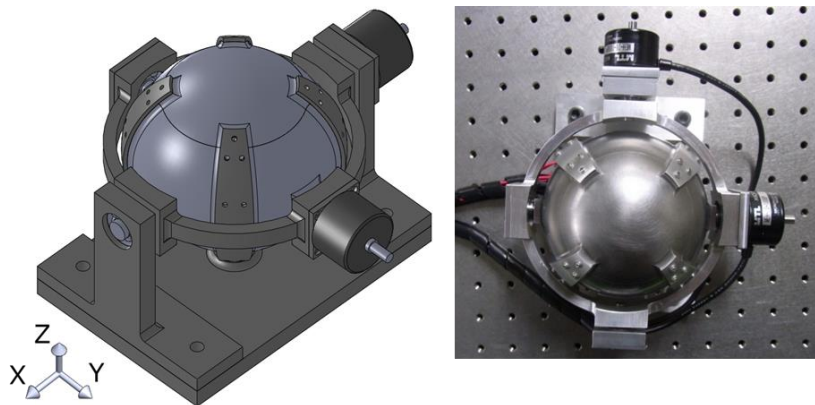


Fig. 1.15 2-DoF spherical actuator (Osaka university)

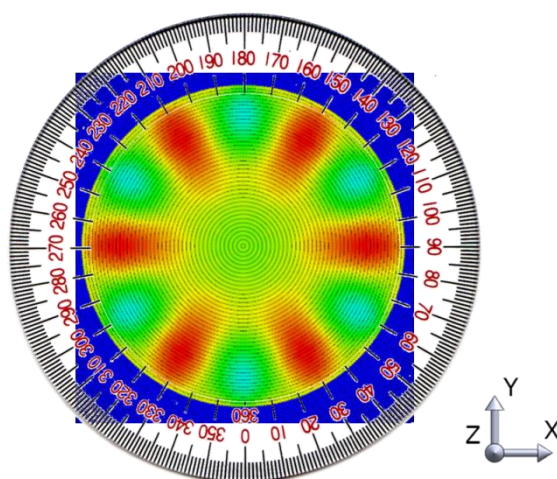


Fig. 1.16 Evaluation result (2-DoF spherical actuator)

1.5.2 研究方針

本研究では前述の課題を解決できる二自由度アクチュエータを提案する．具体的には以下の3つの特徴を有するアクチュエータである．

- 従来の制御手法が利用可能

同期モータは通常，可動子の回転角度と電流値を計測し，それら2相に座標変換して制御するベクトル制御が用いられている．この従来から用いられている制御手法を多自由度アクチュエータにおいても適用すれば，複雑な電流値演算が不要で，容易に電流値を決定することが可能となる．

- 従来の制御装置を利用可能

従来の，交流磁界（3相交流）を用いる電磁モータで用いられる3相インバータの模式図を Fig. 1.17 に示す．基本的な構成は前述の単相インバータと同様であるが，スイッチング素子の数が異なる．図に示すような構造にすることによって，スイッチング素子の数は，単相インバータを3つ用いた場合の半分になる．

多自由度アクチュエータにおいて，3相インバータを利用することは，原理的に素子の数を少なくできるために装置の小型化につながる．

- 電流トルク特性がフラット

アクチュエータの姿勢によって電流によって生じる電流トルクが変動しないアクチュエータを提案する．これは，アクチュエータの姿勢によってトルクを発生できない姿勢（特異姿勢）がないことを意味し，任意の姿勢で任意の方向にアクチュエータは可動できる．

また最低電流トルクと最大電流トルクに大きな差が生じず，適用が容易なアクチュエータとなり得る．先行研究の 2 自由度アクチュエータと比較し，最大電流トルクが平均電流トルクの 50%以内に収まることを目標とする．

また提案するアクチュエータの自由度は 2 自由度であり，2 つのモータの役割を果たす．これらはロボットの眼球や，照明の駆動装置に相当する．更に，1.3.1 で述べたように，手首の回転は比較的小さいトルクで済むため，1 自由度モータと組み合わせて手首関節を構成することも可能である．この時，2 自由度アクチュエータの回転軸は直交しており，手先にモータを載せるだけで手首関節の 3 つの回転軸を直交させることが可能なため，3 自由度アクチュエータと同様の効果を得ることが可能である．

また以下で提案する 2 種類のアクチュエータは，特定の用途を想定して設計していない．多自由度アクチュエータの 1 台で多自由度駆動が得られるという特徴を有しつつ，従来の制御手法，制御機器が使用可能で電流トルク特性がフラットにできるアクチュエータの構造提案である．本アクチュエータは，従来の制御手法，機器を使用可能で，ダイレクトな駆動を実現できるため，トルクが必要とされない，ロボットの眼球などの用途にとって最適なアプリケーションとなり得る．

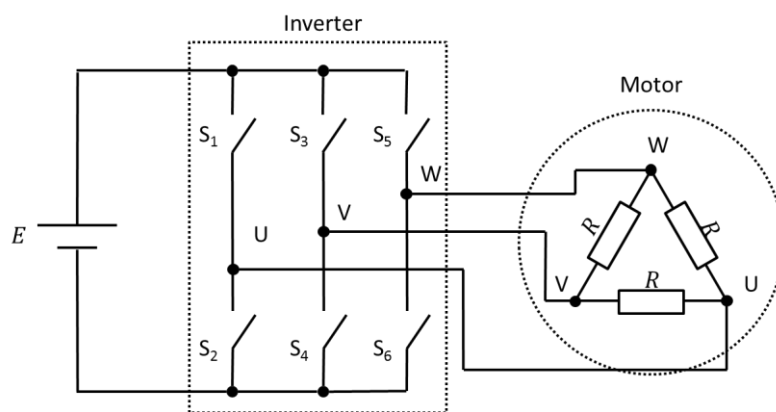


Fig. 1.17 3-phase inverter circuit

1.6 本論文の構成

以上，ロボットが普及する現状を紹介し，更なる発展のためにはロボット要素技術の発展が不可欠であることを述べた．さらにアクチュエータについて紹介し，1自由度モータを用いたシステムの問題と，それらを多自由度アクチュエータで置換した時に得られるメリットについて述べた．続いて多自由度球面電磁アクチュエータの先行研究事例を紹介した．現在までに様々な研究機関から，球面電磁アクチュエータが開発されてきたものの，未だに実用化には至っていない．その理由として，従来の多自由度アクチュエータは，複雑な電流値演算が必要，制御装置が大型，トルク発生可能領域に不均一性を有する，といったことがあげられる．これら3つの課題を解決することができれば，球面電磁アクチュエータの実用化に大きく前進することが予想される．そこで本研究では，従来の制御手法が利用可能，従来の制御装置を利用可能，電流トルク特性がフラットという特徴を有する2自由度アクチュエータを開発することを目的とする．

本論文では，以下の2種類の2自由度球面電磁アクチュエータの提案を行う．2種類のアクチュエータともに，従来のモータの制御手法，制御装置を利用可能で，比較的フラットな電流トルク特性を有している．

まず，2自由度ガイド型球面電磁アクチュエータを提案する．2つの可動子を有しており，それらの可動子の動きを合成するガイド機構によって2自由度の出力が可能である．

本モデルは磁気回路が従来の3相同期モータとほぼ同様であり，従来の制御手法，制御機器を利用することができる．しかしながら，出力の合成にはジンバル機構を用いているため，本質的に特異姿勢が存在してしまう．

次に，2自由度差動結合型アクチュエータを提案する．本アクチュエータは，先行研究事例で存在する，機械式2自由度機構を磁氣的に再現したアクチュエータである．提案アクチュエータは，従来の3相同期モータと同様の磁気回路を有し，従来の制御手法，制御装置が利用可能であり，フラットな電流特性を有している．また2自由度ガイド型電磁アクチュエータと異なり，構造上の特異点が存在しない．

以下ではこれらのアクチュエータについて詳細に説明する．

第2章 2 自由度ガイド型電磁アクチュエータの提案

本章では，2 自由度ガイド型電磁アクチュエータを提案する．本アクチュエータの可動子は2 軸周りに回転でき，制御機器は従来の3 相インバータを使用することできる．磁気回路は3 相同期モータと同様であるため，制御もモータと同様に行える．基本構造と動作原理について述べ，三次元有限要素法を用いてアクチュエータのトルク特性を確認する．また試作機を用いた実機実験によって，提案アクチュエータを位置決め精度の点から評価する．

2.1 基本構造

提案するガイド型アクチュエータの基本モデルを Fig. 2.1 に示す．本アクチュエータは，固定子，X 軸可動子，Y 軸可動子，2 つの可動子をつなぐガイド機構から成り立っている．可動子を分離することで，各軸独立して制御することが可能になる．

可動子は，永久磁石とそれらを固定する2 つのバックヨーク，ヨーク同士を繋ぐシャフトから構成される．永久磁石は回転中心から 22.5 度おきに配置されており，Fig. 2.2 に示す方向にラジアル着磁されている．X 軸周りの可動子はヨークとシャフトをベアリングで接続し，Fig. 2.2 中右側に示すように Y 軸周りの自由度を持たせる．

Fig. 2.3 に Y 軸周り可動子の構造を示す．X 軸周りの可動子と同様，永久磁石，バックヨーク，シャフト，ガイドから構成される．しかし，Y 軸周りの可動子にはガイドが設けられてあり，このガイドの中を X 軸周り可動子から出たシャフトが通ることで2 軸の駆動が可能となっている．

本アクチュエータの摺動部はガイドに設置されたベアリングと固定子支持板，Y 軸可動子ガイドと X 軸可動子シャフト間に存在する．

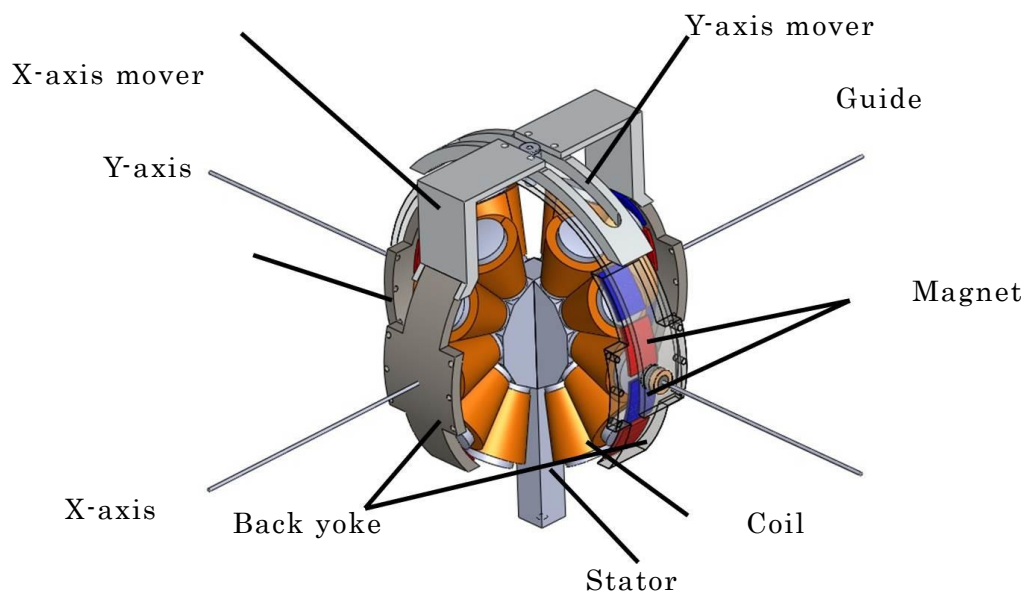


Fig. 2.1 2-DoF Guide actuator

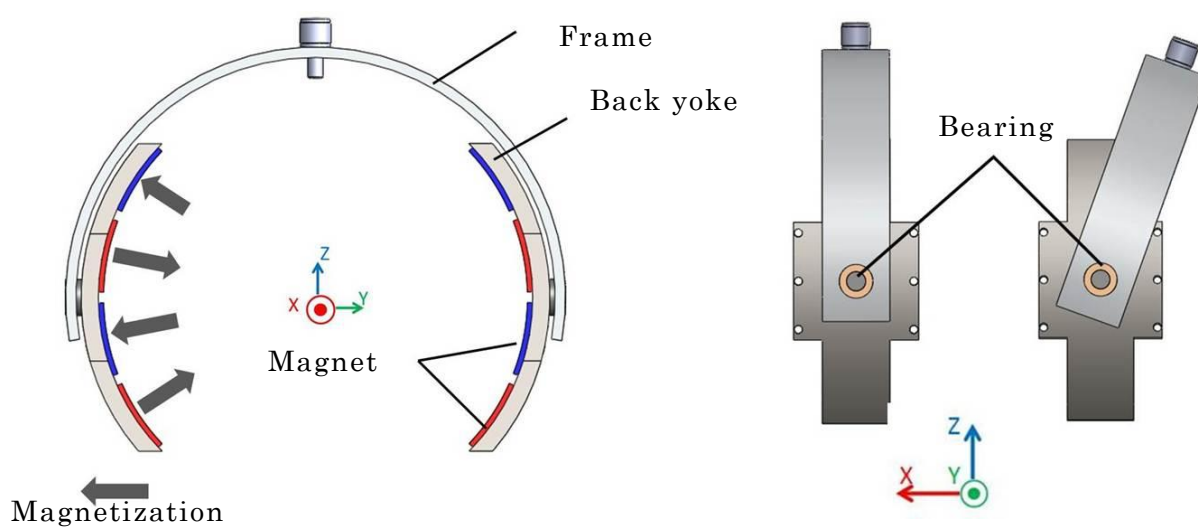


Fig. 2.2 X-axis mover

固定子は、Fig. 2.4 に示すように X 軸、Y 軸周りにそれぞれ 10 本の磁極を有し、30 度間隔で放射状に設置されている。16 極 12 スロットの 3 相同期モータと同様の原理で回転するため、磁極は各軸周りに 12 本あることが望ましい。しかし、土台と固定子を接続する部品が必要であり、固定子最上部の磁極はそれぞれの軸周りの動きに干渉してしまうた

め排除した．可動子と固定子の支持方法について述べる．Fig. 2.5 に示すように，可動子ヨークにベアリングを取り付けた非磁性体の部品を追加し，Fig. 2.5 のレールで支持する．可動子には常に回転中心へ吸引力が働いているため，ベアリングは内側のレールに沿って滑る．

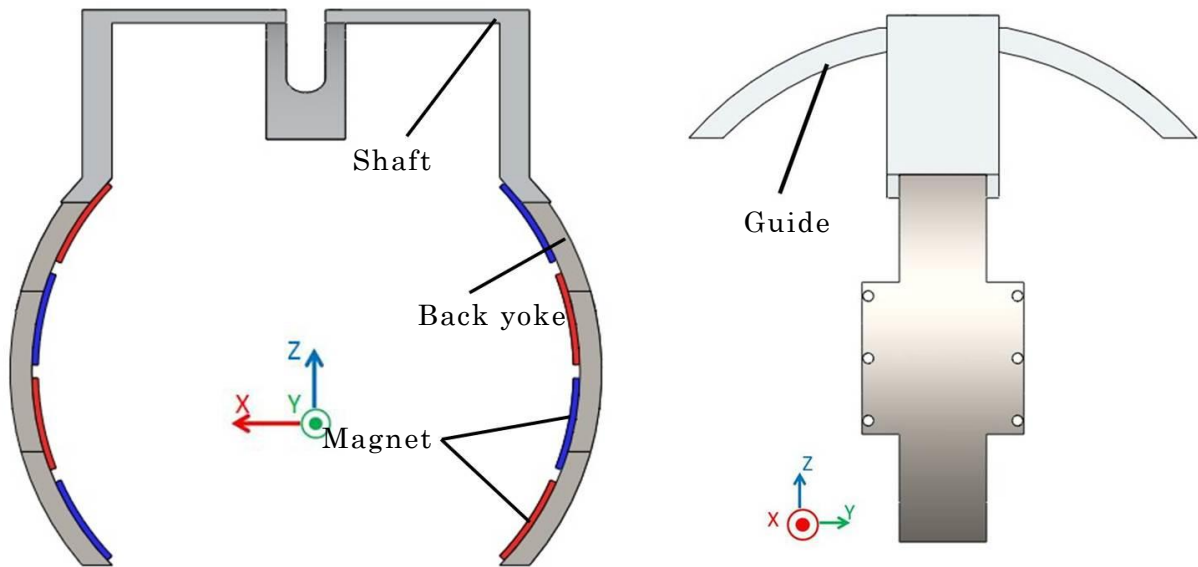


Fig. 2.3 Y-axis mover

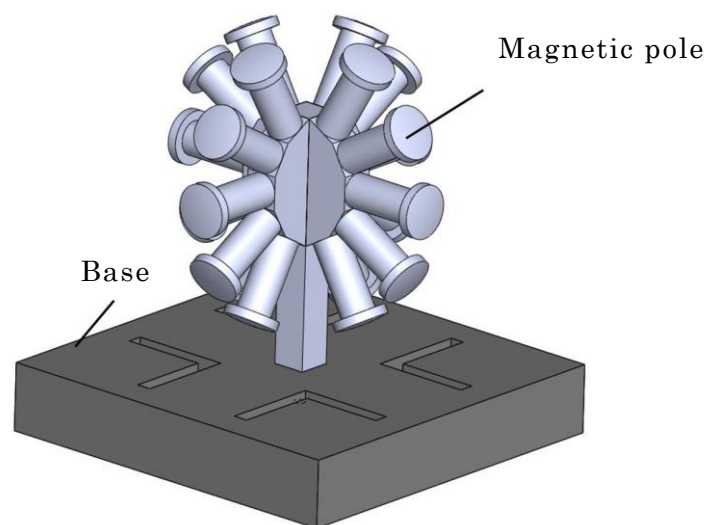


Fig. 2.4 Stator

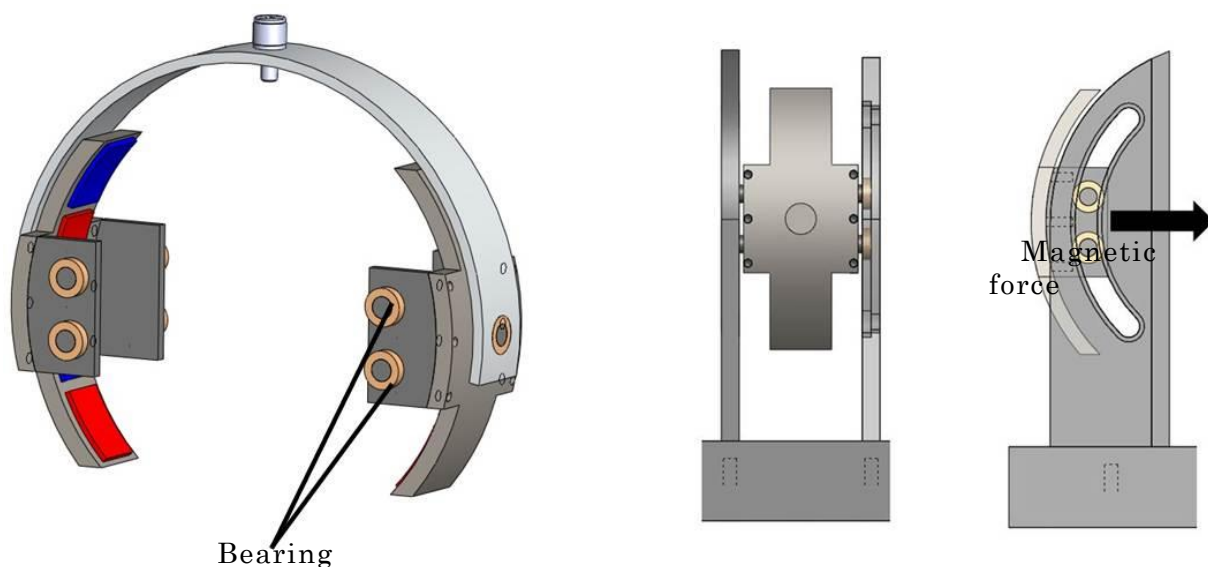


Fig. 2.5 Supporting structure for the mover

2.2 動作原理

本アクチュエータの動作原理は、従来の3相同期モータの原理に基づいている。本アクチュエータのX軸周りの動作原理を示す。Fig. 2.6(b)はFig. 2.6(a)に示す、X軸に垂直な断面における断面図である。Fig. 2.6(b)に示すように磁極をU、V、Wの三相に分ける。これらのコイルに120度位相のずれた正弦波状の交流電流を流すことでX軸周りに回転磁界が生じる。その回転磁界により可動子は吸引力と反発力を得て、永久磁石式同期モータのように回転運動する。この時、Fig. 2.7に示すようにX軸周りの可動子はY軸周りの可動子に設けられたガイド内を動き、Y軸周りの可動子を動かさない。

Y軸周りに回転させる場合もFig. 2.8(b)のようにコイルを3相に分け、それぞれの相に応じた三相交流電流を流し、回転磁界を発生させることで永久磁石式同期モータと同様の原理で回転させる。この時、Y軸周りの回転とともにX軸周りの可動子の支持機構のみが回転し(Fig. 2.9)、永久磁石とヨークは回転しない。この構造により2軸周りの回転をX、Y軸で独立に制御することができる。

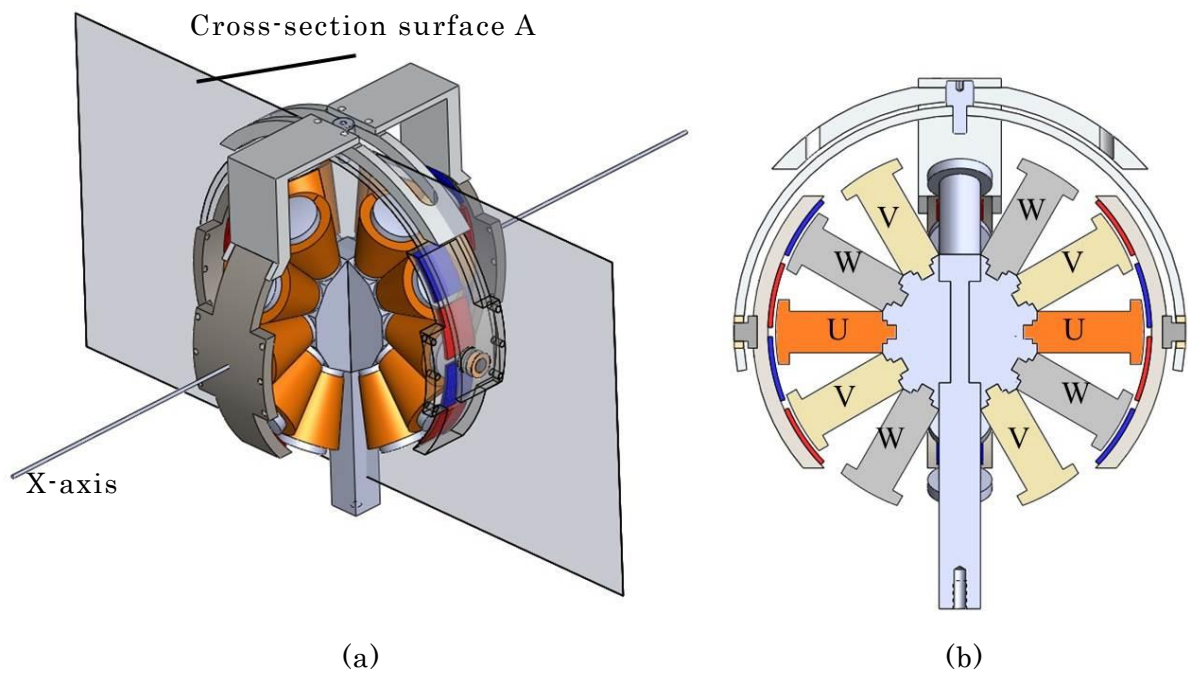


Fig. 2.6 Operating principle around X-axis

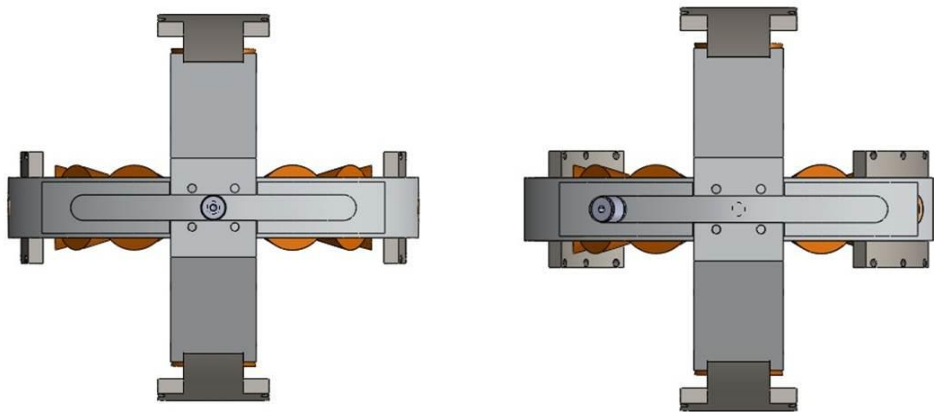


Fig. 2.7 Rotation around X-axis (XY plane)

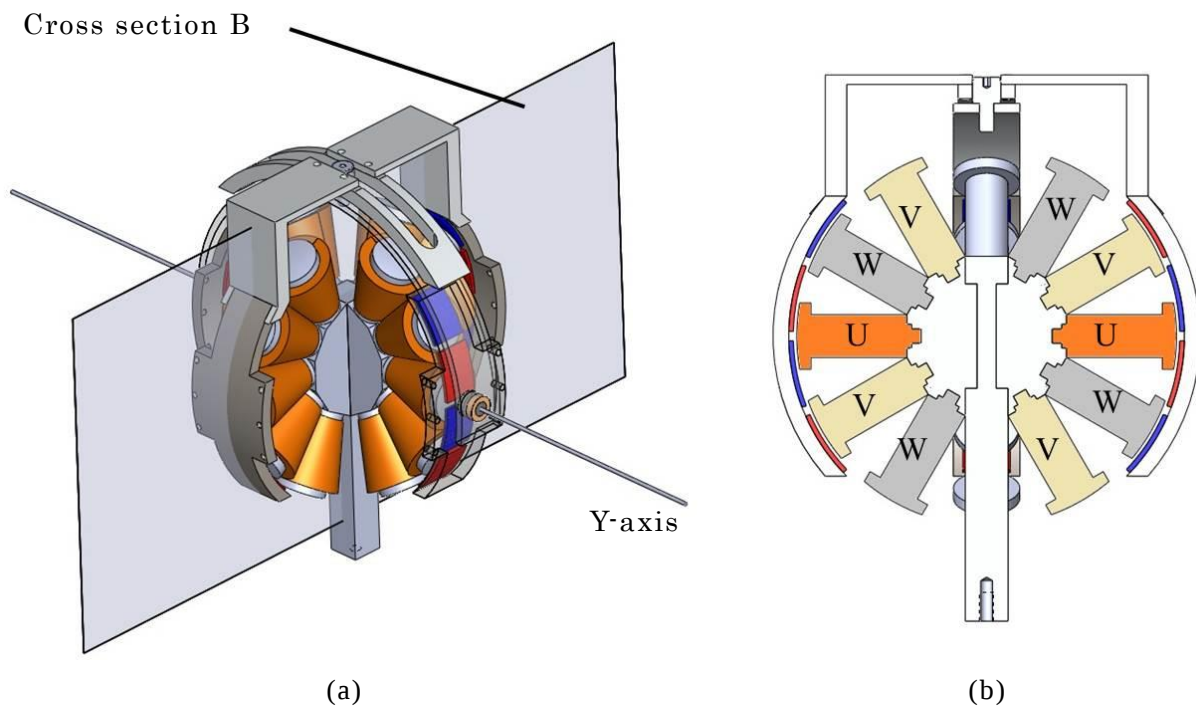


Fig. 2.8 Operating principle around Y-axis

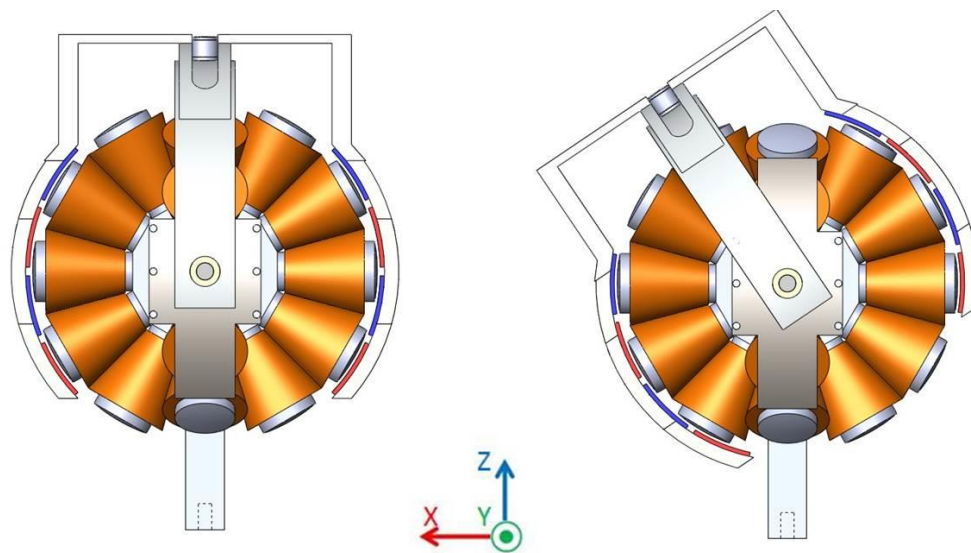


Fig. 2.9 Rotation around Y-axis (XZ plane)

2.3 シミュレーションによる検証

本節では提案アクチュエータに対して，三次元有限要素法を用いた磁場解析により特性確認を行う．

2.3.1 静トルク特性解析

本項ではそのアクチュエータの静トルク特性を解析によって確認する．解析モデルの三次元要素分割図を Fig. 2.10 に，解析条件・諸元をそれぞれ，Table 2.1，Table 2.2 に示す．可動子を本アクチュエータの可動範囲である -35 度から 35 度まで 1 度刻みで回転させた．この時コイルに電流を入力していない場合と，振幅 1A の三相交流電流を模して姿勢に応じた直流電流を励磁した場合のトルクを求める．ここで，コイルは 400 回巻きである．本アクチュエータは 2 つの可動子を有するが，それぞれの可動子の磁気回路は全く同一であるため，解析は X 軸周りの可動子についてのみ行っている．

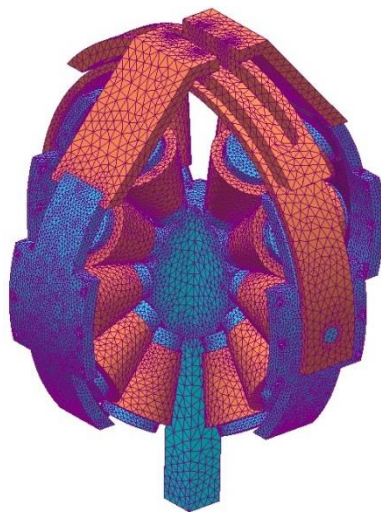


Fig. 2.10 3-D FEM model

Table 2.1 Analysis condition

Excited current	1A
Number of turns	400
Rotation angle	$-35\text{degree} \sim 35\text{degree}$
Rotation axis	X,Y

X 軸周りの解析結果を Fig. 2.11 に示す．青色の実線が非通電時，赤色の実線が通電時に X 軸周り可動子に働くトルクを表している．電流入力時のトルクが，コギングトルクを全領域で上回っていることが確認できる．また平均出力トルクに対する平均コギングトルクの割合は 1.87%と低い値を示している．この結果より電流トルクにより影響が支配的であるといえる．また最大電流トルクは平均電流トルクの 11%程度に収まっており，先行研究のアクチュエータに比べてフラットな電流トルク特性を有していることが確認できた．

Table 2.2 Discretization data

Number of elements	1,681,000
Number of nodes	1,974,000
Number of steps	71
Analysis time	70 hours

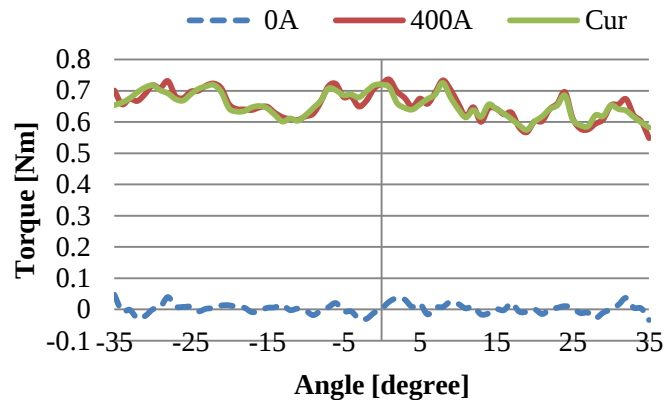


Fig. 2.11 Static torque results (X-axis)

2.3.2 動作特性解析

本項では、提案したアクチュエータに関して、動トルク特性解析によって、動作特性を確認する。

解析に用いた制御ブロック図を Fig. 2.12 に示す。前述のように、本アクチュエータの磁気回路は 3 相同期モータと同様であるため、3 相同期モータで用いられるベクトル制御を用いた。目標とする d 軸電流、 q 軸電流は、下記の通りである。

$$I_{di} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{qi} = K_{Pi}(\theta_{i,target} - \theta_i) + K_{Ii} \int (\theta_{i,target} - \theta_i) dt \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 I_{di} 、 I_{qi} はそれぞれ d 、 q 軸の電流値、 K_{Pi} 、 K_{Ii} は比例ゲインと積分ゲイン、 $\theta_{i,target}$ 、 θ_i はそれぞれ目標角度と現在角度を表している。また $i = x, y$ である。ここで決定された目標電流をもとに、各コイルに対して以下に示すような電流値を入力した。

$$\begin{aligned} I_{iu} &= I_{di} \cos(\theta_i + \alpha) - I_{qi} \sin(\theta_i + \alpha) \\ I_{iv} &= I_{di} \cos\left(\theta_i + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qi} \sin\left(\theta_i + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots (3) \\ I_{iw} &= I_{di} \cos\left(\theta_i + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qi} \sin\left(\theta_i + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

ただし、 I_{iu} 、 I_{iv} 、 I_{iw} はそれぞれ U、V、W 相の入力電流、 α は可動子初期位相によって決定される定数である。以上の手順で、位置フィードバック制御時のコイル電流値を決定した。

可動子の角度指令値は Fig. 2.13 に示すような値を用いた。提案アクチュエータにおいては、可動子の慣性モーメントがそれぞれ異なるため、より慣性モーメントの大きい Y 軸可動子についてのみ動解析を行った。また負荷条件として、 -0.2 、 -0.4Nm を与えており、可動子に働く摩擦は無視している。

解析結果を Fig. 2.14 に示す。指令値を黒色実線、可動子の角度を色付きの実線で示している。無負荷の可動子回転角度は、指令値とほぼ重なっており、指令値に従って回転できていることがわかる。可動子に負荷を与えた場合、負荷の大きさに応じて、立ち上がりに負荷につられて回転する傾向が見られた。解析が進むに従って、指令値への追従していることが見てとれる。

以上により、従来のフィードバック制御手法を用いて、可動子が負荷の大きさによらず、指令値へと追従することを確認することができた。負荷 0Nm 、 -0.2Nm 、 -0.4Nm 印加

時における 1 秒時点での可動子回転角度はそれぞれ，15.04 度，15.03 度，15.03 度であった．

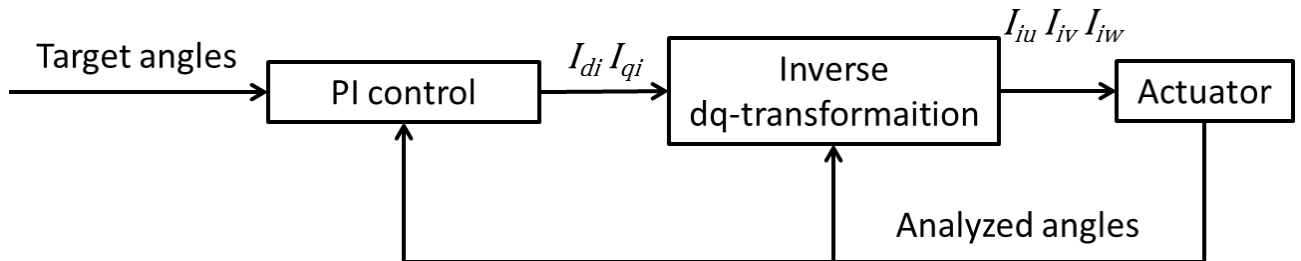


Fig. 2.12 Control diagram (Simulation)

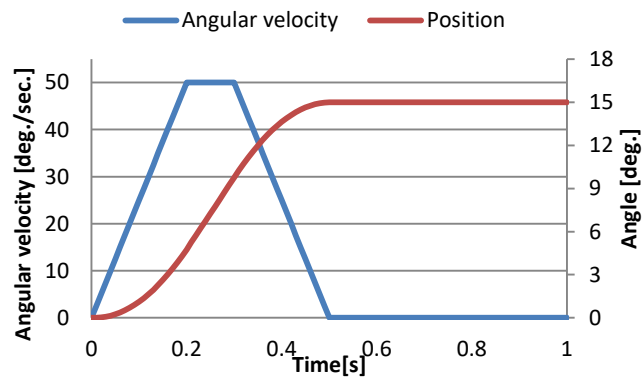


Fig. 2.13 Target angular values

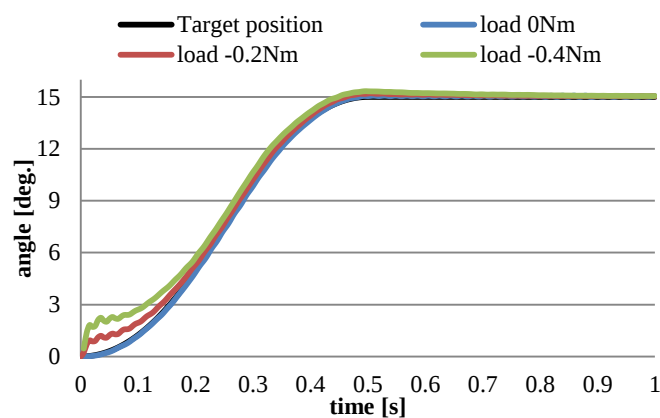


Fig. 2.14 Analysis results (Y-axis)

2.4 実機による検証

本項では，製作した試作機を用いて，アクチュエータの位置決め実験を行う．

2.4.1 可動子角度検出

本アクチュエータの角度検出方法について述べる．各軸周りの回転角度は2つのリニアエンコーダ(Avago AEDR8400)により検出する．Fig. 2.15 に示すように，可動子に設けた溝にリニアエンコーダを実装した基板をねじ止めし，エンコーダと対向する固定子面にリニアスケールを設置する．可動子の駆動と共にリニアエンコーダが回転し，検出した直動方向の移動量を回転角度へと変換する．なお，本検出手法により，角度分解能は 0.03 度である．（エンコーダ分解能 12.5lines/mm，スケール曲率 40.7mm）

2.4.2 フィードバック制御回路

実機による位置決め制御実験時に用いた制御ブロック図を Fig. 2.16 に示す．前節シミュレーションではアクチュエータに電流を印加していたが，本節では電圧を印加している．そのため，電流制御ブロックが Fig. 2.16 では追加されている．X，Y 軸周りのトルク指令値を決定する PI ゲインと，電流を制御するための PID ゲインは，ハンドチューニングによって Table 2.3 に示すように決定した．

以下では2種類の実験を行っている．まず，シミュレーションと同様の角度指令値を与えた場合，続いて角度指令値を X 軸可動子，Y 軸可動子，2つの可動子に与えた場合の角度誤差を比較し，可動子間の干渉を検証した．

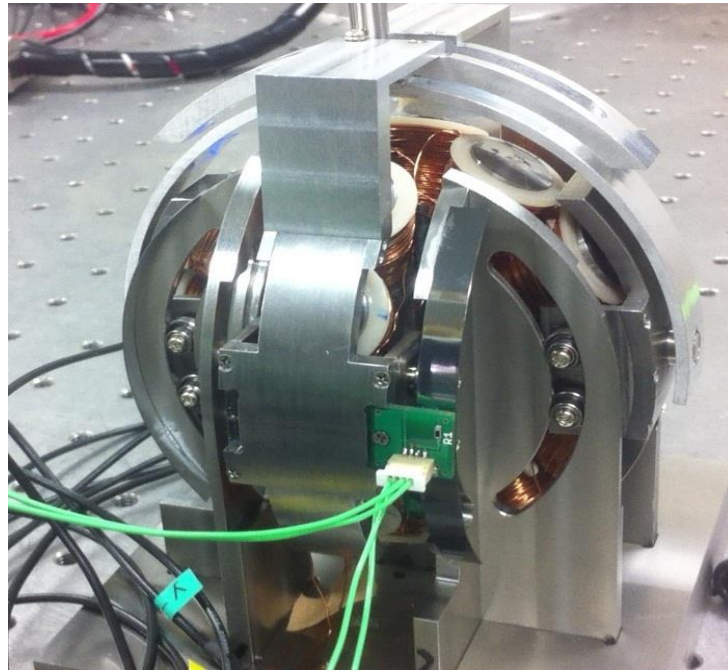


Fig. 2.15 Sensing method

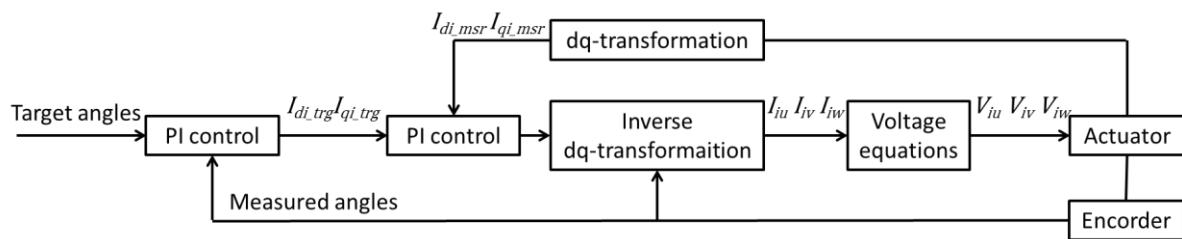


Fig. 2.16 Control diagram

Table 2.3 Experimental condition

Encoder resolution	12.5 lines/mm
Scale curvature	41 mm
PI gain (Angle feedback)	Px=0.11 Ix=0.07 Py=0.16 Iy=0.11
PI gain (Current feedback)	P=0.1 I=0.01
Coil phase resistance	U-phases 7 Ω V,W-phases 14 Ω
Number of turns (1coil)	400

2.4.3 動作特性実験（位置決め制御実験）

まず，Y 軸可動子無負荷時においてシミュレーションと同様に，Fig. 2.13 に示す角度指令値を与えた．結果を Fig. 2.17 に示す．シミュレーション結果とは異なり，可動子の角度に脈動が見られる．また 1 秒時点での Y 軸可動子回転角度は 14.84 度であった．シミュレーション結果と差がみられた原因として，摩擦（シミュレーションでは無視）や製作誤差などが考えられる．

続いて実機を用いて，2 つの可動子を同時に動かした場合の影響を検証した．角度指令値については，Fig. 2.18 に示すような，0 度から 20 度まで回転後停止し，再び 20 度に戻るような値とした．この指令値を X 軸可動子のみに与えた場合，Y 軸可動子のみに与えた場合，2 つの可動子に与えた場合における各可動子の指令値に対する誤差を調査した．

X 軸可動子に前述の角度指令値を与え，Y 軸可動子には 0 度一定の角度指令値を与えた時の実験結果を Fig. 2.19(a)に，それらの差分を Fig. 2.19(b)に示す．点線は可動子の目標角度，実線はエンコーダが検出した角度を表している．X 軸可動子について，回転時には最大で 1 度，指令値一定の場合には最大で 0.5 度程度の誤差が生じていることが確認できた．また Y 軸可動子については，角度が一定に保たれており，X 軸可動子回転の影響を受けていないことがわかった．

次に X 軸可動子には 0 度一定，Y 軸可動子には前述の角度指令値を与えた．この時の角度指令値とエンコーダ検出角度を Fig. 2.20(a)に，それらの差分を Fig. 2.20(b)に示す．Y 軸可動子について，回転時には最大で 1 度程度の，指令値一定の場合には最大で約 0.1 度程度の誤差が生じていることがわかった．また X 軸単軸駆動の場合と同様に，X 軸可動子については角度が一定に保たれ，Y 軸可動子の影響を受けないことがわかった．

X，Y 軸両可動子に前述の角度指令値を与え，同時駆動させた場合の角度指令値と，エンコーダ検出角度を Fig. 2.21(a)に，それらの差分を Fig. 2.21(b)に示す．単軸駆動時と比較して，Y 軸可動子停止時の角度誤差が 0.5 度に増加したが，それ以外の特性は，単軸駆動時と比べて大きく変化しないことがわかった．

以上の実験により，本アクチュエータの指令値追従特性が，単軸駆動時と 2 軸駆動時において 0.5 度以内で位置決めできることを確認した．提案したリニアエンコーダとリニア

スケールによる測定手法の角度検出手法の精度も 0.5 度程度であり，測定手法の精度が向上すると更に，検出精度は向上すると考えられる．

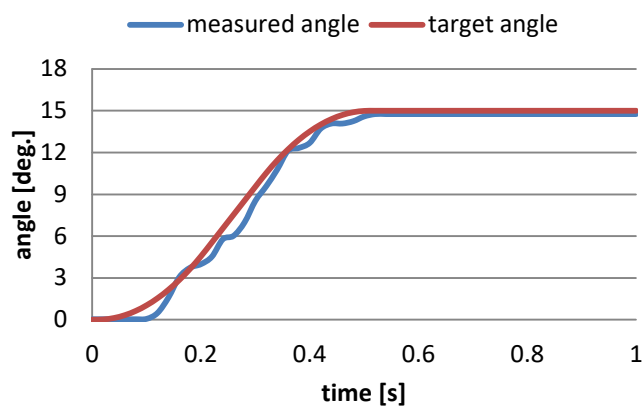


Fig. 2.17 Experimental results (Comparison with simulation)

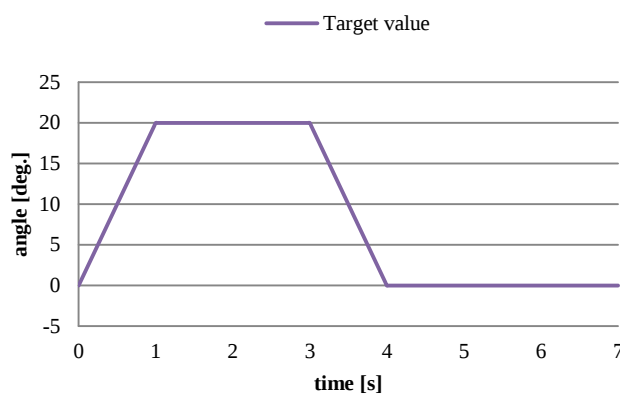
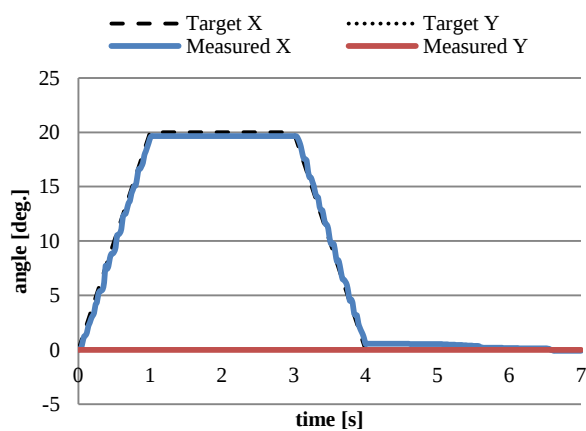
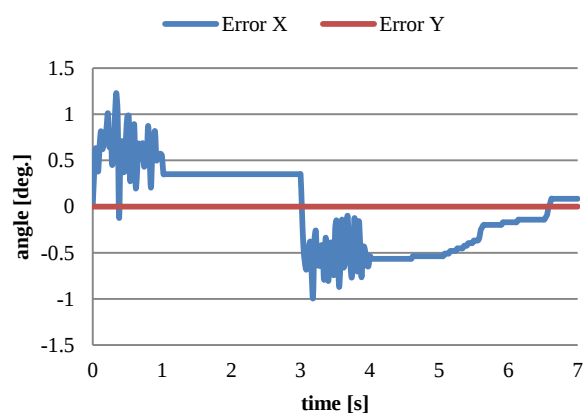


Fig. 2.18 Target angular value

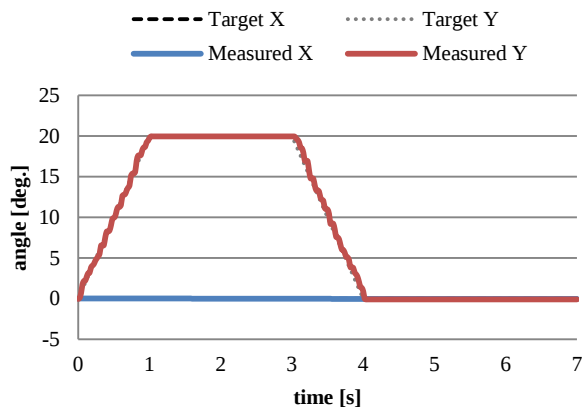


(a) Rotation angle

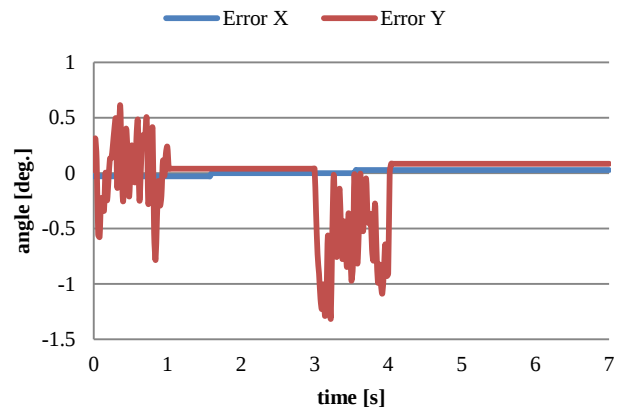


(b) Error angle

Fig. 2.19 Experimental results (X-axis)

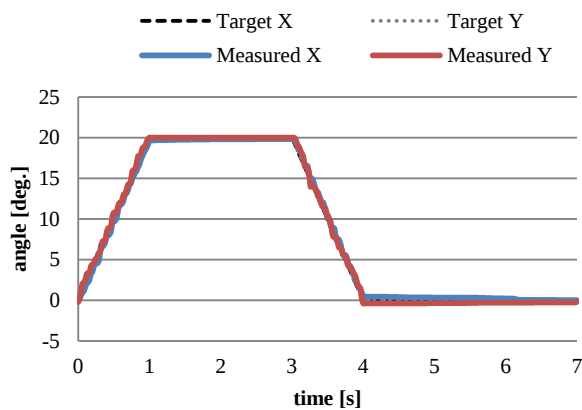


(a) Rotation angle

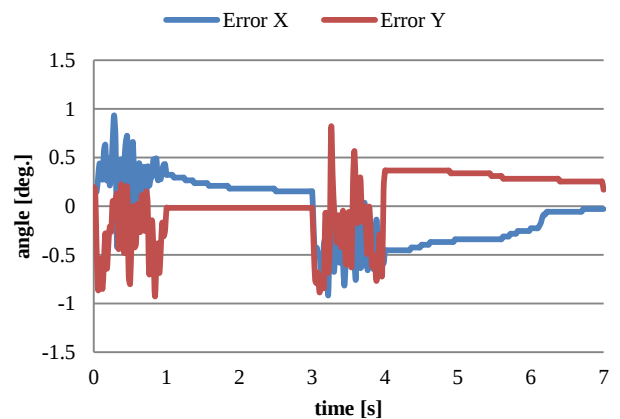


(b) Error angle

Fig. 2.20 Experimental results (Y-axis)



(a) Rotation angle



(b) Error angle

Fig. 2.21 Experimental results (2-axis)

2.5 結言

本章では、ガイド型二自由度球面電磁アクチュエータを提案した．本アクチュエータは2つの可動子の出力をガイド機構により合成したものであり，既存の3相同期モータと同様の方法で制御することが可能である．

まず本アクチュエータの基本構造と動作原理について明らかにした．続いて3次元有限要素法を用いた磁場解析によって，アクチュエータの静トルク特性を明らかにした．最大電流トルクは平均電流トルクの11%程度に収まっており，比較的フラットな電流トルク特

性を有していることを確認した．また従来制御手法を用いて，3相インバータ利用を想定した，動トルク特性解析を行い，摩擦を無視した場合に，負荷 0.4Nm がかった状態においても，0.1 度以内で位置決めできることを確認した．最後に実機を用いて無負荷時における位置決め精度実験を行った．単軸回りでは，摩擦の影響により 0.2 度以内で位置決めできることを確認した．また単軸駆動時と，両軸駆動時において駆動特性に大きな変化は見られず，両軸駆動時は 0.5 度以内で位置決めできることを確認できた．以上により，フラットな電流トルク特性を有し，従来の制御手法，制御機器を利用可能な 2 自由度電磁アクチュエータを提案することができた．

本アクチュエータはジンバル機構をアクチュエータ化したものである．したがって，可動子の回転角度が大きくなると，Fig. 2.22 に示すように特異点が生じ，いくら X 軸周りに可動子を回転させても，可動子先端の X, Y 座標は変化しなくなる．本アクチュエータを使用する上考慮すべき点である．

Table 2.4 Actuator specifications

Size[mm]		Φ90×150
Mass [kg]		2.5
Average output torque[Nm] (Simulation 200A)	X-axis	0.66
	Y-axis	0.66
Positioning accuracy[deg.] (Experiment)	X-axis	0.2
	Y-axis	0.2
	2-axis	0.5

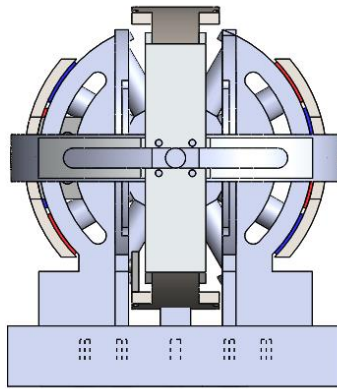


Fig. 2.22 Singular posture ($\theta_y = 90^\circ$)

第3章 2 自由度差動結合型電磁アクチュエータの提案

本章では，2 自由度差動結合アクチュエータについて述べる．まず，本アクチュエータを提案する上で，参考にした iCub^[30] (Fig. 3.1)，イタリアで開発が進められている子供型ロボットの腰部に搭載されている，機械式の差動結合機構について述べる．次に本機構を磁氣的に置換したアクチュエータを提案し，基本構造と動作原理について述べる．続いて，3 次元有限要素法を用いた磁場解析によって，提案アクチュエータの静トルク特性を明らかにし，位置決め制御シミュレーションを行う．最後に試作機を用いて，静トルク特性と位置決め制御実験を行い，提案アクチュエータの有効性を確認する．

3.1 機械式差動結合機構について

イタリア工科大学を始めとした，世界中の研究者らによって，RobotCub 計画が進められている．本計画では，ロボットの認知機能を発達させることを目的として，そのロボットの認知過程から逆説的に人間の認知機能獲得過程を理解することを目的としている．iCub とは，その RobotCub 計画の一環で開発が進められている子供型ロボットであり，全長 90cm，質量 23kg，全身に 53 個^[31]の自由度を有している．

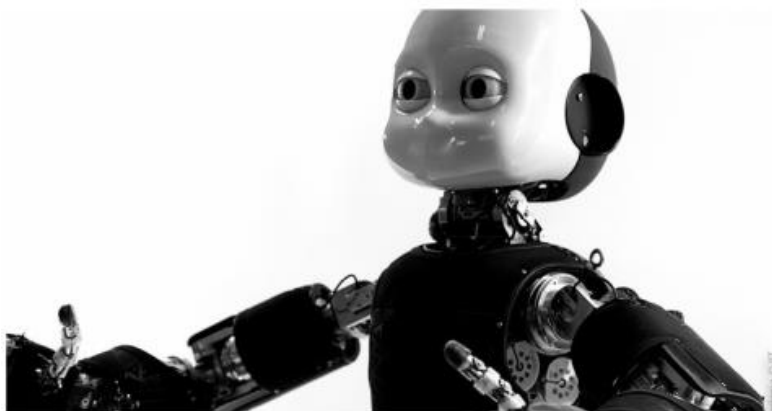


Fig. 3.1 iCub

iCub の自由度が全身にどのように配分されているかを Fig. 3.2 に示す. 身長 90cm, 体重 23kg, 2.5 歳児の知覚能力を有している. またすべての動きは電磁モータによって実現されている. 基本的に iCub の駆動系は, モータを直列に接続するシリアルリンク方式で構成されているが, 腰部の 3 自由度は, パンチルトを行う差動結合機構にロール用のモータを組み合わせることで実現されている. iCub 下部の外観と自由度配置を Fig. 3.3 に示す.

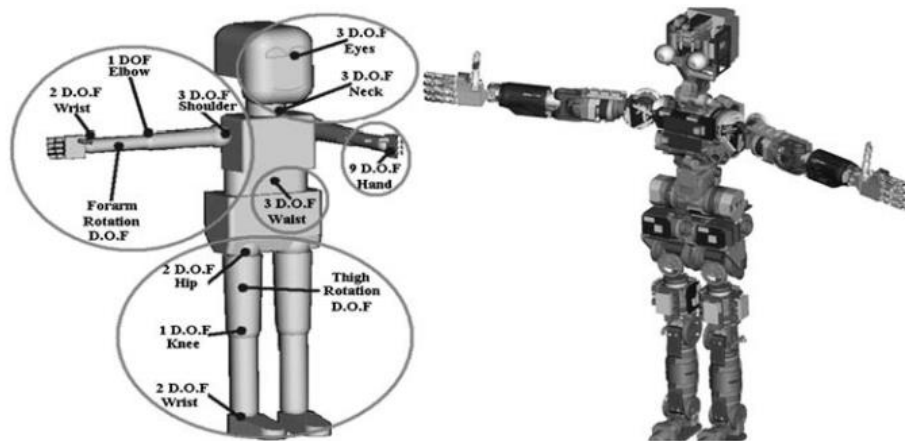


Fig. 3.2 iCub distribution of the d.o.f. and the CAD model of the first prototype

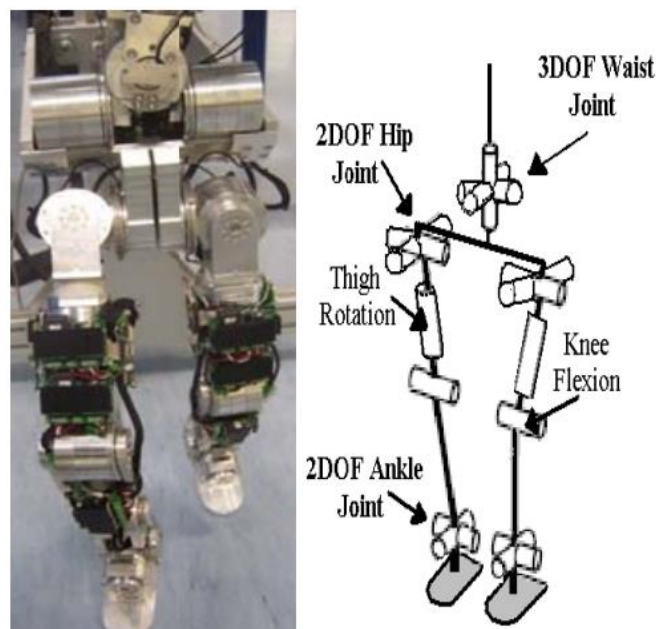


Fig. 3.3 Kinematic configuration and the mechanical assembly of the “iCub” lower body

ここで腰部の外観を Fig. 3.4 に示す．モータが2つ向かい合わせで同軸上に設置されており，それらの間に自動車などで用いられるディファレンシャルギア（以下デフギア）が設置されている．

ここでデフギアについて述べる．デフギアとは，車体がカーブを曲がる場合の，内側と外側の車輪に発生する回転数の差を吸収する歯車機構であり，Fig. 3.5 に示されるような部品で構成されている．エンジンからの回転が，Fig. 3.5 中紫色の歯車を通して伝達され，紫色歯車に設置された緑色歯車と共に，2つの歯車回転する．桃色歯車と黄色歯車にはそれぞれ最終出力が車輪であり，緑色歯車とそれぞれ噛み合っている．

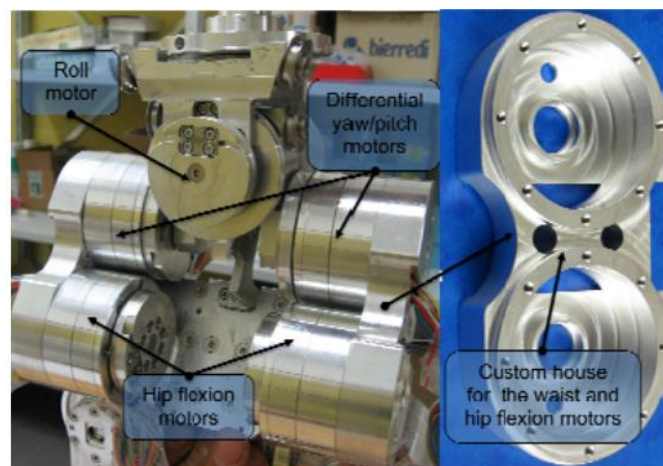


Fig. 3.4 The waist structure of the iCub

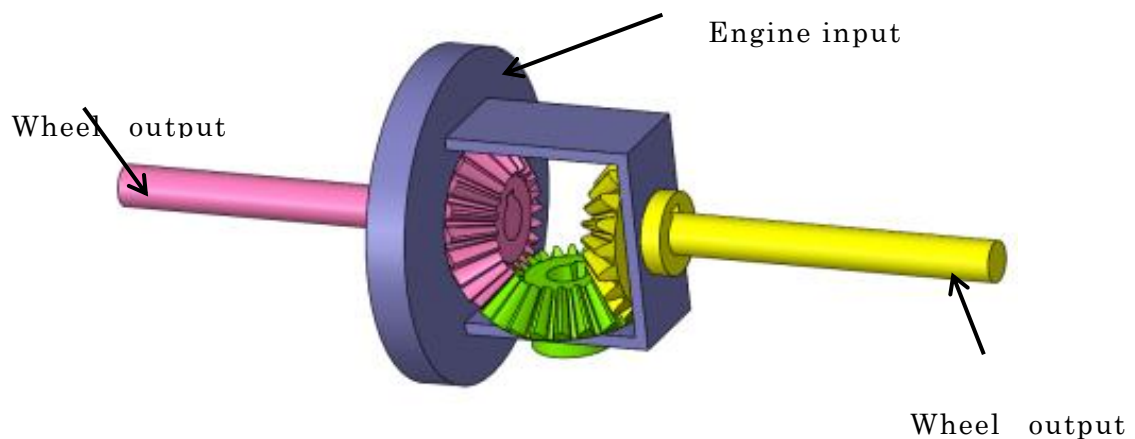


Fig. 3.5 Differential gear system

車が直線を走行中は, 左右の車輪の回転数に差は生じず, エンジンからの入力に応じて, 紫色歯車と緑色歯車が同じ速度で回転し, 緑色歯車は自身の軸周りに回転しない (自転しない). 車がカーブを曲がる場合, 左右の車輪の回転数に差が生じる. この時, 緑色歯車は紫色歯車と同時に回転しつつ, 緑色歯車の持つ自身の軸周りにも回転する.

桃色歯車と黄色歯車の間に回転数に応じて, 緑色歯車は2自由度に回転する.

前述の iCub に用いられている差動機構は, デフギアの黄色歯車および, 桃色歯車にモータを接続して入力として使用し, 緑色歯車を出力として利用する機構である. 2個のモータが同じ方向に同じ回転速度で回転している場合, 緑色歯車は入力のモータ回転軸と同じ軸周りに回転する. また2個のモータが反対方向に同じ回転速度で回転している場合, 緑色歯車は自身有する回転軸周りに回転する. モータの回転数を制御することで, 2自由度の出力を実現可能である.

差動結合機構には, 以下に示すようなメリットを有している [32].

- 差動機構の高剛性, 高精度という特徴をそのまま享受することが可能
- シリアルリンク方式とは異なり, 2つのモータのトルクを2つの関節に分配することが可能
- 上にあげた特徴より, 同じ最終的な出力トルクを得るために, シリアルリンク方式で構成する場合と比較して小さな出力のモータを使用することが可能

本章では, この差動結合機構の原理を採用した2自由度電磁アクチュエータを提案する. 提案アクチュエータは上述のメリットを継承しつつ, 1章で述べた多自由度アクチュエータのメリットを有するアクチュエータとなる. 例えば, iCub に搭載されている腰部機構は Fig. 3.4 に示すように, 小型化するための工夫 (モータ回転軸と機構回転軸を一致させないといった) が必要となっていたが, 本機構を1台のアクチュエータで再現すると, そのような工夫が不要となる.

3.2 基本構造と設計指針

3.2.1 基本構造

前節の機械式差動結合機構を参考に、本章で提案するアクチュエータの外観図を Fig. 3.6 に示す。本アクチュエータは主に可動子、4つの固定子から構成される。可動子は円柱の可動子ヨークを上下に有しており、各可動子ヨークには32極の磁石が設置されている。可動子は、X軸、Z軸周りにのみ回転できるように支持されている。この可動子を挟むように固定子が設置されており、それぞれの固定子は磁極とコイルを有している。これらのコイルに3相交流電流を入力することで、X軸周りの移動磁界が発生する。可動子磁石と、固定子磁極との磁気回路は、可動子磁石の最も固定子に近い場所の4か所で形成される。ここで可動子と各固定子における磁束の流れ方は、従来の3相モータと同様であるため、磁気回路の考え方及び可動子磁石位相に対する電流値の決め方は、従来のモータと同様に考えることが可能である。これらの発生推力はY軸方向に発生すると仮定できる。4つの固定子で発生する力を制御することで、可動子はX、Z軸周りに回転することが可能である。アクチュエータ諸元を Table 3.1 に示す。

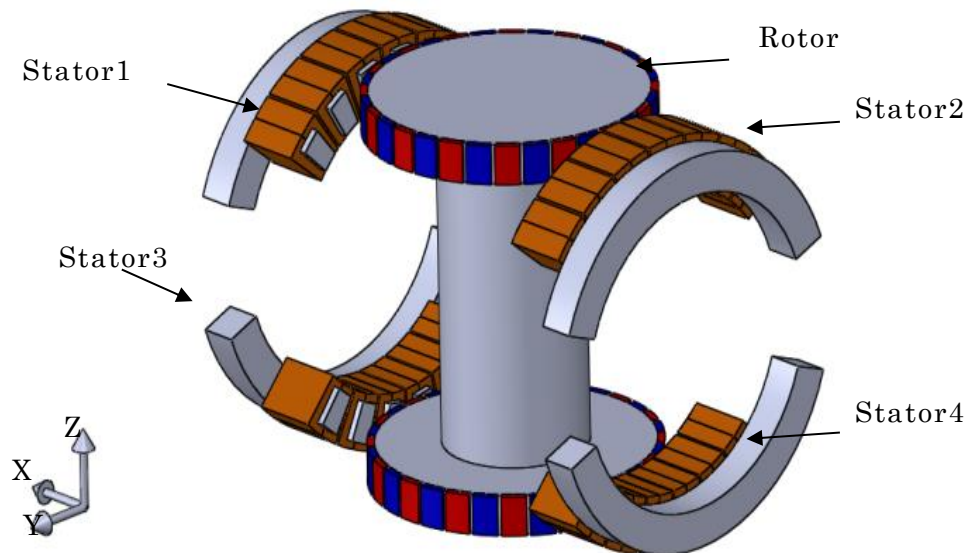


Fig. 3.6 Whole view of the proposed actuator

Table 3.1 Model specification for simulation

Model size	140×100×100 mm
Rotor size	φ80×100 mm
Stator size	30×100×40mm
Residual magnetic flux density of permanent magnet	1.3 T
Number of pole pairs (rotor)	32
Stator pole pitch	14.92 degree
Stator pole width	7.46 degree
Air gap length	0.5 mm
Number of coil turns	200

3.2.2 アクチュエータ設計指針

本アクチュエータの設計は以下の手順を踏む．

- ・可動子寸法を決定し，(3.1)により θ_{eff} （有効磁気回路形成角度）を計算
- ・可動子極対数 p の設定（ただし， $p \geq \frac{360}{\theta_{eff}}$ を満たす）
- ・3相同期モータの極数スロット数の組み合わせにのっとり， θ_{stator} （固定子のスロット間隔角度）を決定（ただし $3\theta_{stator} \leq \theta_{eff}$ ）

本アクチュエータの駆動原理は3相同期モータと同様である．しかしながら，可動子が円柱形上，固定子が平面形状であるため，構成できる磁気回路が Fig. 3.7 中の4か所に限られる．アクチュエータとして，あらゆる姿勢でトルクを出力するためには，可動子任意の姿勢で，モータと同様の磁気回路を構成する必要がある．

従来のモータの磁気回路において，可動子対向面と固定子対向面の距離は常に一定である（エアギャップが一定）．本アクチュエータにおいては，2自由度駆動する都合上，エアギャップが変化せざるを得ない．可動子と固定子で，ある一定距離まで磁気回路を形成できると仮定すると，Fig. 3.8 に示すように，一定角度の対向範囲が磁気回路を形成できる可動子の範囲となる．この角度を，有効磁気回路形成角度（ θ_{eff} ）とすると， θ_{eff} は以下の式で表される．

$$\theta_{eff} = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{r - (g_{max} - g_{min})}{r} \right) \quad (3.1)$$

ただし、 r は可動子の半径、 g_{max} 、 g_{min} はそれぞれ許容できるエアギャップの最大値、可動子と固定子の最小エアギャップ距である。本アクチュエータで用いるパラメータ、および有効磁気回路形成角度は Table 3.2 に可動子の極対数の選び方は任意であるが、この値が少なすぎると有効磁気回路中で対向する磁石の極が限られ、トルクを発生できない（有効磁気回路中の対向磁石極がすべて N 極の場合など）。可動子任意の姿勢で任意のトルクを出力するためには、この有効磁気回路形成角度内で、少なくとも磁石が電気角で 1 周期以上存在する必要がある。提案アクチュエータにおいて、可動子磁石極対数は 16 と定めた。この時の電気角 1 周期は、機械角 22.5 度に相当し、前述の有効磁気回路形成角度内で、電気角 1 周期以上対向できる。

可動子の極対数を決定したので、固定子磁極間隔を決定する。磁石極対数が 16 の場合、集中巻の 3 相同期モータの場合、固定子磁極角度は通常 7.5 度、または 15 度となる。本アクチュエータの寸法において、磁極を X 軸周りに 7.5 度間隔で設置した場合、固定子磁極同士の間隔が狭くなりコイルが巻けなくなる、磁極 1 本あたりの体積が小さくなってしまいうため強力な磁石を用いた場合に磁気飽和し易くなる、といった問題が生じる。そこで本稿では磁極角度を 15 度と設定した。また実際には固定子の磁極は X 軸周りに配置されるため、実際の磁極間隔は 14.92 度としている。

磁極角度が 14.92 度の場合、固定子コイルの 1 周期は 44.76 度となり、有効磁気回路形成角度を超えてしまう。本アクチュエータでは、本アクチュエータの固定子 1 と固定子 4、固定子 2 と固定子 3 のコイルは、位相を半周期ずらした場合に同相として扱えることを用いて対処した（理由は 3.3.2 にて記述）。固定子磁極の位相は、固定子 1 と 4、固定子 2 と 3 の間でそれぞれ半周期の位相差を持つ。この位相差を持つことによって、固定子 1 と 4 で考えた場合に、磁極群の 1 周期は 22.38 度となり、こちらも前述の θ_{eff} 以内に収まる。

示す通りである。

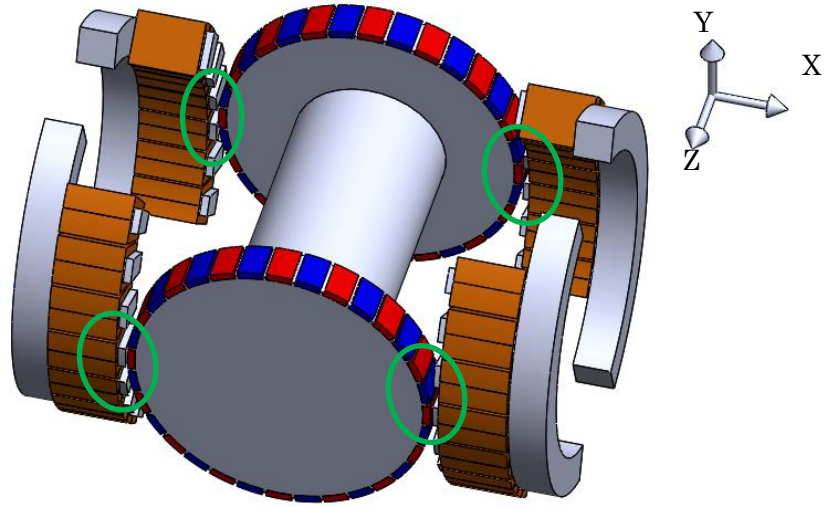


Fig. 3.7 Effective magnetic circuits

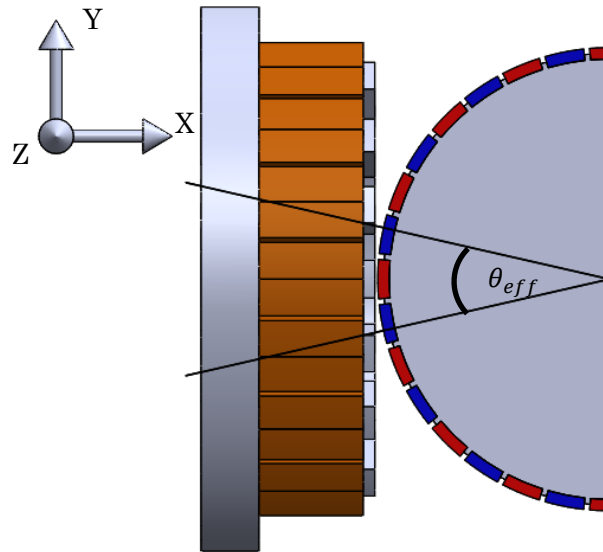


Fig. 3.8 Effective facing angle

Table 3.2 Parameters for θ_{eff}

r	40 mm
g_{max}	1.5 mm
g_{min}	0.5 mm
θ_{eff}	25.677 degree

3.3 動作原理

3.3.1 単軸駆動

前節で述べたように、固定子コイルに電流を励磁すると、可動子の固定子と対向する 4 か所において磁気回路が形成され、可動子に力が発生する。この時、可動子は X, Z 軸周りに拘束されているため、Y 軸方向の力のみが、可動子を回転させる力として働く。可動子に働く摩擦トルクが無視できるとすると、X, Z 軸周りの運動方程式は以下の式(3.2)で表される。

$$\begin{aligned} I_X \ddot{\theta}_X &= -F_1 \cdot r_X - F_2 \cdot r_X + F_3 \cdot r_X + F_4 \cdot r_X \\ I_Z \ddot{\theta}_Z &= F_1 \cdot r_Z - F_2 \cdot r_Z + F_3 \cdot r_Z - F_4 \cdot r_Z \end{aligned} \quad (3.2)$$

I_X , I_Z はそれぞれ X, Z 軸周りの慣性モーメント, r_X , r_Z は X, Z 軸周りの回転半径, θ_X , θ_Z は X, Z 軸周りの回転角度, F_1 , F_2 , F_3 , F_4 はそれぞれ各固定子より可動子が受ける Y 軸方向の推力である。

例として X, Z 軸周りに駆動する場合について考える。

X 軸周りに駆動する場合, Fig. 3.9 (a)に示すように、固定子 1, 2 で可動子に Y 軸方向負の力, 固定子 3, 4 で Y 軸方向正の力を発生させる。各固定子で働く力の大きさが等しいとすると、可動子に働く力の Z 軸周りに働く力は打消し合う。すなわち可動子に働く力は、X 軸周りの回転力のみとなる。

Z 軸周りに回転する場合, Fig. 3.9 (b)に示すように、固定子 1, 3 で Y 軸方向正の力, 固定子 2, 4 で Y 軸方向負の力を発生させる。同様に各固定子で働く力の大きさが等しいとすると、可動子に働く力の X 軸方向の回転力は打消し合い、Z 軸方向の回転力のみが可動子に働く。

以上、各固定子で働く力の大きさが等しい場合、力の向きの変更によって、X 軸または Z 軸周りのトルクを出力することが可能である。Table 3.3 に各回転時における各固定子で発生させるべき力を示す。

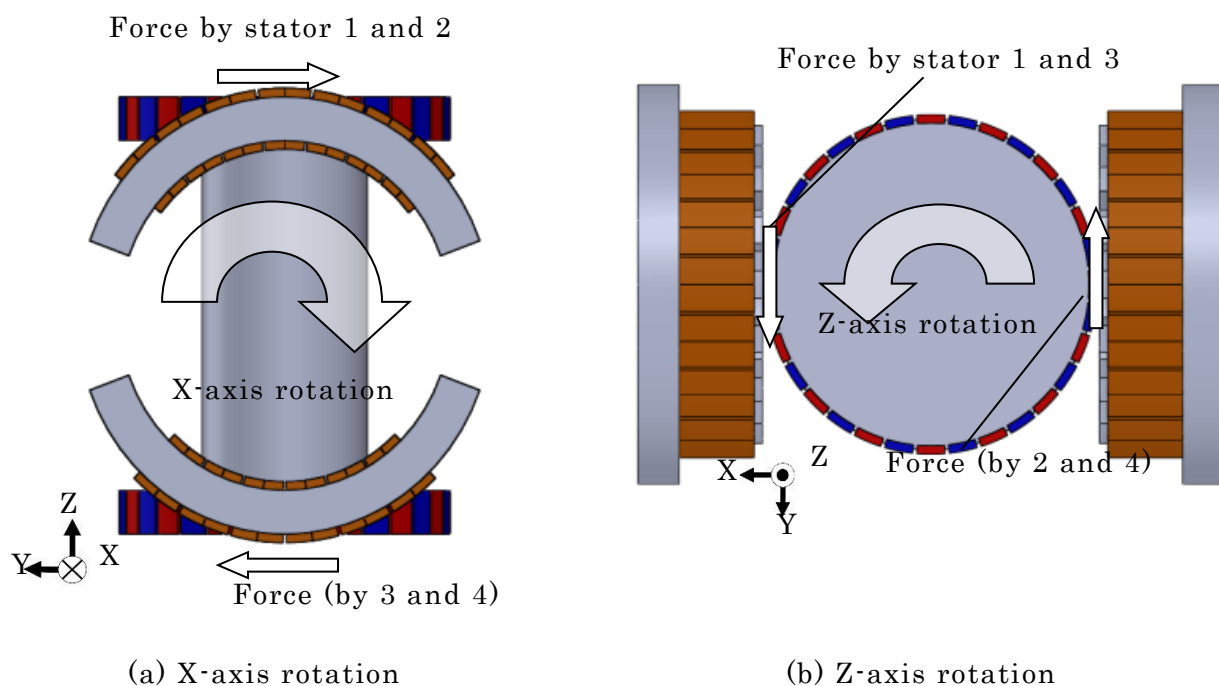


Fig. 3.9 Principle of X and Z-axis rotations

Table 3.3 Force directions (X and Z rotation).

	Stator 1	Stator 2	Stator 3	Stator 4
+X rotation	-Y	-Y	+Y	+Y
-X rotation	+Y	+Y	-Y	-Y
+Z rotation	+Y	-Y	+Y	-Y
-Z rotation	-Y	+Y	-Y	+Y

3.3.2 コイル位相の決定方法

本アクチュエータは3相巻線を有する4つの固定子が存在するが、6相で制御することが可能である。提案アクチュエータの磁気回路は、従来の3相ACモータのそれを同様であるため、従来モータの制御手法を本アクチュエータにも適用することが可能である。

各磁極から見た磁石位相について考える。可動子はXとZ軸周りに回転するため、各磁極において最適な位相の電流を決定するためには、2軸周りの回転角度を考慮する必要がある。

ある．X，Z 軸正回転時の各固定子からみた磁石位相の進み方を Fig. 3.10 に示す．固定子 1 の磁極から見ると，X 軸正回転時には可動子磁石が $-Y$ 方向，Z 軸正回転時には $+Y$ 方向に進む．また，固定子 2 の磁極から見ると，X 軸正回転時には可動子磁石が $-Y$ 方向に，Z 軸正回転時にも $-Y$ 方向に進む．同様にして，固定子 3，4 から見た場合の，X，Z 軸正回転時の可動子磁石の進み方は，Fig. 3.10 中に示す符号で表される．

ここで磁石の磁界が正弦波状に変化すると仮定した場合，中心が Z 軸と一致する固定子 1 の磁極から見た場合の可動子磁石磁界の変化は以下の式で表される．

$$F_{mag}\sin(-p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha) \quad (3.3)$$

ただし， F_{mag} は磁石起磁力の振幅， α は上部可動子磁石の初期位相を表している．同様に，中心が Z 軸と一致する固定子 4 の磁極から見た場合の可動子磁石磁界の変化は以下の式で表される．

$$F_{mag}\sin(p_x\theta_x - p_z\theta_z + \beta) \quad (3.4)$$

ただし β は下部可動子磁石の初期位相を表している．この 2 式から，上部と下部可動子磁石磁界の位相が一致している場合には ($\alpha = \beta$)，全く逆方向に進んでいくことがわかる．同様に固定子 2，3 から見た場合の可動子磁石磁界も全く逆方向に進んでいくことがわかる．

従来の 3 相同期モータでは，可動子磁石磁界に対して 4 分の 1 周期進んだ磁界をコイル側で生成して，駆動する ($i_d=0$ 制御)．本アクチュエータでも同様の制御を行った場合の，可動子に Y 軸方向正の力を出力する固定子 1 の電流は以下の通りである．

$$\begin{aligned} u_1 &= \sin\left(-p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\theta_1) \\ v_1 &= \sin\left(-p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ w_1 &= \sin\left(-p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

p_x ， p_z はそれぞれ X，Z 軸周りの極対数を表す．同様に可動子に Y 軸方向正の力を出力する固定子 4 の電流は以下の通りである．

$$\begin{aligned}
u_4 &= \sin\left(p_x\theta_x - p_z\theta_z + \alpha + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\theta_1 + \pi) = -u_1 \\
v_4 &= \sin\left(p_x\theta_x - \theta_z + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3} + \pi\right) = -w_1 \\
w_4 &= \sin\left(p_x\theta_x - p_z\theta_z + \alpha - \frac{2\pi}{3} + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3} + \pi\right) = -v_1
\end{aligned} \tag{3.6}$$

ここで上部，下部可動子の磁石位相差は無いものとし，上部の可動子とは磁極の位相差が半周期ずれていることを考慮した．

Table 3.3 により，X，Z 軸回転いずれの場合においても，固定子 1 と 4 で出力すべき力は常に逆方向となるため，これらのコイルは同相として扱うことが可能である．

同様に可動子に Y 軸正方向の力を出力する固定子 2 の電流位相は以下の通りとなる．

$$\begin{aligned}
u_2 &= \sin\left(-p_x\theta_x - p_z\theta_z + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\theta_2) \\
v_2 &= \sin\left(-p_x\theta_x - p_z\theta_z + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \\
w_2 &= \sin\left(-p_x\theta_x - p_z\theta_z + \alpha - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

また可動子に Y 軸正方向の力を出力する固定子 3 の電流は以下の通りとなる．

$$\begin{aligned}
u_3 &= \sin\left(p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\theta_2 + \pi) = -u_2 \\
v_3 &= \sin\left(p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3} + \pi\right) = -w_2 \\
w_3 &= \sin\left(p_x\theta_x + p_z\theta_z + \alpha - \frac{2\pi}{3} + \pi + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3} + \pi\right) = -v_2
\end{aligned} \tag{3.8}$$

同様に，固定子 2 と 3 のコイルも同相として扱うことが可能である．

以上により，固定子 1 と 4 のコイル，固定子 2 と 3 のコイルはそれぞれ同相として扱えることがわかった．以下では固定子 1 と 4 で出力する推力，固定子 2 と 3 で出力する推力は常に逆方向であるとし，同相として扱う．アクチュエータの運動方程式(3.2)は，以下の式のように書き下せる．

$$\begin{aligned}
I_x\ddot{\theta}_x &= -(F_1 - F_4) \cdot r_x - (F_2 - F_3) \cdot r_x = -F_{14} \cdot r_x - F_{23} \cdot r_x \\
I_z\ddot{\theta}_z &= (F_1 - F_4) \cdot r_z - (F_2 - F_3) \cdot r_z = F_{14} \cdot r_z - F_{23} \cdot r_z
\end{aligned} \tag{3.9}$$

ここで F_{14} ， F_{23} はそれぞれ固定子 1 と 4 で発生する推力の和，固定子 2 と 3 で発生する推力の和である．実際の 6 相のコイルは Fig. 3.11 に示すように設定した．

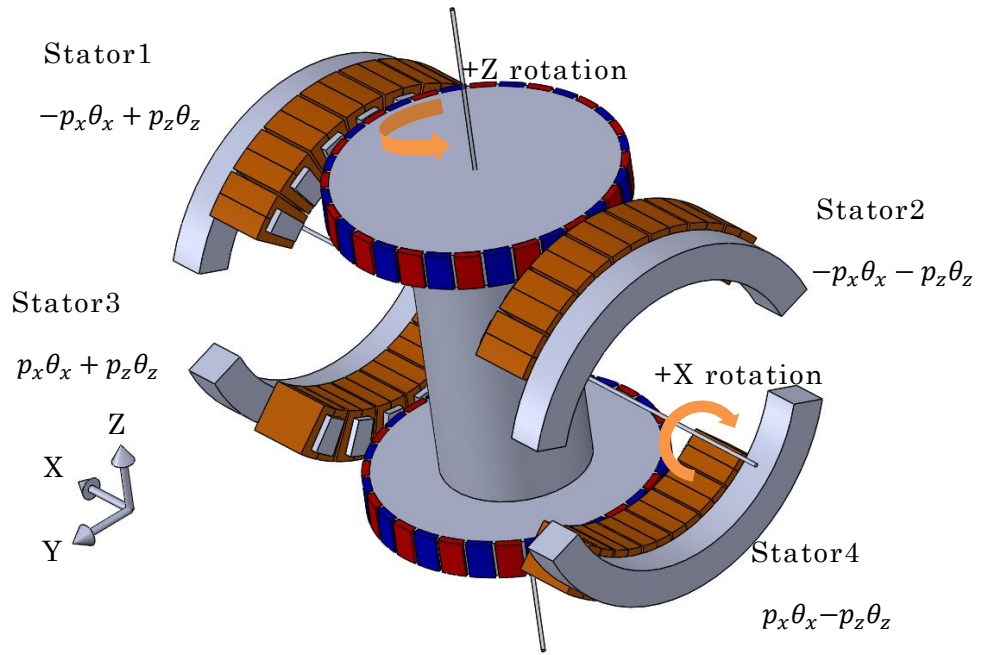


Fig. 3.10 Magnet phases for X and Z-axis rotation

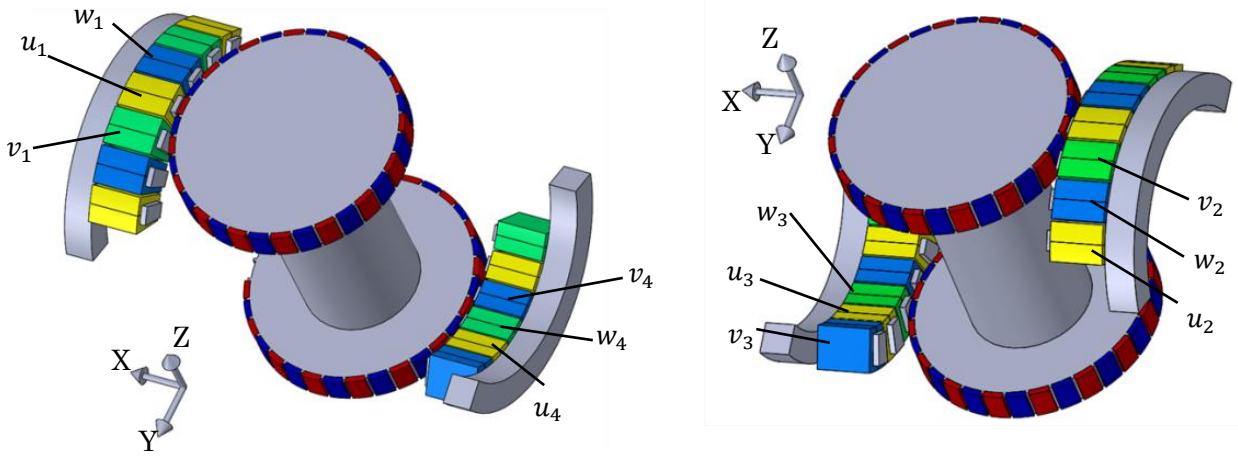


Fig. 3.11 Coil phases

3.4 シミュレーションによる検証

3.4.1 フィードバック制御回路

提案アクチュエータのフィードバック制御ブロックを Fig. 3.12 に示す．指令角度と現在角度から目標電流を決定し，各固定子コイルに入力する電流を決定する．X, Z 軸周りの目標トルクは，目標角度と現在角度の差分に比例ゲインをかけて，(3.10)に示すように決定する．

$$\begin{aligned} T_{xref} &= K_{px}(\theta_{xref} - \theta_x) \\ T_{zref} &= K_{pz}(\theta_{zref} - \theta_z) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ここで， K_{px} ， K_{pz} はそれぞれ X 軸，Z 軸周りの比例ゲインである．

これらの目標トルクと(3.9)示す運動方程式から，目標推力は以下の式で表すことができる．

$$\begin{aligned} F_{14} &= \left(-\frac{T_{xref}}{2r_x} + \frac{T_{zref}}{2r_z} \right) \\ F_{23} &= \left(-\frac{T_{xref}}{2r_x} - \frac{T_{zref}}{2r_z} \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

これらの目標推力と，回転角度を用いて，従来の 3 相 AC モータと同様に，各コイルの電流値を決定した．

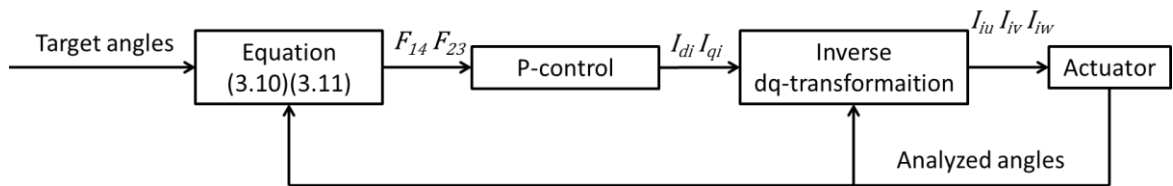


Fig. 3.12 Control diagram

3.4.2 静トルク特性解析

本節では，3次元有限要素法を用いた磁場解析によって，提案した2自由度差動結合型アクチュエータの特性検証を行う．励磁電流は，従来の3相交流モータと同様に，永久磁

石が作る磁界に対して4分の1進んだ磁界となるような電流を固定子コイルに入力した。空気領域を除いた3次元メッシュ分割図を Fig. 3.13 に、解析諸元を Table 3.4 にそれぞれ示す。

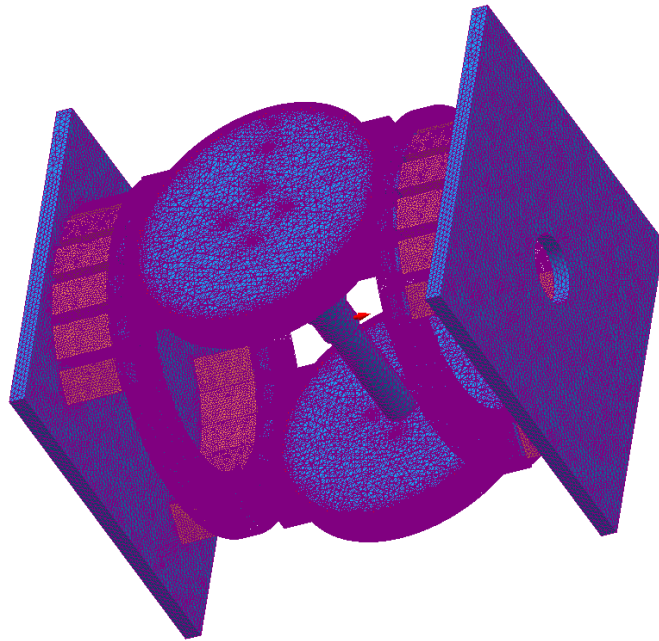


Fig. 3.13 Mesh model of the actuator

Table 3.4 Simulation condition

Number of elements	5,000,000
Number of nodes	320,000
Number of edges	1,300,000
CPU	Intel (R) Core (TM) i7 5960X
Number of steps (static analysis)	20 (X-axis) 20 (Z-axis)
Simulation time (static analysis)	3 hours (X-axis) 3.5 hours (Z-axis)
Number of time instants (dynamic analysis)	251
Simulation time (dynamic analysis)	6 hours

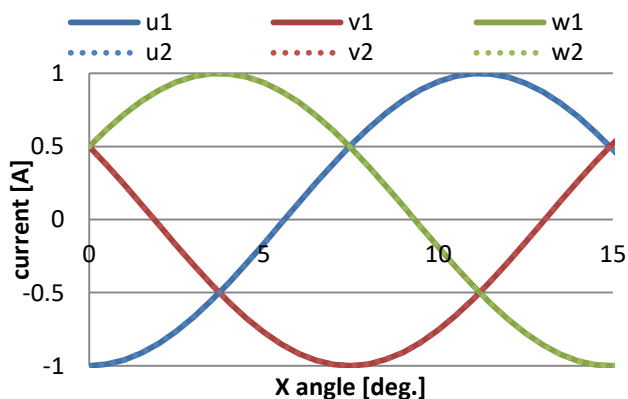
- 静解析結果（X 軸周り）

2 種類の解析を行った．まず，Z 軸周りの回転角度を固定し，X 軸周りの回転角度を初期位置から 15 度まで 0.5 度刻みで回転させた．この条件において，電流通電時と非通電時に可動子に働く X，Z 軸周りのトルクを比較した．

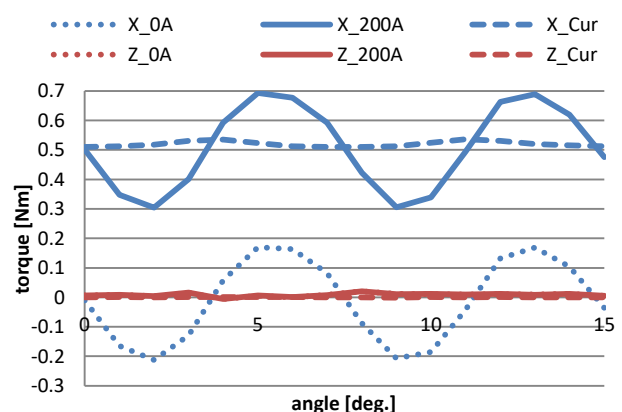
X 軸周りにおける電流値を Fig. 3.14(a)に，静解析結果を Fig. 3.14(b)に示す．図中点線と実線がそれぞれ非通電時，通電時のトルクを表しており，赤色と青色がそれぞれ，X 軸周り，Z 軸周りのトルクを表している．X 軸周り通電時，全可動範囲においてトルクの発生が確認できる．Z 軸周りのトルクは，非通電時，通電時共に発生しておらず，動作原理通り Z 軸周りのトルクが打ち消し合っていることが確認できる．この時の X 軸周りの平均電流トルクは 0.58Nm であった．

- 静解析結果（Z 軸周り）

Z 軸周りについても同様の解析を行った．X 軸周りの回転角度を固定し，Z 軸周りの回転角度を初期位置から 22.5 度まで 0.5 度刻みで回転させた．この条件において，電流通電時と非通電時に可動子に働く X，Z 軸周りのトルクを比較した．またコイル通電時の各コイル電流値を Fig. 3.15(a)に，静解析結果を Fig. 3.15(b)に示す．Z 軸周り通電時，全可動範囲においてトルクの発生が確認できる．X 軸周りのトルクは，非通電時，通電時共に発生しておらず，こちらも X 軸周りのトルクが打ち消し合っていることが確認できる．この時の Z 軸周りの平均出力トルクは 0.58Nm であった．



(a) Current values (X-axis)



(b) Static results (X-axis)

Fig. 3.14 Static results (X-axis)

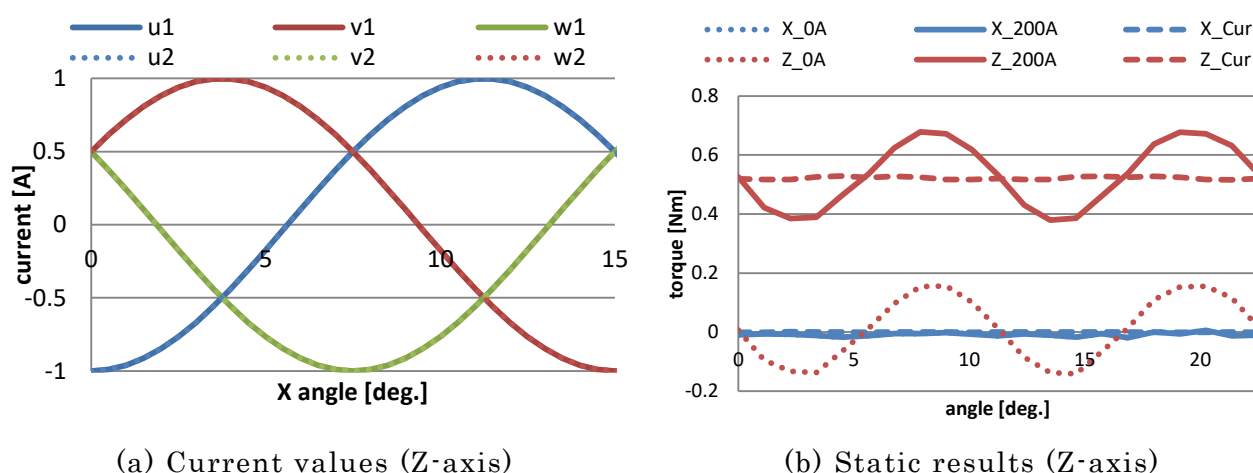


Fig. 3.15 Static results (Z-axis)

● 静解析結果（全領域）

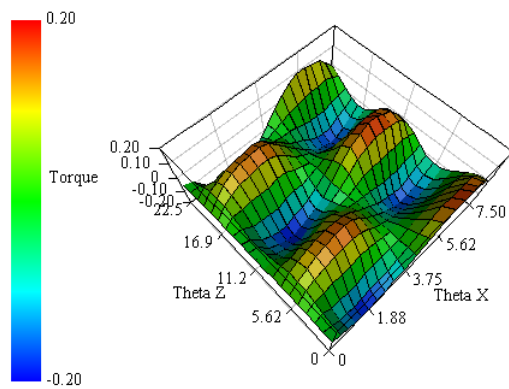
最後に、アクチュエータの可動範囲での静トルク特性を確認する。本アクチュエータは、端部の磁気回路の乱れを無視すると、X 軸周りは 0 度から 14.92 度、Z 軸周りは 0 度から 22.5 度回転すると同じ磁気回路が繰り返される。すなわち、この範囲の特性を確認することによって、端部を除いた全領域の静トルク特性を確認することが可能である。

アクチュエータを Table 3.5 に示すように回転させた。この時、前述の解析と同様に通電時と非通電時の 2 通りで解析を行った。本アクチュエータは 2 組の 3 相交流を用いて駆動するが、通電時の解析においてはそのうちの 1 組のみ使用している。固定子磁極、およびコイルはアクチュエータの YZ 平面に対して鏡像対象であるため、2 組のコイル群の電流特性は同等である。

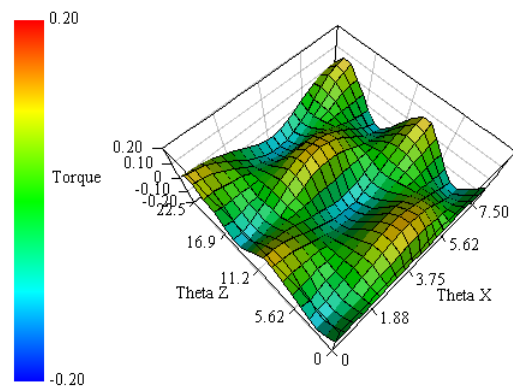
X, Z 軸周りの非通電時のトルクを Fig. 3.16(a), Fig. 3.16(b)にそれぞれ示す。X 軸周りの非通電時における最大トルク、最小トルクはそれぞれ 0.19Nm, -0.21Nm , Z 軸周りの非通電時における最大トルク、最小トルクはそれぞれ 0.13Nm, -0.12Nm であった。また X, Z 軸周りの電流トルクをそれぞれ Fig. 3.17(a), Fig. 3.17(b)に示す。X, Z 軸周りの平均電流トルクは -0.26Nm , 0.27Nm であった。Fig. 3.17 に示すように電流トルクは全領域でフラットな電流特性を有していることがわかる。X, Z 軸周りの最大電流トルクはそれぞれ -0.25Nm , 0.27Nm , 最小電流トルクはそれぞれ -0.27Nm , 0.26Nm であり、平均電流トルクとの差が最大でも 4%以内に収まっていることが確認できた。

Table 3.5 Simulation range

X-axis rotation	0 degree to 15 degree (by 1 degree)
Z-axis rotation	0 degree to 22 degree (by 1 degree)
Total problems	362

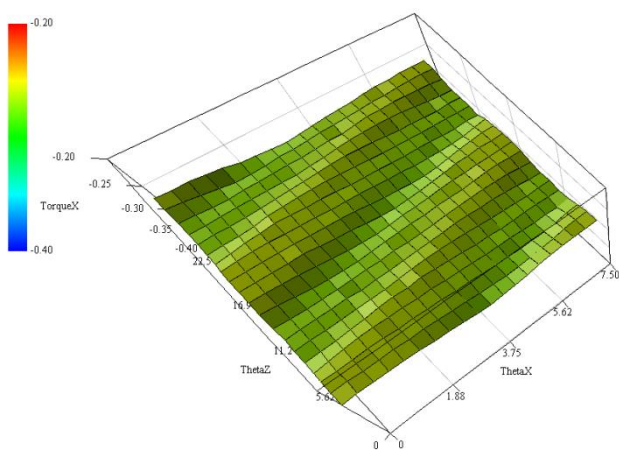


(a) X-axis

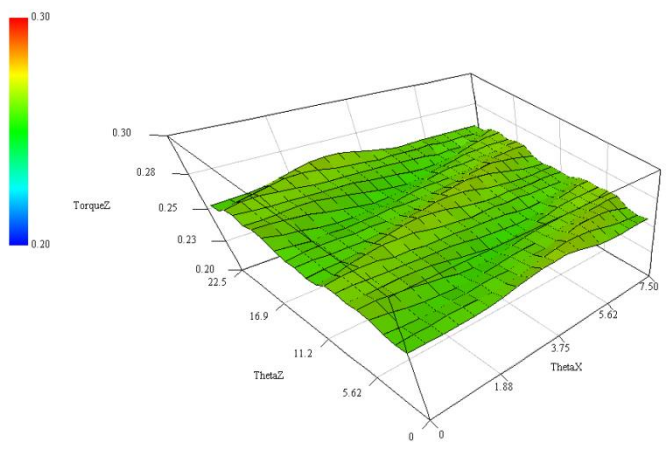


(b) Z-axis

Fig. 3.16 Static results without currents (full range)



(a) X-axis



(b) Z-axis

Fig. 3.17 Static results of current torques (full range)

3.4.3 動作特性解析

提案アクチュエータの動作特性を，3次元有限要素法による磁場解析によって確認した．指令値を Fig. 3.18, Table 3.6 にそれぞれ示す．まず単軸回りの指令値を与え，続いてそれらの指令値を同時に与えた場合，計3通りの動解析を行った．

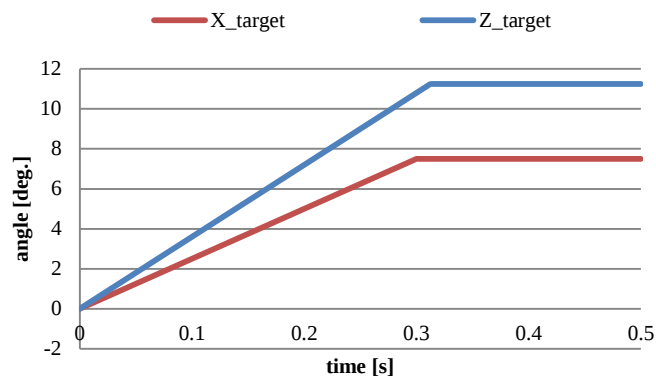


Fig. 3.18 Target values

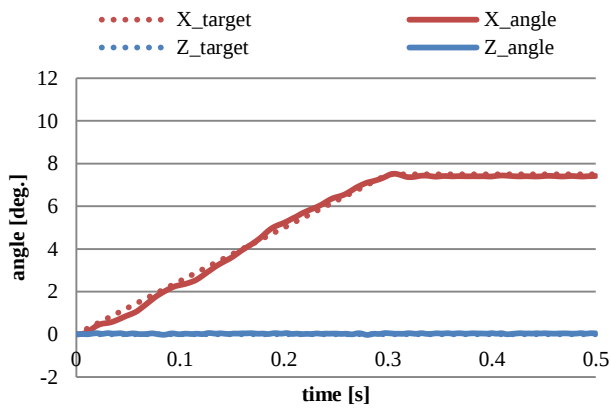
Table 3.6 Target motions

	Case 1	Case 2	Case 2
Target θ_x	X_target	0 (fixed)	X_target
Target θ_z	0 (fixed)	Z_target	Z_target

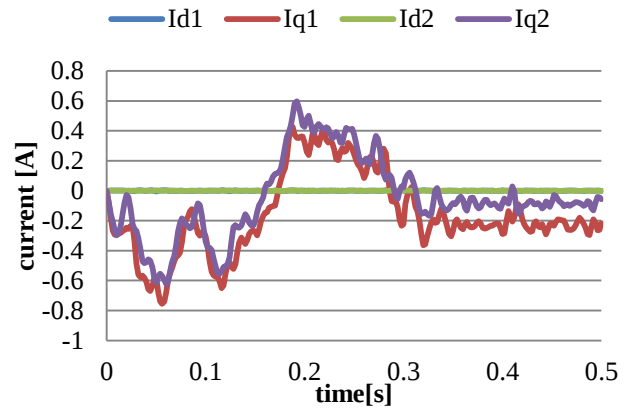
X 軸周りの解析結果を Fig. 3.19(a)に示す．可動子は指令値に沿って回転していることがわかる．また Z 軸周りのぶれは 0.1 度以内に収まっており，動解析においても，X 軸周りのトルクのみを出力できていることがわかる．0.5 秒時点での，X 軸周りの回転角度は 7.53 度であった．

Z 軸周りの解析結果を Fig. 3.20(a)に示す．可動子は X 軸周りに回転せず，Z 軸周りにのみ回転していることがわかる．X 軸周りのぶれは 0.1 度以内に収まっており，0.5 秒時点での Z 軸周りの回転角度は 11.25 度であった．

2 軸周りの解析結果を Fig. 3.21(a)に示す．可動子は位置指令値に沿って，2 軸周りに回転した．0.5 秒時点での X，Z 軸周りの回転角度はそれぞれ 7.53 度，11.25 度であった．以上の結果より，従来のモータと同様の制御回路を用いた動解析において，位置制御可能であることを確認した．また定常状態における偏差が単軸回りの結果と，2 軸周りの結果において変化せず，2 軸周りにおいて良好な制御性を有することを確認することができた．

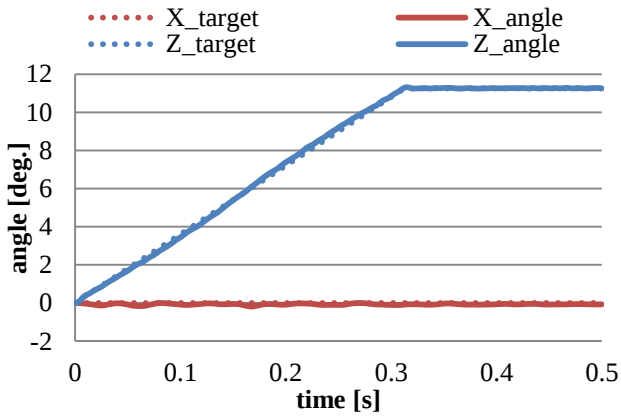


(a) Rotation angles

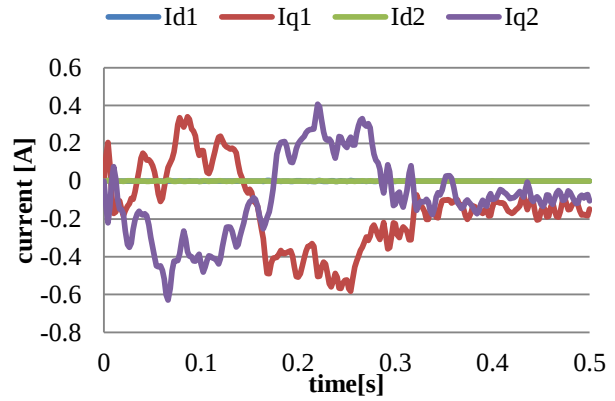


(b) Current values

Fig. 3.19 Analysis results (Case 1)

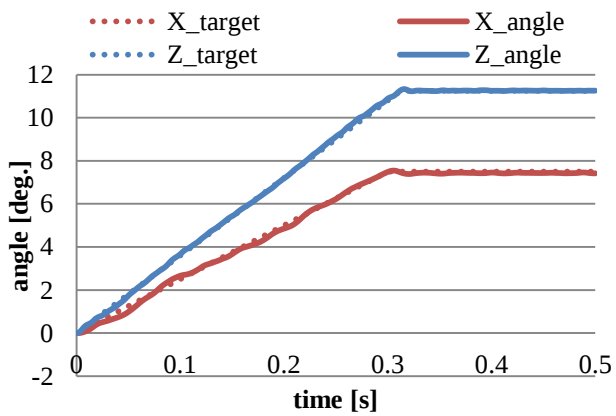


(a) Rotation angles

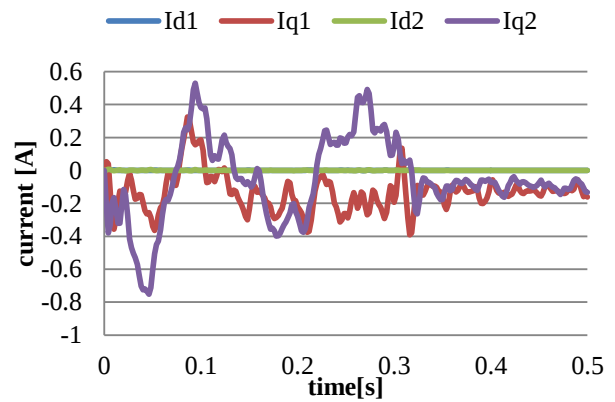


(b) Current values

Fig. 3.20 Analysis results (Case 2)



(a) Rotation angles



(b) Current values

Fig. 3.21 Analysis results (Case 3)

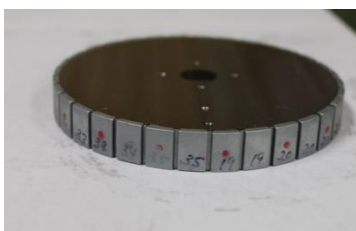
3.5 実機による検証

3.5.1 試作機構成

試作機の各構成要素を Fig. 3.22 にそれぞれ示す。Fig. 3.22(a) に可動子平板を示す。磁性体で作製した平板に対して、32 個の瓦型磁石が接着されている。また磁石は信越化学社製の N42SH-R を使用している。磁石の厚さは 2mm で設計したが、実測では 1.865mm 程度であった。この値を用いて、解析は再度実行している。また可動子平板は 2 つ存在する。Fig. 3.22(b) に可動子シャフトを示す。非磁性体部品であり、図中左右端部は D カットされている。Fig. 3.22(c) に可動子シャフト平板を示す。中心の箱型部品にはベアリングが挿入されている。また左右のシャフトは中心の部品に圧入されている。可動子シャフト平板の中心に可動子シャフトをベアリング（NTN6801ZZ）を介して接続する。その後可動子シャフトに可動子平板を D カットに合わせて圧入する。これにより、可動子シャフトと可動子平板は Z 軸周りに回転することが可能となる。Fig. 3.22(d) に固定子を示す。磁性体で製作された 1 つの固定子平板に対して 12 本の直方体磁性体磁極が圧入されている。これらの磁極は半径 45mm で 14.92 度間隔で設置されている。固定子平板の厚さは 4.7mm となっており、磁極の長さは 28.7mm となっている。これらの磁極には 72 回巻きのコイル（線径 0.5mm）が設置される。また固定子平板中心にはベアリングが設置されている。2 組の磁極が圧入された固定子平板が存在し、一方はもう一方に対して鏡面对称である。前述の可動子シャフト平板軸をベアリングを介して接続する。これにより、可動子シャフト平板は X 軸周りに回転することが可能となる。Fig. 3.22(e) に支持棒を示す。非磁性体で製作され 4 本存在する。これらを固定子平板の間に設置することが、アクチュエータの剛性を保つ。Fig. 3.22(f) に可動子出力シャフトを示す。可動子平板にねじ止めすることで、アクチュエータとしての出力を得る。

可動子の 2 軸周りのセンシングにはエンコーダを用いている。エンコーダはマイクロテックラボラトリー社の MEH-30-1000PE を用いており、それらの設置個所 2 か所を Fig. 3.23 に示す。Z 軸周りのエンコーダは可動子シャフトにねじ止めされており、X 軸周りのエンコーダは固定子にねじ止めされている。エンコーダの分解能は 0.09 度である。

本アクチュエータの可動子はベアリングによって支持されているため、駆動時の信頼性はベアリングに依存する。



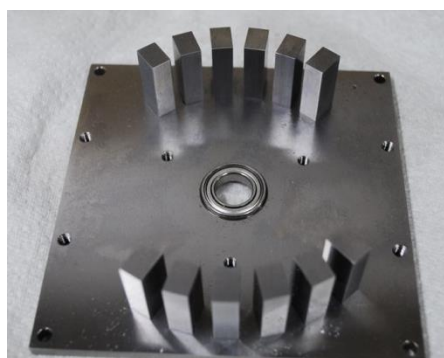
(a) Rotor plate and magnets



(b) Rotor shaft



(c) Rotor shaft plate



(d) Stator plate



(e) Support bar

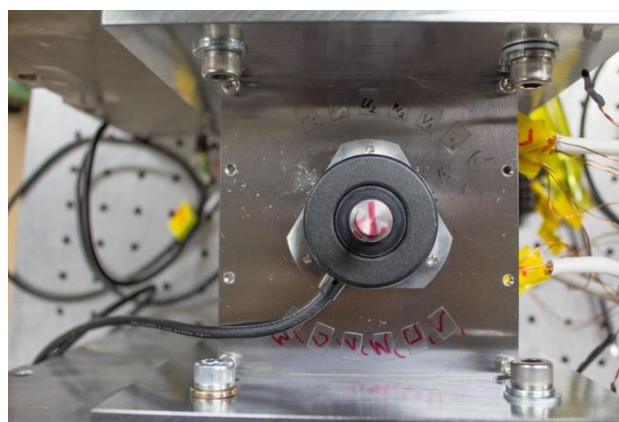


(f) Rotor output shaft

Fig. 3.22 Prototype components



(a) Encoder for Z-axis



(b) Encoder for X-axis

Fig. 3.23 Encoder settings

3.5.2 静トルク特性

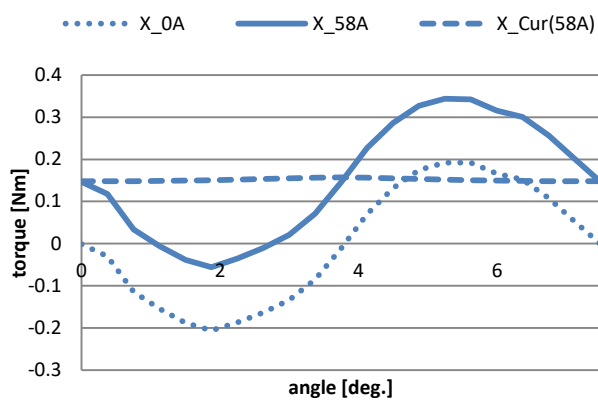
磁石はこれまで 2mm で設計していたが、実測すると 1.865mm 程度となっていた。そのため、磁石の厚さを 2mm から 1.865mm に変更して、再度静解析を行った。また、励磁電流の振幅を 0.8A、起磁力を 58A と設定した。解析結果を Fig. 3.24 に示す。定性的な性質は磁石厚さ 2mm の場合と変化しないが、トルクが全体的に減少している。X 軸、Z 軸周りの平均電流トルクはともに、0.15Nm であった。

続いて、アクチュエータの測定環境を Fig. 3.25 に示す。X、Z 軸周りのトルクを、コイル通電時と非通電時に測定した。X 軸周りの測定の場合、可動子を Z 軸周りに拘束する治具を可動子に接続している。また Z 軸周りの計測時には、Z 軸出力シャフトの X 軸周りの自由度が、駆動用モータによって拘束されるため、拘束用治具は設けていない。測定はアクチュエータを回転させるモータと測定対象であるアクチュエータの間にトルク計を接続し、トルク計軸のねじれを、アクチュエータのトルクとして測定している。駆動用モータで、アクチュエータを X 軸周りでは 7.25 度、Z 軸周りでは 11.25 度回転させ、その時の非通電時と通電時のトルクを比較した。また計測は 4 回行い、それらの平均値を測定値として用いている。

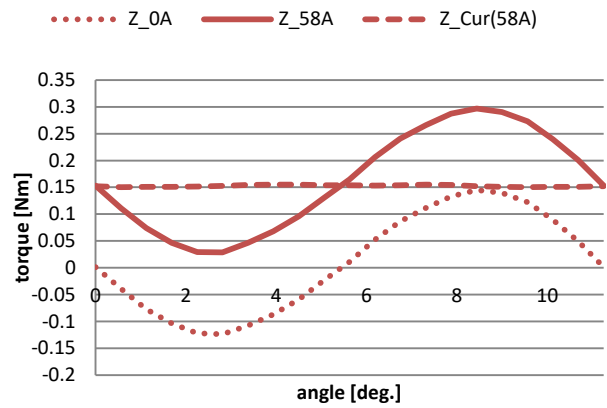
X、Z 軸周りの静トルク特性測定結果を Fig. 3.26、Fig. 3.27 にそれぞれ示す。X 軸周りの測定結果では、非通電時のトルク振幅が 0.2Nm であり、解析との一致が確認できる。また測定した電流トルクには脈動が見られている。平均電流トルクは 0.156Nm であった。

Z 軸周りの測定結果では、非通電時のトルク振幅が 0.13Nm であり、解析(0.144Nm)との一致が確認できる。平均電流トルクは 0.153Nm であった。

また試作機において、目視で可動子の偏心が確認できた。そこで、軸を Y 軸周りに 0.1、0.3 度傾けた状態で、Z 軸周りの静トルク特性解析を行った。解析結果を Fig. 3.28, Fig. 3.29 に示す。返信を考慮すると、Z 軸周りのトルクを出力する電流を入力した場合において、意図しない X 軸周りのトルクが発生することが確認できる。これは回転軸が Y 軸周りに傾くことにより、両側の固定子で発生する力に不釣り合いが生じ、X 軸周りの力がキャンセルされないためである。また偏心を考慮したとしても、Z 軸の電流トルク特性は、フラットであり、偏心は Z 軸周りのトルク特性の脈動に影響しないことが確認できた。



(a) X-axis



(b) Z-axis

Fig. 3.24 Simulation static results (Magnet thickness 1.865mm)

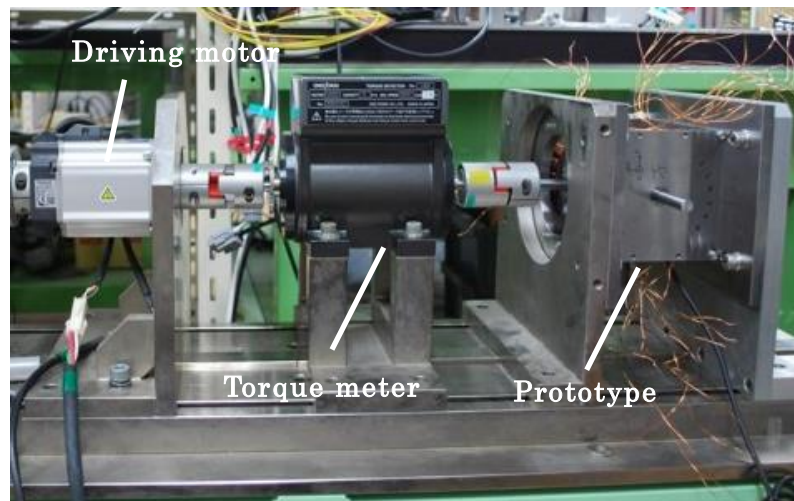
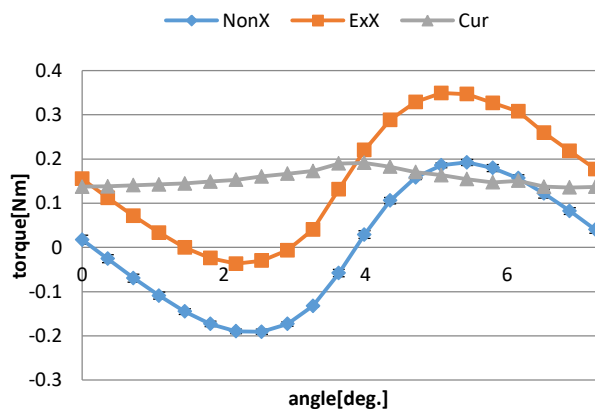
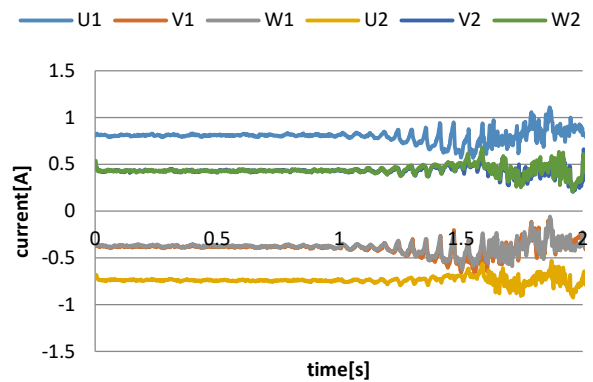


Fig. 3.25 Torque measurement system

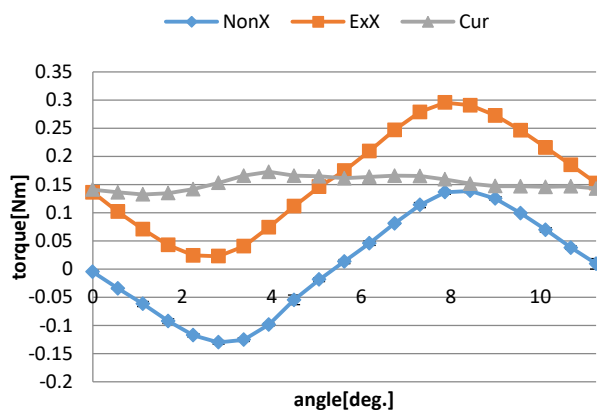


(a) Measurement torque

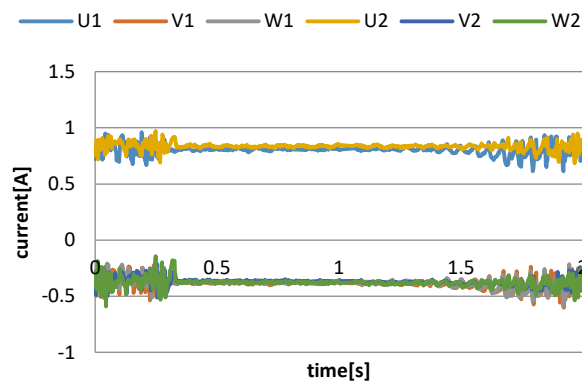


(b) Current values at initial position

Fig. 3.26 Experimental static results X



(a) Measurement torque



(b) Current values at initial position

Fig. 3.27 Experimental static results Z

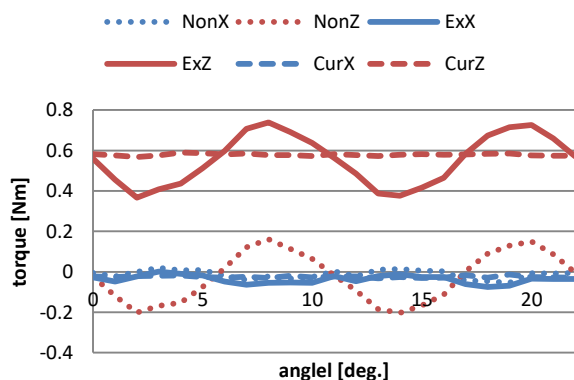


Fig. 3.28 Static results Z (tilted 0.1deg.)

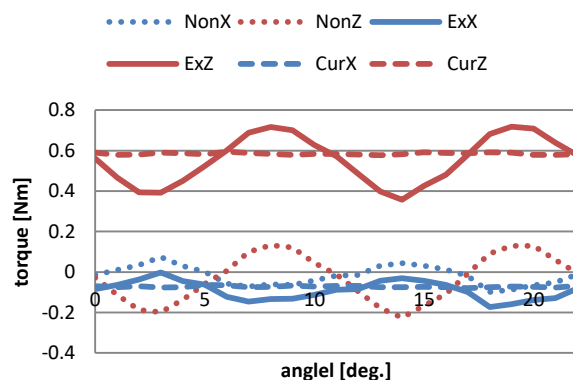


Fig. 3.29 Static results Z (tilted 0.3deg.)

3.5.3 動作特性実験（位置決め制御実験）

試作したアクチュエータを用いて、測定電流値とエンコーダによる測定角度をフィードバックした位置決め制御実験を行った。この時の制御ブロックを Fig. 3.30 に示す。本実験では電圧入力となっている点が、前節で示したシミュレーションと大きく異なる点である。本実験では電圧型の 3 相インバータを用いているため、実機のコイルに実際に流れる電流をフィードバックし、指令値と測定値の差分に対してゲインを積算し、電圧指令値に足し合わせている。電流制御ブロックが追加された以外には、シミュレーションと同様の制御ブロック構成である。

また実験機器構成を Fig. 3.31 に示す．位置指令を操作用 PC から制御用演算機 (dSPACE PX10) へと入力する．PX10 から 3 相インバータ (dSPACE) へとゲート信号が入力され，アクチュエータに 2 組の 3 相交流電圧が印加される．3 相電圧印加を受けて，アクチュエータが駆動し，その時の電流値と回転角度が，3 相インバータ内蔵の電流センサおよび，アクチュエータに設置されたエンコーダによってそれぞれ検出され，PX10 へと送られる．これらの検出値をもとに 3 相インバータへの指令電圧が決定される．アクチュエータの指令値は，シミュレーションと同様 (Fig. 3.18) である．

実験諸元を Table 3.7 に示す．本実験では，コイル 1 個あたりの巻き数が 72 回巻きに低下していることを考慮し，角度制御ゲインの値を 2.78 倍 ($200/72$) とし，シミュレーションと条件を合わせている．また実験では，測定電流に制御機器に由来する電流ノイズが見られたため，測定電流に対してローパスフィルタを設置した．

X 軸周りの実験結果を Fig. 3.32 に示す．角度指令値とエンコーダの検出値を Fig. 3.32(a) に， dq 変換後の指令電流と測定値を Fig. 3.32(b) に示す．Fig. 3.32(a) より，角度指令に沿ってアクチュエータが駆動していることがわかる．またシミュレーションでは無視していた静摩擦と動摩擦の影響により，角度指令に対する追従性は低下している．実験での定常状態における回転角度はそれぞれ 7.47 度，0.00 度であり，2 軸共にエンコーダの分解能以下の値に収まっている．

Z 軸周りの実験結果を Fig. 3.33 に示す．X 軸周りと同様に，指令値に対する追従傾向がみてとれる．定常状態における回転角度はそれぞれ -0.01 度，11.24 度であり，エンコーダの分解能以下に収まっていることがわかる．

最後に 2 軸周りの実験結果を Fig. 3.34 に示す．単軸回りの実験結果と同様に，指令値に対する追従傾向を確認することができる．定常状態における回転角度はそれぞれ 7.47 度，11.24 度であった．2 軸駆動時においても，X，Z 軸周りの定常偏差は変化せず，良好な制御特性を有していることが実験においても確認できる．

Table 3.7 Experimental condition

Input voltage[V]			12
Control frequency[kHz]			5
PWM career frequency[kHz]			10
Number of windings per 1coil			72
Diameter of the coil [mm]			0.5
Moment of inertia [kg*m^2]		X-axis	2.17*10 ⁻³
		Z-axis	6.03*10 ⁻⁴
Coil line resistance [Ω]	Stator1 and 4	UV	2.5
		VW	2.5
		WU	2.5
	Stator 2 and 3	UV	2.8
		VW	2.8
		WU	2.5
P gain(Current control)			2
P gain (Position control)			1.38

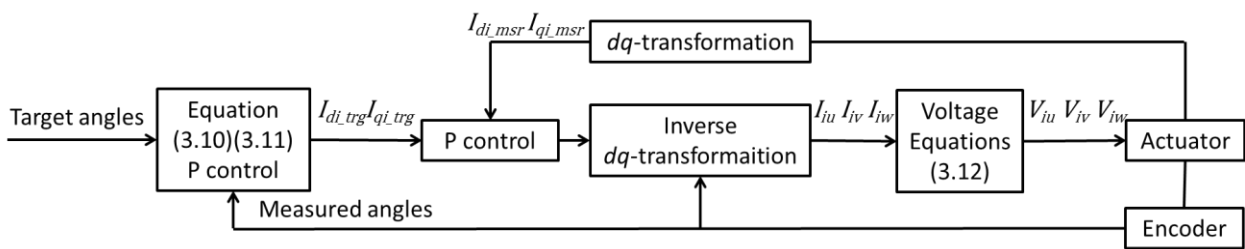


Fig. 3.30 Control diagram (Experiment)

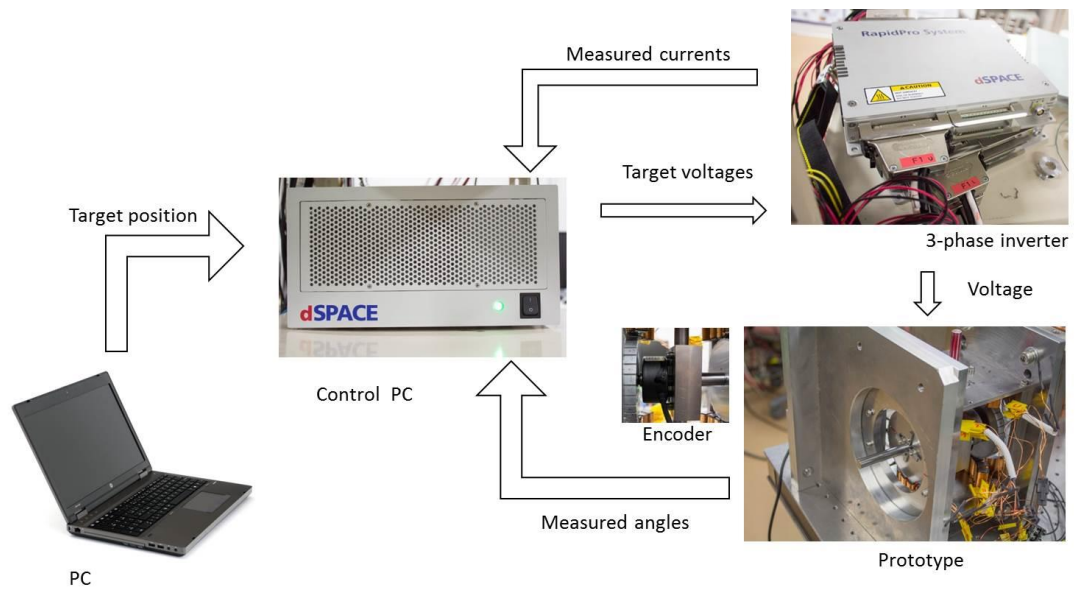
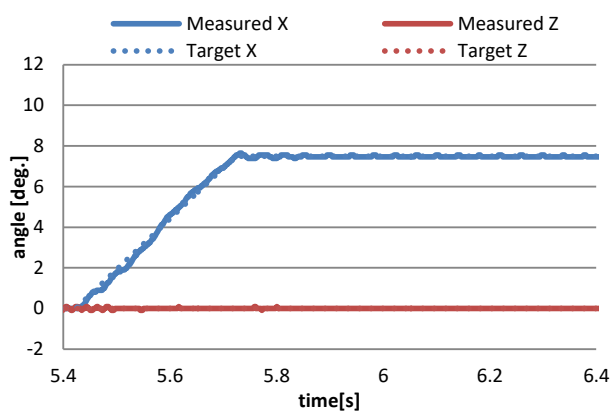
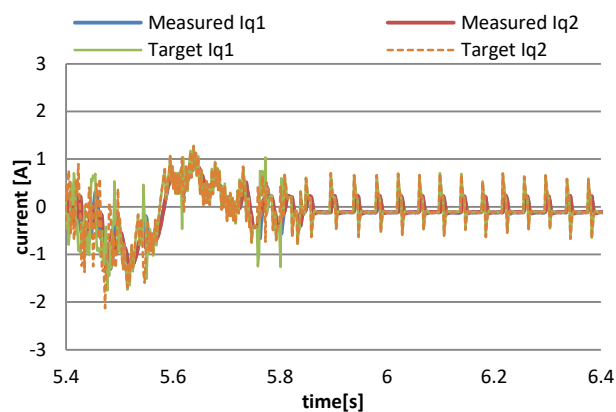


Fig. 3.31 System for experiments

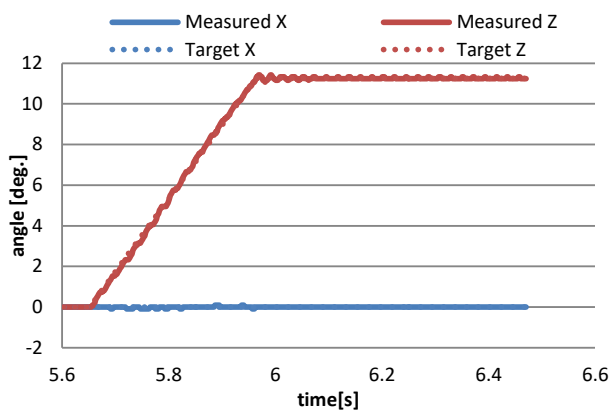


(a) Rotation angles

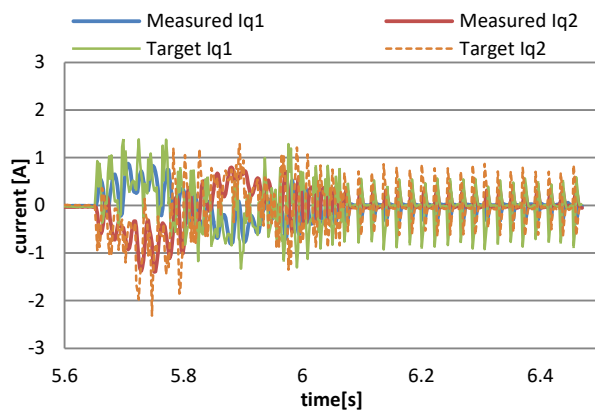


(b) Current values

Fig. 3.32 Experimental results (Case 1)

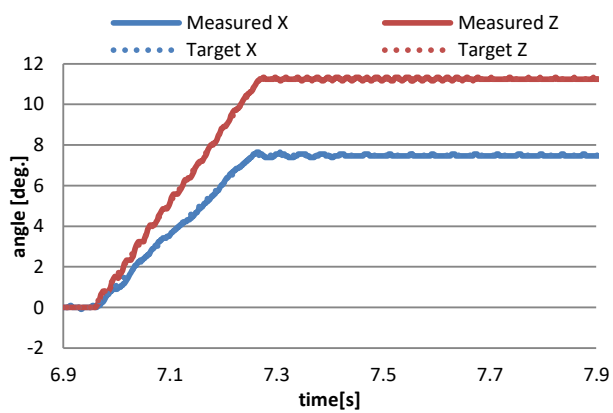


(a) Rotation angles

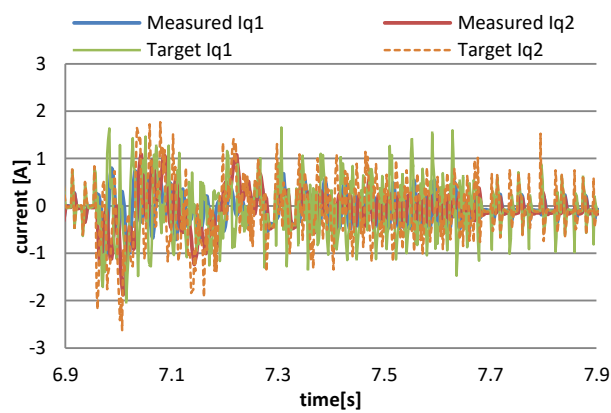


(b) Current values

Fig. 3.33 Experimental results (Case 2)



(a) Rotation angles



(b) Current values

Fig. 3.34 Experimental results (Case 3)

3.6 結言

本章では，先行研究の機械式 2 自由度差動結合機構の構造，メリットを踏まえて，2 自由度差動結合式電磁アクチュエータを提案した．提案アクチュエータの基本構造と，動作原理を明らかにした．続いて，本アクチュエータの設計手順について述べた．

続いて 3 次元有限要素法を用いたシミュレーションによって，提案アクチュエータのトルク特性を確認した．静トルク特性解析では，2 軸周りにおいてトルクを出力可能であること，および全領域においてフラットな電流トルク特性を有しており，良好な制御性を有していることが確認できた．続いて，従来制御手法を用いたフィードバック制御回路を構築し，動トルク特性を確認した．3 相インバータ利用を想定し，6 相電流で駆動させた場合，動作原理通りに駆動できることを確認した．最後に製作した試作機を用いて，静トルク特性検証と位置決め制御実験を行った．静トルク特性は，磁石の公差を考慮したシミュレーションと，平均電流トルクの値が一致し，また位置決め制御実験においては，比較的小さな比例ゲインを用いたため，可動子駆動の立ち上がりに遅れが見られる結果となったが，定常状態においては良好な一致がみられた．得られたアクチュエータの性能を Table 3.8 に示す．

Table 3.8 Actuator specifications

Size[mm]		150×100×100
Mass [kg]		3.25
Average current torque[Nm] (Simulation 200A)	X-axis	0.52
	Z-axis	0.52
Positioning accuracy[deg.] (Experiment)	X-axis	0.03
	Z-axis	0.00
	2-axis	0.03

第4章 結論

本論文では、普及する多自由度システムの1例として、ロボットを紹介した。ロボットを構成する要素の中でも、アクチュエータが力学的運動を出力する重要な部品であることを確認した。

ロボットには現在様々な種類のアクチュエータが用いられているが、多自由度アクチュエータは、多自由度システムに搭載した場合に質量の低減、制御性の向上、部品点数の削減などといったメリットを有しており、実用化の期待が高まっていることを述べた。続いて、多自由度アクチュエータの先行研究について紹介し、複雑な電流値演算、トルク発生可能領域の不均一性、制御装置大型化といったことが、実用化の課題となっていることを述べた。本論文ではこれらの課題を解決すべく、従来の制御手法が利用可能、従来の制御装置が利用可能、電流トルク特性がフラットという特徴を有する、2種類の2自由度電磁アクチュエータを提案した。

2章では、ガイド型2自由度電磁アクチュエータを提案した。本アクチュエータは、磁気回路構成が全くモータであるため、モータと同様の制御回路が使用可能であり、3相インバータを用いて駆動することが可能である。提案アクチュエータについてシミュレーションと実機実験により特性を確認した。静トルク特性解析においては、最大電流トルクが平均電流トルクの18%程度に収まっており、フラットな電流トルク特性を有することを確認した。また、シミュレーションと試作機を用いて実験により、位置決め制御が可能であることを確認し、従来制御手法、従来制御装置を用いて駆動可能であることを確認した。しかしながら、2つの可動子を接続するガイド機構がジンバル機構と同様であるため、高回転角度になると特異点が存在し、ガイド機構と出力シャフトの間に摺動部が存在する問題を確認した。

3章では、2自由度差動結合型アクチュエータを提案した。本アクチュエータは、先行研究の機械式2自由度差動結合機構を磁氣的に1つのアクチュエータとして再構築したものである。本アクチュエータの磁気回路構成は、従来の3相同期モータと同様であるため、

従来の制御手法，制御装置を利用することが可能である．シミュレーションによってアクチュエータ全領域におけるトルク特性を確認した．結果として，最大電流トルクは平均電流トルクの 18%程度に収まっており，フラットな電流トルク特性を有することが確認できた．また従来の制御手法を用いた制御回路を作成し，3相インバータ2台で駆動することを想定した動トルク特性解析を行った．結果，単軸，両軸周りにおいて可動子は指令値通りに駆動することができ，従来制御手法，従来制御装置を用いて駆動可能であることを確認した．また試作機を用いた実機においても，シミュレーションと同様の静トルク特性と，位置決め制御ができることを確認した．以上により，提案した2自由度差動結合型アクチュエータの性能をシミュレーションと実機の両方において，確認することができた．

4章では本論文で得られた知見について要約した．

参考文献

- [1] 日刊工業新聞社編，ロボティクス最前線，日本経済新聞出版社
- [2] YASKAWA NEWS No.289, pp.10-11, 2009
- [3] <https://www.irobot-jp.com/>
- [4] <http://www.softbank.jp/robot/consumer/products/>
- [5] <https://www.cyberdyne.jp/>
- [6] <http://www.intuitivesurgical.com/jp/aboutdavinci.html>
- [7] <http://www.secom.co.jp/>
- [8] <http://biorob.epfl.ch/pleurobot>
- [9] 小川 絃一，初めて学ぶ基礎ロボット工学，東京電機大学出版局
- [10] http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html
- [11] 石黒 浩，どうすれば「人」を創れるか-アンドロイドになった私-，新潮文庫
- [12] 細田 耕，柔らかヒューマノイド，化学同人
- [13] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [14] 森本 雅之，入門モータ工学 インバータで駆動するこれからのモーターのしくみ，森北出版株式会社
- [15] K. Kaneko, K. Yamada and K. Itao, "A Spherical DC Servo Motor With Three Degrees of Freedom," Trans. ASME Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp. 398-402 1989
- [16] 平田 勝弘，次世代アクチュエータ原理と設計方法，丸善出版
- [17] 広瀬 茂男，ロボット工学-機械システムのベクトル解析-，裳華房，1987
- [18] G. Kenneally and D. E. Koditschek, "Leg Design for Energy Management in an Electromechanical Robot", Proc. Of IEEE IROS 2015, Sep
- [19] G. Kenneally, A. De and D. E. Koditschek, "design Principles for a Family of Direct-Drive Legged Robots", IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.1, No.2, pp.900-907, 2016
- [20] J. Wang, K. Mitchell, G. W. Jewell and D. Howe, "Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors," IEEE Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation, pp. 1798-1805, May 2001
- [21] L. Kahlen, I. Voss, C. Priebe and R. W. D. Doncker, "Torque Control of a Spherical Machine With Variable Pole Pitch," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, pp. 1628-1634, Nov 2004
- [22] H. Son and K. M. Lee, "Open-Loop Controller Design and Dynamic Characteristics of a Spherical Wheel Motor," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3475-3482, Oct 2010

- [23] M. Kumagai and R. L. Hollis, "Development and Control of a Three DOF Spherical Induction Motor," IEEE ICRA, May 2013
- [24] B. v. Nijhuis, J. W. Jansen, B. L. J. Gysen and E. A. Lomonova, "Topology Comparison of Slotless Permanent Magnet Semispherical Actuators,"
vol. 11, no.11, Nov 2014
- [25] Y. Sakaidani, K. Hirata, N. Niguchi and S. Maeda, "Experimental Verification of Feedback Control of a 2-DOF Spherical Actuator", IEEE
transactions on magnetics, Vol. 50, No. 11, #8204404, Nov 2014
- [26] 西浦 悠介, 平田 勝弘, 堺谷 洋, 新口 昇, 3自由度アウトロータ型電磁球面アクチュエータに関する研究, 電気学会論文誌 D (産業
応用部門誌), vol. 136, No.3, pp.232-237, 2015
- [27] 森本 雅之, 入門インバータ工学 仕組みから理解するインバータの技術, 森北出版株式会社
- [28] 高原 一品, 平田 勝弘, 新口 昇, 西浦 悠介, 堺谷 洋, 藤原 優文, 多自由度球面同期アクチュエータの定電力化における静特性
評価手法の提案, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), vol. 136, No.11, pp.907-912, 2016
- [29] M. Tsukano, Y. Sakaidani, K. Hirata, N. Niguchi, S. Maeda and A. Zaini, "Analysis of 2-Degree of Freedom Outer Rotor Spherical Actuator
Employing 3-D Finite Element Method," IEEE Trans. Magn., Vol.49, No. 5, pp. 2233-2236(2012)
- [30] <https://www.iit.it/lines/icub>
- [31] N.G.Tsagarakis, G.Metta, G.Sandini, D.Vernon, R.Beira, F.Becchi, L.Righetti, J.Santos-Victor, A.J.Ijspeert, M.C.Carrozza and D.G.Caldwell,
"iCub: the design and realization of an open humanoid platform for cognitive and neuroscience research", Advanced Robotics, Vol.21, No.10,
pp.1151-1175, 2007
- [32] N.G. Tsagarakis, F. Becchi, L. Righetti, A. Ijspeert, and D.G. Caldwell. "Lower body realization of the baby humanoid - 'icub'", Proc. of IEEE IROS
2007, pp.

謝辞

本研究は筆者が大阪大学大学院 工学研究科 知能・機能創成工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻平田勝弘教授には、指導教官として丁寧かつ的確なご指導を賜った。また、国内外を問わず、私の研究成果を世の中に発表する機会を与えてくれた。ここに感謝の意を表する。

同専攻 宮坂史和准教授には副査としてご助言をいただくとともに、普段の研究生活においても、有益なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。

同専攻 新口昇助教には、研究に関する相談や、日常の研究生活におけるアドバイスなど多くの助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。

同研究科マテリアル生産科学専攻 生産科学コース 荒井栄司教授には、副査として有益なご助言を賜った。ここに感謝の意を表する。

共同研究先企業の方々には、多くの有益なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。

試作機を作製する上、同研究科 創造工学センター 技術部 三宅陽治さん、岡田博之さんには大変お世話になった。ここに感謝の意を表する。

平田研究室 球面班としてともに活動してきた皆さん、特に前田修平博士、土橋優希さん、塚野聖仁さん、木内祐輔君、大矢桂資君、志摩充紀君、西浦悠介君、早川駿君、雨堤智也君、高原一晶君、部矢明君、俵原隆君には、大変お世話になった。ここに感謝の意を表する。

平田研究室の吉川岳さん、細川博之さん、アリフザイニさん、吉元崇倫さん、北山文矢さん、松澤周平君、村尾駿太君、森元瑛樹君、加藤雅行君、小原章君、光藤健太君、大野勇輝君、延原柊吾君、新田準也君、森田一也君、安川誠真君、鈴木悠希君、南部成仁君、筒井剛大君、亀田大地君、中島淳君には大変お世話になった。ここに感謝の意を表する。

また論文執筆時に、多大な支援をいただいた河野結衣氏に感謝の意を表する。

最後に自分をここまで支えてくれた堺谷裕一、堺谷康子、堺谷裕佳、河村昌男、河村美奈子に感謝の意を表する。

研究業績

論文

- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 修明宇, 前田修平, “広角駆動可能な二自由度球面電磁アクチュエータ”, 電気学会論文誌 D, 電気学会, Vol. 133, No. 1, pp.64-68, 2013 年
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Shuhei Maeda, Noboru Niguchi, “Feedback Control of the 2-DOF Actuator Specialized for 2-Axes Rotation”, IEEE transactions on magnetics, Vol. 49, No. 5, 2233-2236, May 2013
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, “Experimental Verification of a 2-DOF Spherical Actuator”, IEEE transactions on magnetics, Vol. 50, No. 11, #8204404, Nov 2014
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, “Characteristics Analysis of a 2-D Differentially Coupled Magnetic Actuator”, IEEE transactions on magnetics, Vol. 52, No. 3, #8200904, Oct 2015

国際発表

- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, Mingyu Tong, Shuhei Maeda, “2-DOF Electromagnetic Spherical Actuator with Wide Rotation Angle”, INTERMAG 2012 International Magnetics Conference, Vancouver Canada, May 2012
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, Shuhei Maeda, “New Electromagnetic Spherical Actuator Specialized for 2-Degree-of-Freedom Rotation”, CEFC 2012 XIX Conference on Electromagnetic Field Computation, Oita Japan, November 2012
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, Masahito Tsukano, Shuhei Maeda, “Feedback Control of the 2-degree-of-freedom Outer Rotor Spherical Actuator”, XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Ohrid Macedonia, Sep 2013
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, Shuhei Maeda, “Experimental Verification of Feedback Control of a 2-DOF Spherical Actuator”, INTERMAG 2014 International Magnetics Conference, Dresden Germany, May 2014
- Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, “2-D Differentially Coupled Magnetic Actuator”, INTERMAG 2015 International Magnetics Conference, Beijing China, May 2015

- Yo Sakaidani Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, “Characteristics Analysis of a 2-D Differentially Coupled Magnetic Actuator”, COMPUMAG 2015, Montreal Canada, July 2015
- Yo Sakaidani, Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, “Comparison of a 2-DoF Differentially Coupled Actuator with and without Auxiliary Yokes”, Sep 2016

国内発表

- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 倭明宇, 前田修平, “広角駆動可能な二自由度球面電磁アクチュエータ”, リニアドライブ研究会、電気学会、LD-10-10、東京、2011 年 10 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 前田修平, “2 軸独立制御可能な球面電磁アクチュエータのフィードバック制御”, 回転機 リニアドライブ 家電・民生合同研究会, 電気学会, LD-12, 大阪, 2012 年 8 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 前田修平, “二自由度球面電磁アクチュエータのフィードバック制御”, 日本機械学会 電磁力関連のダイナミクス, 17B2-3 箱根, 2013 年 5 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 前田修平, 塚野聖仁, “二自由度アウターロータ型アクチュエータのトルク制御”, 回転機 リニアドライブ 家電・民生合同研究会, 電気学会, LD-13-065, 大阪, 2013 年 8 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, “二自由度差動結合型アクチュエータの特性解析”, 回転機 リニアドライブ 家電・民生合同研究会, 電気学会, LD-15-051, 大阪, 2015 年 8 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, “補助ヨーク設置型二自由度差動結合型アクチュエータの特性解析”, リニアドライブ研究会, 電気学会, LD-16-001, 大阪, 2016 年 1 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, “補助ヨーク設置型回転二自由度アクチュエータの特性解析”, 日本機械学会 電磁力関連のダイナミクス, 18A1-8, 横浜, 2016 年 5 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, “回転二自由度差動結合型アクチュエータのヨーク数に関する検討”, 回転機 リニアドライブ 家電・民生合同研究会, 電気学会, LD-16-089, 大阪, 2016 年 8 月
- 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, “回転2自由度差動結合型アクチュエータの実機検証”, リニアドライブ研究会, 電気学会, LD-17-021, 大阪, 2017 年 1 月